Capítulo 18

Acrilamida e Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos no Café Torrado: Do Grão à Xícara, Evidências e Desafios de Mitigação

Acrylamide and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Roasted Coffee: From Bean to Cup, Evidence and Mitigation Challenges

Cynthia Siqueira Silva
Doutora em Ciências, Instituto Federal do Piauí (IFPI).
Lívia de Sousa Oliveira Macedo
Mestre em Alimentos e Nutrição, Instituto Federal do Piauí (IFPI).
Layane Ribeiro de Araujo Leal
Mestre em Alimentos e Nutrição, Instituto Federal do Piauí (IFPI).
Nívea Maria da Costa Sousa Leite
Mestre em Alimentos e Nutrição, Instituto Federal do Piauí (IFPI).
Jovan Marques Lara Junior
Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Instituto Federal do Piauí (IFPI).

Resumo: A torrefação define a identidade sensorial do café, mas também modifica a ocorrência de contaminantes químicos de interesse sanitário. Esta revisão narrativa crítica examina a formação, a ocorrência e a transferência de acrilamida e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) ao longo da cadeia do café, relacionando composição do grão, pós-colheita, perfil térmico, métodos de preparo e exposição na bebida. Foram confrontados estudos experimentais conduzidos em diferentes matrizes e condições de processamento, além de revisões e documentos de avaliação de risco. A acrilamida apresenta cinética não monotônica durante a torra, com formação precoce e posterior degradação; os HPAs, por sua vez, apresentam comportamento dependente do composto, da fonte de aquecimento e do sistema experimental. Evidências com cultivares brasileiros demonstram que a intensidade da torra, isoladamente, não explica as concentrações de HPAs. A comparação entre pó torrado e bebida evidencia que a ocorrência no produto e a exposição alimentar são grandezas distintas. Propõe-se a integração de análises de contaminantes, caracterização do perfil térmico, composição da matéria-prima e qualidade sensorial como condição para estratégias tecnológicas robustas.

Palavras-chave: acrilamida; café torrado; contaminantes de processamento; hidrocarbonetos policíclicos aromáticos; segurança dos alimentos.

Abstract: Roasting shapes the sensory identity of coffee but also affects the occurrence of chemical contaminants of food safety concern. This critical narrative review examines the formation, occurrence, and transfer of acrylamide and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) along the coffee production chain, considering green bean composition, post-harvest processing, roasting conditions, brewing methods, and dietary exposure through the beverage. Experimental studies involving different coffee matrices and processing conditions are critically compared with specialized reviews and risk assessment documents. Acrylamide generally follows non-monotonic kinetics during roasting, with early formation followed by

DOI: 10.47573/aya.5379.3.37.X

degradation, whereas PAH behavior varies according to the individual compound, heat source, and experimental system. Evidence from Brazilian coffee cultivars indicates that roast degree alone does not consistently explain PAH concentrations. Moreover, contaminant occurrence in roasted ground coffee must be distinguished from exposure through the prepared beverage. These findings do not support a universal roast level that simultaneously minimizes both contaminant groups. Effective mitigation therefore requires integrated monitoring of individual contaminants, green bean characteristics, time–temperature profiles, brewing conditions, and sensory quality. Further studies using paired measurements in roasted coffee and beverages are needed to establish robust, industrially applicable control strategies.

Keywords: acrylamide; roasted coffee; processing contaminants; polycyclic aromatic hydrocarbons; food safety.

INTRODUÇÃO

O café reúne atributos que raramente coexistem com igual intensidade em outros produtos alimentícios: elevada diversidade botânica e agronômica, ampla variação no processamento pós-colheita, forte dependência do tratamento térmico e múltiplas formas de preparo da bebida. Essa complexidade torna insuficiente qualquer interpretação da segurança química baseada exclusivamente no grau de torra ou na categoria comercial. O interesse por acrilamida e HPAs não decorre de uma característica intrínseca e uniforme do café, mas de transformações químicas específicas que podem ocorrer durante o processamento e de sua efetiva contribuição à exposição alimentar.

A narrativa “do grão à xícara” oferece, nesse contexto, mais do que uma organização didática. Ela obriga a distinguir quatro objetos analíticos: a composição do café verde, a cinética dos contaminantes durante a torrefação, o teor residual no produto comercial e a fração que alcança a bebida. Confundir essas etapas produz interpretações frágeis. A detecção de um composto no pó não informa, por si só, a dose ingerida; tampouco uma tendência observada em um torrador piloto pode ser automaticamente extrapolada a sistemas industriais de outra configuração.

Esta revisão procura responder como a matéria-prima e o histórico térmico modulam a formação de acrilamida e HPAs; por que os estudos nem sempre convergem quanto ao efeito da torra; e quais evidências permitem formular medidas de controle sem comprometer indevidamente os atributos sensoriais. A discussão privilegia resultados experimentais verificáveis, com especial atenção a trabalhos brasileiros sobre cultivares e bebidas e a estudos internacionais sobre cinética, precursores e mitigação.

Escopo e abordagem da revisão. Trata-se de revisão narrativa crítica, estruturada em torno de estudos experimentais sobre formação e transferência dos contaminantes, revisões especializadas e documentos de avaliação de risco e de gestão regulatória. A comparação privilegia a identidade dos analitos, a matriz analisada, as condições térmicas e de preparo e as unidades de concentração. Não foram conduzidas busca sistemática com protocolo registrado nem metanálise; por isso, as conclusões sintetizam criticamente os estudos examinados e não pretendem estimar a prevalência global dos contaminantes no café comercial.

A MATRIZ CAFÉ ANTES DA TORREFAÇÃO: ESPÉCIE, ORIGEM E PÓS-COLHEITA

A origem histórica do café e sua importância econômica ajudam a contextualizar o produto, mas, para o problema investigado, são menos decisivas do que a origem agronômica e tecnológica do grão. Espécie, cultivar, condições de cultivo, maturação, secagem e processamento pós-colheita determinam uma composição inicial que não permanece estática durante a torra. Açúcares, aminoácidos livres, ácidos clorogênicos, lipídios e água participam direta ou indiretamente das reações responsáveis pela formação de aromas, pela evolução da cor e pela geração de produtos secundários de interesse toxicológico.

A distinção entre Coffea arabica e Coffea canephora é pertinente porque os estudos registram diferenças de composição e de comportamento durante o processamento. Contudo, ela não deve ser convertida em regra absoluta. Lantz *et al.* (2006) identificaram maiores teores de acrilamida em produtos com maior participação de robusta e associação da asparagina com o contaminante apenas em amostras de arábica. O resultado mostra que relações químicas aparentemente diretas podem variar entre matrizes, mesmo quando o mecanismo geral de formação é conhecido.

A influência da origem e do pós-colheita foi examinada de forma particularmente elucidativa por Vezzulli *et al.* (2022), que analisaram 47 amostras de arábica especial e sete de robusta de alta qualidade, quantificando precursores no grão verde e acrilamida em torras claras, médias e escuras. Os cafés processados pelas vias úmida e honey apresentaram menores teores de glicose e frutose no grão verde; não foram identificadas diferenças marcantes de sacarose e asparagina entre todos os grupos. A acrilamida foi menor nos cafés honey do conjunto estudado e apresentou associações distintas com precursores conforme a espécie e o processamento. Esses resultados justificam incluir a etapa agrícola e pós-colheita na análise, mas não permitem atribuir ao método honey uma garantia geral de menor contaminação.

Também importa separar a classificação mercadológica da evidência sanitária. Café especial descreve, fundamentalmente, critérios de qualidade e avaliação sensorial; gourmet e tradicional são categorias comerciais cuja interpretação depende do sistema de classificação adotado. Nenhuma dessas denominações constitui, por si, indicador validado de menor acrilamida ou de menor concentração de HPAs. A comparação relevante exige que os produtos sejam caracterizados quanto à espécie, ao perfil térmico e ao método analítico, e não apenas quanto ao preço ou ao posicionamento no mercado.

O mesmo cuidado vale para a expressão “torra clara”. A cor é uma medida útil do estado final do processo, mas dois lotes de tonalidade semelhante podem ter sido submetidos a trajetórias térmicas diferentes. A taxa de aquecimento, o tempo de permanência, a transferência de calor, a circulação de ar e a etapa de resfriamento influenciam as reações químicas. Por isso, a cor deve ser tratada como uma variável de caracterização, não como substituta do histórico térmico.

ACRILAMIDA: CINÉTICA DE FORMAÇÃO E CONSEQUÊNCIAS PARA A TORREFAÇÃO

A acrilamida forma-se principalmente a partir da asparagina livre e de compostos carbonílicos gerados durante o aquecimento, em rotas relacionadas à reação de Maillard. A identificação desse mecanismo não significa que a concentração final possa ser prevista pela simples soma dos precursores presentes no grão verde. Em uma matriz heterogênea como o café, disponibilidade de reagentes, atividade de água, reações concorrentes e condições locais de temperatura determinam a extensão da formação e da degradação do composto.

O estudo de Lantz *et al.* (2006) permanece central porque acompanhou diferentes etapas do processamento e demonstrou que a acrilamida atinge um pico no início da torrefação e posteriormente diminui. Os autores observaram que o teor no produto plenamente torrado correspondia a apenas uma fração do máximo anteriormente alcançado. Também identificaram efeitos do grau de torra, da mistura entre arábica e robusta e do armazenamento. A principal contribuição desse trabalho não é estabelecer uma classificação universal de torras, mas evidenciar que o teor residual resulta de processos simultâneos de formação e consumo.

Essa característica cinética explica por que torras mais claras podem, em determinados sistemas, reter mais acrilamida do que torras mais avançadas. Entretanto, afirmar que “torra clara contém mais acrilamida” sem explicitar a matriz e as condições experimentais seria tão impreciso quanto atribuir maior risco a todo café escuro. Vezzulli *et al.* (2022) observaram picos entre torra clara e média em seu conjunto de cafés de alta qualidade, enquanto Lantz *et al.* (2006) registraram influência conjunta de espécie e intensidade da torra. Os resultados são compatíveis quanto à natureza não linear do processo, mas não equivalem a uma curva quantitativa universal.

Strocchi *et al.* (2022) ressaltam que o controle da acrilamida no café é particularmente complexo porque a matéria-prima e o processo são tecnologicamente menos flexíveis do que em produtos formulados. Não basta reduzir um precursor se a intervenção modificar o perfil aromático, a estabilidade ou a viabilidade industrial. Os autores também chamam a atenção para fatores ainda pouco explorados, incluindo origem e pós-colheita, e para a necessidade de avaliar o produto efetivamente consumido. A revisão de Bonilla, Sandoval-Aldana e Daza (2025) reforça a discussão sobre mecanismos e possibilidades de mitigação, incluindo tratamentos enzimáticos, mas sua aplicação deve ser avaliada em condições realistas de processamento.

Um ponto frequentemente negligenciado é a alteração da acrilamida após a torrefação. Lantz *et al.* (2006) relataram diminuição durante o armazenamento, fenômeno relevante para comparações entre estudos. Se amostras forem analisadas após intervalos distintos, diferenças atribuídas à torra podem refletir também tempo e condições de estocagem. Portanto, trabalhos experimentais precisam documentar não apenas o perfil térmico, mas também o intervalo entre torra, moagem, armazenamento e análise.

A importância sanitária da acrilamida decorre das evidências de genotoxicidade e carcinogenicidade em modelos experimentais, especialmente associadas à formação de glicidamida. A avaliação da EFSA (2015) considera a exposição alimentar motivo de preocupação, embora as evidências epidemiológicas humanas não permitam atribuir diretamente o consumo habitual de café a efeitos carcinogênicos específicos. Para esta revisão, o ponto essencial é que concentração residual, frequência de consumo e transferência à bebida condicionam a contribuição efetiva do café à exposição, sem necessidade de converter o capítulo em uma apresentação geral de parâmetros toxicológicos.

HPAS: HETEROGENEIDADE QUÍMICA, AQUECIMENTO E RESULTADOS DIVERGENTES

Os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos não constituem um contaminante único. São uma família de compostos com diferentes números de anéis aromáticos, propriedades físico-químicas, comportamentos analíticos e relevâncias toxicológicas. A formação pode envolver pirólise e processos de combustão incompleta; também devem ser consideradas possíveis contribuições ambientais e do sistema de aquecimento. Assim, a simples expressão “HPAs totais” pode ocultar perfis químicos distintos e dificultar comparações entre estudos que quantificaram conjuntos diferentes de substâncias.

A interpretação toxicológica deve distinguir marcadores de ocorrência e compostos com evidência de carcinogenicidade. O benzo[a]pireno é um indicador frequentemente empregado em estudos de HPAs, mas sua análise isolada não representa necessariamente a presença dos demais compostos relevantes. Para comparações, é essencial informar se o resultado se refere a um HPA individual, a uma soma de quatro compostos ou a outro painel analítico, pois a denominação genérica “HPAs totais” pode induzir equivalências indevidas.

Houessou *et al.* (2007) avaliaram grãos de arábica provenientes de Cuba em um torrador piloto de leito jorrado, com temperatura do ar de entrada entre 180 e 260 °C e condições de torra de 5 ou 20 minutos. Nesse sistema, a formação de fenantreno, antraceno e benzo[a]antraceno foi observada acima de 220 °C; pireno e criseno foram associados à condição de 260 °C. O estudo também identificou alterações no perfil de compostos ao longo do processo. A relevância do trabalho está em demonstrar a sensibilidade de determinados HPAs ao regime térmico; sua limitação para generalizações está no emprego de uma matriz e de um equipamento específicos.

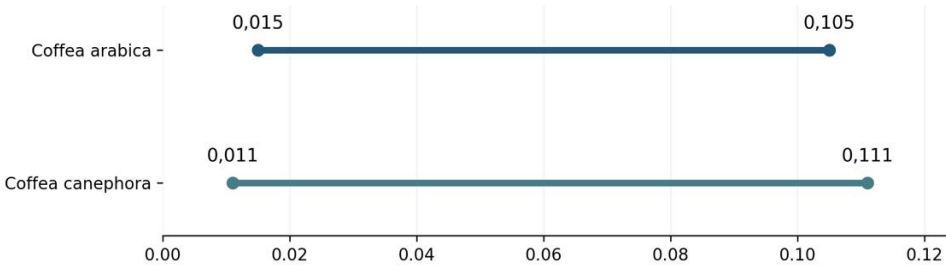
Os resultados obtidos em cultivares brasileiras introduzem uma nuance importante. Tfouni *et al.* (2012) estudaram arábica Catuaí Amarelo IAC-62 e canephora Apoatã IAC-2258, em três graus de torra, e relataram somas de HPAs entre 0,052 e 0,814 µg/kg para arábica e entre 0,108 e 0,392 µg/kg para canephora. Os autores não observaram correlação entre grau de torra, cultivar e concentração de HPAs no conjunto avaliado. Essa ausência de associação não contradiz

necessariamente Houessou *et al.* (2007): os estudos diferem quanto ao sistema de aquecimento, matriz, conjunto de analitos e desenho experimental.

A comparação evidencia um problema metodológico central. Quando um trabalho informa a soma de quatro HPAs e outro inclui compostos adicionais, os valores agregados não são diretamente equivalentes. O mesmo ocorre quando resultados expressos por massa de café torrado são comparados com resultados por volume de bebida. Além disso, compostos com maior massa molecular podem apresentar comportamento de extração diferente daquele de menor massa molecular. Para interpretar a segurança química, a identidade dos analitos e os limites de quantificação são tão importantes quanto o valor numérico informado.

Tfouni *et al.* (2013) analisaram quatro HPAs em bebidas preparadas com cultivares brasileiros de arábica e canephora. As somas relatadas variaram, respectivamente, de 0,015 a 0,105 µg/L e de 0,011 a 0,111 µg/L. A Figura 1 representa essas amplitudes, que se sobrepõem quase integralmente. Não se trata de médias, intervalos de confiança ou resultados de comparação estatística entre espécies. Portanto, os extremos observados não demonstram superioridade sanitária de uma espécie nem descrevem a distribuição de concentrações em cafés comercializados. Para investigar efeitos do cultivar, da torra e do preparo, seria necessário examinar os resultados por tratamento e sua variabilidade.

Figura 1 – Amplitude observada da soma de quatro HPAs em bebidas de café. Os pontos indicam os valores mínimos e máximos publicados para cada espécie; não representam médias nem intervalos de confiança.



Fonte: elaboração própria com base em Tfouni *et al.* (2013).

A transferência dos HPAs para a bebida também foi investigada por Houessou *et al.* (2007), que encontraram coeficientes inferiores a 35% nas condições experimentais estudadas. O resultado mostra que a concentração no pó não deve ser equiparada à ingestão, mas esse percentual não pode ser utilizado como fator universal de conversão para outros métodos de preparo. A moagem, a relação café/água, a temperatura, o tempo de contato e a retenção de partículas podem alterar o comportamento dos analitos.

A unidade de expressão condiciona a interpretação da exposição: µg/kg caracteriza a concentração no café sólido, enquanto µg/L caracteriza a bebida. Estimar a massa ingerida exige conhecer o volume efetivamente consumido; calcular a transferência entre matrizes requer também a massa de pó utilizada e o balanço analítico. Sem essas informações, percentuais obtidos em sistemas experimentais específicos não devem ser extrapolados a outras preparações.

5 Do grão à xícara: evidência comparada, exposição e decisões tecnológicas

Os estudos evidenciam comportamentos distintos: a acrilamida é um contaminante de formação térmica cuja concentração residual frequentemente diminui após um pico inicial; os HPAs apresentam rotas e comportamentos mais heterogêneos, dependentes do composto e das condições de aquecimento. Portanto, a redução de um deles não pode ser utilizada como indicador substituto da redução do outro. Uma torra considerada favorável sob o critério de acrilamida pode não ser ótima quando se examinam HPAs, e a escolha tecnológica precisa incorporar simultaneamente a qualidade sensorial e os resultados analíticos.

Quadro 1 – Síntese comparativa dos estudos experimentais sobre acrilamida e HPAs no café.

Estudo e matriz	Achado verificável	Implicação crítica
Lantz *et al.* (2006), café durante torra e armazenamento	Pico inicial de acrilamida e posterior redução; efeito de espécie e armazenamento	Cor final não substitui cinética e histórico de armazenamento
Vezzulli *et al.* (2022), 47 arábicas especiais e 7 robustas	Influência de origem, pós-colheita e torra; diferenças entre matrizes	Categoria especial não equivale à garantia de segurança química
Houessou *et al.* (2007), arábica em torrador piloto	Formação de HPAs sob condições térmicas específicas; transferência <35%	Resultado não é coeficiente universal para torradores e bebidas
Tfouni *et al.* (2012), cultivares brasileiros	Ausência de correlação simples entre torra/cultivar e HPAs no conjunto estudado	Evitar inferência automática de risco por torra escura
Tfouni *et al.* (2013), bebidas de dois cultivares	Faixas sobrepostas de HPAs nas infusões	Distinguir ocorrência no pó de exposição pela bebida

Fonte: elaboração própria com base em Lantz *et al.* (2006), Houessou *et al.* (2007), Tfouni *et al.* (2012, 2013) e Vezzulli *et al.* (2022).

As diferenças entre pesquisas não devem ser tratadas como ruído a ser eliminado por uma narrativa única. Elas são parte do resultado científico. Um estudo de cinética em torrador piloto, um levantamento de cafés especiais com origens diversas e um experimento com cultivares brasileiros respondem a perguntas distintas. A revisão crítica precisa preservar essas diferenças e esclarecer o alcance de cada inferência. O que a literatura permite afirmar com segurança é a importância da matriz e do processo; o que ela ainda não permite é propor uma regra geral segundo a qual uma única categoria de torra minimize simultaneamente todos os contaminantes.

O Quadro 1 permite distinguir resultados que parecem conflitantes apenas quando se desconsideram os desenhos experimentais. A cinética da acrilamida descrita por Lantz *et al.* (2006) não pode ser comparada diretamente à ocorrência de HPAs nos cultivares de Tfouni *et al.* (2012). A leitura conjunta indica que o controle tecnológico deve especificar o contaminante, a matriz e o processo antes de definir uma condição de torra preferível.

A etapa de preparo da bebida introduz uma segunda seleção química. A acrilamida, por sua solubilidade em água, apresenta potencial de transferência significativo para a infusão; para os HPAs, as propriedades individuais e o sistema de extração são determinantes. Por isso, uma avaliação voltada ao consumidor não deveria terminar na análise do café torrado. É desejável medir os contaminantes na bebida sob protocolos reprodutíveis e expressar os resultados com unidades adequadas, sem confundir concentração no produto, massa extraída e exposição por ocasião de consumo.

No plano analítico, a confiabilidade das conclusões depende de procedimentos validados e suficientemente descritos. Para acrilamida, técnicas cromatográficas acopladas à espectrometria de massas oferecem seletividade adequada quando acompanhadas de controles de recuperação, efeito de matriz e limites de quantificação. Para HPAs, métodos com cromatografia líquida e detecção por fluorescência ou cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas exigem atenção à extração e à identidade de cada analito. A comparação entre trabalhos precisa considerar essas escolhas metodológicas, especialmente quando as concentrações se aproximam dos limites de detecção.

A comparabilidade exige ainda a declaração da base de massa (produto como comercializado ou matéria seca), da incerteza de medição, do tratamento de resultados abaixo do limite de quantificação e da recuperação dos analitos. Em estudos de bebida, o protocolo deve informar volume final, massa de café, granulometria, temperatura e tempo de contato. Sem esses dados, diferenças entre estudos podem refletir o método analítico e a extração, e não necessariamente a torrefação ou a espécie botânica.

A regulamentação europeia, por meio do Regulamento (UE) 2017/2158, estabelece medidas de mitigação e níveis de referência para acrilamida, incluindo 400 µg/kg para café torrado e 850 µg/kg para café solúvel. Esses valores são referências de acompanhamento e gestão de processo, não limites de toxicidade, e não devem ser apresentados como imposições legais automaticamente aplicáveis ao Brasil. Sua utilidade na discussão é mostrar que o controle da acrilamida se apoia em medidas tecnológicas e monitoramento contínuo, e não em uma presunção de ausência completa do contaminante.

A presença de um nível de referência não significa que concentrações inferiores sejam isentas de risco ou que concentrações superiores determinem, isoladamente, um efeito adverso. Os valores europeus orientam a avaliação da eficácia das medidas de mitigação e a revisão de processos. No contexto brasileiro, a aplicabilidade jurídica de qualquer limite depende de regulamentação nacional específica; por isso, os números citados devem ser apresentados como parâmetros europeus, e não como limites máximos brasileiros.

A avaliação sanitária também exige evitar inferências indevidas a partir da classificação de perigo. A EFSA (2015) identificou preocupação relacionada à exposição alimentar à acrilamida; a IARC (2018), ao avaliar o consumo de café como exposição complexa, não encontrou evidências suficientes para classificá-lo como carcinogênico para humanos. Essas afirmações tratam de objetos distintos:

o contaminante isolado e a bebida como mistura complexa. Não se anulam mutuamente, mas tampouco autorizam concluir que a presença de contaminantes torne o consumo de café comprovadamente carcinogênico.

A mitigação deve, portanto, ser concebida como otimização multicritério. Seleção e caracterização da matéria-prima, controle do perfil térmico, manutenção dos equipamentos, prevenção de exposição indevida a produtos de combustão, padronização do armazenamento e monitoramento da bebida podem ser combinados conforme a realidade industrial. Intervenções sobre precursores ou tratamentos enzimáticos exigem avaliação da eficácia em escala real, da preservação sensorial e da viabilidade econômica. A literatura de revisão recente destaca justamente que resultados promissores em laboratório nem sempre se traduzem em soluções prontas para adoção industrial (Strocchi *et al.,* 2022; Bonilla *et al.,* 2025).

Quadro 2 – Variáveis e perguntas analíticas para o controle integrado de contaminantes do grão à bebida.

Etapa	Variáveis indispensáveis	Pergunta que o experimento responde
Grão verde	Espécie, cultivar, origem, pós-colheita, asparagina, açúcares, umidade	Quais diferenças precedem a torrefação?
Torrefação	Curva tempo–temperatura, sistema de aquecimento, cor final, perda de massa	Qual combinação explica formação e degradação?
Pó torrado	Acrilamida e HPAs individuais; tempo de armazenamento	Qual é o teor residual comparável entre lotes?
Bebida	Método, relação café/água, moagem, volume e compostos extraídos	Quanto efetivamente alcança a xícara?
Qualidade e controle	Análise sensorial, replicação, incerteza e desempenho industrial	A mitigação é robusta e tecnologicamente aceitável?

Fonte: elaboração própria.

Na implementação industrial, a eficácia de cada intervenção deve ser comprovada em condições representativas, com critérios de aceitação definidos previamente. É insuficiente reduzir a acrilamida se a mesma alteração aumentar HPAs, comprometer a qualidade sensorial ou gerar resultados instáveis entre lotes. O registro do histórico térmico, da manutenção dos equipamentos e dos resultados analíticos permite identificar desvios e sustentar decisões corretivas.

O Quadro 2 organiza as variáveis mínimas para transformar a hipótese de mitigação em avaliação verificável. Seu valor não está em indicar uma receita única, mas em exigir rastreabilidade desde o grão verde até a bebida e em associar resultados químicos à aceitabilidade sensorial.

Para superar as limitações da comparação indireta entre estudos, recomenda-se um delineamento experimental com replicação independente, combinando matrizes de diferentes origens, trajetórias tempo–temperatura e preparos

padronizados. A amostragem em diferentes pontos da torra permitiria acompanhar a formação e o consumo da acrilamida e a evolução de HPAs individuais. A análise pareada do pó e da bebida, associada à avaliação sensorial, permitiria estimar efeitos, interações e incertezas sem confundir uma mudança na composição química com redução demonstrada da exposição.

INTEGRAÇÃO MECANÍSTICA: POR QUE ACRILAMIDA E HPAS NÃO RESPONDEM IGUALMENTE À TORRA

A interpretação integrada dos dois grupos de contaminantes requer distinguir a disponibilidade de precursores da intensidade do tratamento térmico. Para a acrilamida, a participação da asparagina livre e de intermediários carbonílicos da reação de Maillard estabelece uma conexão direta com a composição do grão. Entretanto, a quantidade residual é resultado líquido de formação e degradação, razão pela qual uma amostra retirada em um ponto intermediário da torra não representa necessariamente o produto comercial. Os resultados de Lantz *et al.* (2006) e Vezzulli *et al.* (2022) mostram que o efeito da torra depende também da espécie, da origem e das condições de processamento.

Para os HPAs, a explicação exige outro enquadramento. Pirólise, combustão incompleta, contato com gases de aquecimento e características de transferência de calor podem contribuir de modo diferente conforme o equipamento e o composto analisado. A ocorrência de fenantreno não deve ser interpretada como equivalente à ocorrência de benzo[a]pireno; tampouco uma soma analítica definida por determinado estudo pode ser comparada diretamente a outra soma composta por analitos distintos. Houessou *et al.* (2007) documentaram formação dependente das condições de torra, enquanto Tfouni *et al.* (2012) não identificaram associação simples entre grau de torra e concentração no conjunto de cultivares examinados.

Essas diferenças impedem uma conclusão simplista segundo a qual intensificar ou suavizar a torra seria sempre a melhor estratégia sanitária. Uma intervenção pode favorecer a degradação da acrilamida e, simultaneamente, modificar a geração ou a deposição de HPAs. Trata-se de uma possibilidade mecanística a testar, e não de um efeito quantitativo demonstrado para todas as tecnologias. A recomendação tecnicamente defensável é caracterizar conjuntamente os contaminantes e a qualidade sensorial em cada processo.

EXPOSIÇÃO ALIMENTAR: DO RESULTADO ANALÍTICO À QUANTIDADE INGERIDA

A distinção entre perigo e exposição é essencial. A presença de um contaminante no pó torrado demonstra ocorrência, mas não estabelece a quantidade ingerida por porção. Na bebida, a dose por ocasião de consumo depende da concentração efetivamente medida e do volume ingerido. Quando a concentração é expressa em

microgramas por litro, a massa ingerida em microgramas pode ser estimada pelo produto da concentração (µg/L) pelo volume consumido (L). A exposição por massa corporal requer ainda dividir a ingestão diária estimada pelo peso corporal (kg), com descrição explícita da frequência e da variabilidade do consumo.

A estimativa a partir do pó exige etapas adicionais: massa de café utilizada, teor do analito por quilograma de produto, rendimento de transferência para a bebida e volume final. A taxa de transferência não deve ser confundida com a proporção de concentração, porque a massa do pó e o volume da infusão são grandezas diferentes. O coeficiente inferior a 35% relatado por Houessou *et al.* (2007) refere-se às condições daquele experimento e não pode ser generalizado para espresso, filtrado, prensa francesa ou outros preparos.

A elevada solubilidade aquosa da acrilamida sugere comportamento de extração distinto do de vários HPAs, mas não dispensa medição direta. Para os HPAs, propriedades físico-químicas, associação a partículas e condições de preparo podem alterar a fração transferida. Os intervalos relatados por Tfouni *et al.* (2013) para bebidas de arábica e canephora ilustram a importância de estudar o produto consumido; não constituem, por si, estimativas de exposição populacional.

Na comunicação de risco, é indispensável separar a classificação de perigo de um composto da avaliação epidemiológica da bebida como mistura complexa. A preocupação da EFSA (2015) com a acrilamida alimentar não equivale à demonstração de que o consumo habitual de café cause câncer. De modo semelhante, a avaliação da IARC (2018) sobre o consumo de café não elimina a necessidade de controlar contaminantes específicos.

MITIGAÇÃO TECNOLOGICAMENTE VERIFICÁVEL E LACUNAS DE PESQUISA

A mitigação pode ser organizada em três níveis complementares. O primeiro é a caracterização da matéria-prima: espécie, cultivar, maturação, pós-colheita, umidade e indicadores de precursores. O segundo é o controle do processamento: equipamento, fonte de energia, fluxo de ar, trajetória tempo–temperatura, temperatura efetiva do grão, ponto final de torra e resfriamento. O terceiro é a verificação do produto: concentração de acrilamida, painel definido de HPAs, avaliação sensorial e, sempre que possível, análise da bebida. A ausência de qualquer uma dessas dimensões enfraquece a interpretação causal.

A seleção de matérias-primas com perfis favoráveis de precursores é uma linha plausível, mas os dados de Vezzulli *et al.* (2022) mostram que as associações variam conforme espécie e processamento. O tratamento enzimático com asparaginase, discutido na literatura de mitigação, deve ser considerado hipótese de intervenção sujeita à comprovação no grão e no processo industrial; eficácia em outra matriz alimentar não garante penetração, estabilidade, resultado sensorial ou viabilidade econômica no café (Strocchi *et al.,* 2022; Bonilla *et al.,* 2025).

Na etapa de torra, otimizar apenas a cor final é insuficiente. Dois lotes com aparência semelhante podem apresentar curvas térmicas diferentes e, portanto, diferentes oportunidades de formação e degradação de contaminantes. Ensaios devem comparar trajetórias térmicas registradas, com replicação de lotes independentes e amostragem em pontos sucessivos, preservando a identidade dos analitos e os limites de quantificação. Também é relevante documentar as condições de armazenamento e o intervalo até a análise, dado o comportamento pós-torra da acrilamida observado por Lantz *et al.* (2006).

Uma agenda experimental consistente inclui planejamento fatorial para investigar interações entre origem, pós-colheita e perfil térmico; quantificação simultânea de acrilamida e HPAs individuais; medição pareada no pó e na bebida; caracterização sensorial cega; e análise de incerteza. Em estudos de monitoramento, devem ser informados limites de detecção e quantificação, recuperação, precisão, efeito de matriz e tratamento de resultados não quantificados. A harmonização desses procedimentos é pré-requisito para comparações entre laboratórios e para futuras sínteses quantitativas.

O Regulamento (UE) 2017/2158 estabelece níveis de referência de 400 µg/kg para café torrado e 850 µg/kg para café solúvel, no âmbito de medidas europeias de mitigação. Esses números não são limites toxicológicos e não devem ser apresentados como exigências brasileiras. A adoção de referências regulatórias deve respeitar a jurisdição e a versão vigente da norma na data da submissão. O critério central de controle continua sendo demonstrar redução reprodutível da exposição potencial sem comprometer a identidade e a qualidade do alimento.

DISCUSSÃO CRÍTICA INTEGRADA: LIMITES DAS EVIDÊNCIAS E PRIORIDADES DE PESQUISA

A leitura conjunta das pesquisas revela que a expressão “efeito da torra” reúne intervenções que não são necessariamente equivalentes. A mesma classificação cromática pode resultar de perfis tempo–temperatura diferentes, e a temperatura do ar do torrador não corresponde automaticamente à temperatura interna do grão. Consequentemente, associações entre torra clara, média ou escura e concentração de contaminantes devem ser interpretadas como resultados condicionados pelo equipamento, pelo protocolo e pela matéria-prima, e não como relações causais universalmente transportáveis.

Vezzulli *et al.* (2022) oferecem um exemplo desse problema: ao examinar 47 amostras de arábica especial e sete de robusta, identificaram diferenças relacionadas à origem, ao processamento pós-colheita e aos precursores, com concentração de acrilamida que atingiu o máximo entre torra clara e média. O resultado é consistente com a cinética não monotônica descrita por Lantz *et al.* (2006), mas não demonstra que a simples escolha de uma cor final controle o contaminante em todas as matrizes. A implicação tecnológica é que um protocolo de mitigação precisa medir a acrilamida residual e caracterizar a trajetória térmica, em vez de usar a cor como único indicador.

Para os HPAs, a generalização é ainda mais problemática. Houessou *et al.* (2007) demonstraram formação dependente das condições de torrefação em sistema piloto, enquanto Tfouni *et al.* (2012) não identificaram uma associação simples entre grau de torra, cultivar e HPAs no conjunto brasileiro examinado. A divergência não exige escolher um estudo como correto e descartar o outro: exige comparar quais compostos foram quantificados, a configuração do aquecimento, as características dos grãos, a recuperação analítica e os limites de quantificação. A revisão sistemática e metanálise de 2024 sobre HPAs em produtos de café, baseada em 15 artigos, reforça a heterogeneidade entre categorias de produto e contextos geográficos; por isso, suas estimativas agregadas não devem ser interpretadas como valores universais de uma xícara individual.

Há ainda uma assimetria importante entre os contaminantes: a acrilamida é hidrossolúvel, enquanto os HPAs abrangem moléculas com propriedades de partição distintas. Isso impede aplicar um único fator de transferência do pó para a bebida. Para quantificar a exposição, o delineamento deve combinar análise pareada do café torrado e da bebida, massa de pó, volume preparado, método de extração e volume consumido. A exposição estimada, expressa em massa ingerida por dia e eventualmente ajustada ao peso corporal, é uma grandeza diferente da concentração em µg/kg no pó ou µg/L na bebida.

A regulamentação europeia estabelece níveis de referência de 400 µg/kg para café torrado e 850 µg/kg para café solúvel, associados à gestão e mitigação de acrilamida (União Europeia, 2017). Não se trata de limiares que separem produtos "seguros" de "inseguros", nem de limites automaticamente aplicáveis no Brasil. A avaliação toxicológica precisa, portanto, evitar tanto o alarmismo baseado na mera detecção quanto a falsa tranquilidade decorrente do atendimento a um valor de referência.

A principal consequência da síntese é metodológica: estudos futuros devem testar simultaneamente acrilamida, HPAs individuais e atributos sensoriais em delineamentos fatoriais com replicação independente, documentando origem do grão, processamento pós-colheita, curva térmica, sistema de aquecimento, armazenamento e preparo. Sem essa integração, uma redução isolada de acrilamida poderá ser anunciada como êxito tecnológico sem que se saiba o que ocorreu com os HPAs, com o rendimento da bebida ou com sua aceitabilidade sensorial. Essa proposta é uma inferência crítica da literatura comparada, e não um efeito experimental já demonstrado em todas as condições.

EVIDÊNCIAS RECENTES E IMPLICAÇÕES PARA UMA AVALIAÇÃO INTEGRADA

A literatura publicada entre 2024 e 2025 acrescenta duas dimensões ao problema. A primeira é a necessidade de avaliar contaminantes térmicos como um conjunto de respostas potencialmente conflitantes, em vez de otimizar isoladamente a acrilamida. Kung *et al.* (2024), ao examinarem métodos de torrefação e formulações

com aditivos, observaram que condições associadas à redução de acrilamida e 5-hidroximetilfurfural não implicavam comportamento igualmente favorável para furano e alquilfuranos. Embora esses compostos não constituam o objeto principal deste capítulo, o estudo oferece uma demonstração experimental da limitação de estratégias baseadas em um único marcador químico. Não seria correto extrapolar seus resultados diretamente aos HPAs, cuja formação e transferência obedecem a mecanismos distintos.

A segunda dimensão é a heterogeneidade da própria base de evidências. Uma revisão sistemática com metanálise publicada em 2024 (HAMRAH *et al.,* 2024) reuniu 15 estudos sobre HPAs em diferentes produtos de café e encontrou perfis de ocorrência e estimativas de risco variáveis conforme a categoria do produto e a localização dos estudos. Esse resultado não autoriza a construção de uma concentração média universal para café torrado ou para a bebida: os painéis de analitos, os métodos de extração, as matrizes e as bases de expressão precisam ser examinados antes de qualquer agregação. Uma revisão sistemática de 2025 sobre HPAs em grãos torrados também enfatizou a influência dos procedimentos analíticos na comparabilidade dos achados (Health Risk Assessment, 2024; Concentration, 2025).

No caso da acrilamida, Nazir *et al.* (2025) destacam a contribuição de abordagens metabolômicas para relacionar precursores, rotas reacionais e mudanças durante o processamento. O avanço instrumental é relevante, mas não substitui experimentos que acompanhem a torra em condições industriais e quantifiquem, simultaneamente, a concentração final, a variabilidade entre lotes e a qualidade sensorial. A possibilidade de usar asparaginase, monitoramento de precursores ou seleção de matéria-prima deve ser tratada como hipótese tecnológica sujeita a validação, e não como solução industrial já demonstrada para todas as origens de café. A revisão sistemática de Ghanati *et al.* (2025), voltada aos HPAs em grãos torrados, reforça a importância de explicitar quais compostos foram quantificados e de não equiparar automaticamente seus perfis àqueles observados na bebida.

Dessas evidências resulta uma proposta operacional: (i) definir previamente quais analitos serão acompanhados e os respectivos limites de quantificação; (ii) registrar curvas tempo–temperatura e características do equipamento, e não somente a cor final; (iii) analisar amostras pareadas de grão torrado e bebida, com protocolo de preparo reprodutível; e (iv) avaliar a redução dos contaminantes em conjunto com atributos sensoriais e reprodutibilidade. A evidência de mitigação deve ser atribuída à combinação concreta de matéria-prima, processo e método de preparo, não à designação genérica de torra clara, média ou escura.

Limitações desta revisão. A síntese é narrativa e crítica, sem protocolo prospectivo de revisão sistemática nem reanálise dos dados primários. A busca complementar realizada para esta versão concentrou-se em trabalhos diretamente pertinentes aos mecanismos de formação, à ocorrência, à extração e à mitigação; portanto, não se afirma exaustividade bibliográfica. As conclusões devem ser interpretadas como avaliação qualitativa da consistência e dos limites dos estudos, não como estimativas agrupadas de exposição ou risco.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O café não pode ser classificado quanto à segurança química apenas por sua espécie, categoria comercial ou tonalidade após a torrefação. A acrilamida e os HPAs compartilham a relação com o processamento térmico, mas diferem em mecanismos de formação, cinética e comportamento na bebida. Estudos internacionais demonstram a formação precoce e a posterior degradação da acrilamida, ao passo que pesquisas com cultivares brasileiros mostram que a ocorrência de HPAs não acompanha necessariamente uma progressão simples do grau de torra. Essas evidências, consideradas em conjunto, afastam tanto a ideia de que a torra escura é invariavelmente mais perigosa quanto a suposição de que cafés especiais são intrinsecamente mais seguros.

A contribuição central de uma abordagem do grão à xícara é integrar as etapas que frequentemente são examinadas isoladamente. A interpretação científica se fortalece quando as concentrações são vinculadas à composição do grão, ao histórico térmico, às condições de armazenamento e à transferência para a bebida. O avanço do controle tecnológico dependerá menos de recomendações universais sobre cor da torra e mais de estudos comparativos, analiticamente robustos e compatíveis com a diversidade de produtos e processos encontrados na cadeia do café.

A principal consequência prática é exigir evidências específicas do processo: dados da matéria-prima, registro térmico, resultados analíticos no produto e na bebida e avaliação sensorial. O acompanhamento dessas dimensões fornece base mais sólida para decisões industriais do que classificações comerciais ou recomendações genéricas de intensidade de torra.

REFERÊNCIAS

BONILLA, L. F.; SANDOVAL-ALDANA, A.; DAZA, L. D. **Acrylamide: An approach to its knowledge and importance for roasted coffee**. Food Chemistry, v. 466, art. 142247, 2025. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.142247.

EFSA CONTAM PANEL. Scientific Opinion on acrylamide in food. **EFSA Journal,** v. 13, n. 6, art. 4104, 2015. DOI: 10.2903/j.efsa.2015.4104.

EUROPEAN COMMISSION. Commission Regulation (EU) 2017/2158 of 20 November 2017 establishing mitigation measures and benchmark levels for the reduction of the presence of acrylamide in food. **Official Journal of the European Union,** 2017. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/2158/oj.

GHANATI, K.; AKBARI-ADERGANI, B.; IRSHAD, N.; MOHAMADI, B.; ABEDINI, A.; SHAVALI-GILANI, P.; SADIGHARA, P. Concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in roasted coffee beans: a systematic review. **Beverage Plant Research**, v. 5, art. e018, 2025. DOI: 10.48130/bpr-0025-0006.

HAMRAH, R. P.; RAHIMI, A.; YARAHMADI, M.; TALEBI-GHANE, E.; MEHRI, F. Health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coffee-based products: a meta-analysis study and systematic review. **Journal of Agriculture and Food Research,** v. 18, art. 101508, 2024. DOI: 10.1016/j.jafr.2024.101508.

HOUESSOU, J. K. *et al.* Effect of roasting conditions on the polycyclic aromatic hydrocarbon content in ground Arabica coffee and coffee brew. **Journal of Agricultural and Food Chemistry,** v. 55, n. 23, p. 9719–9726, 2007. DOI: 10.1021/jf071745s.

IARC. Drinking Coffee, Mate, and Very Hot Beverages. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, v. 116. **Lyon: International Agency for Research on Cancer**, 2018. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK543953/.

KUNG, H.-C.; HUANG, B.-W.; CHERUIYOT, N. K.; LEE, K.-L.; CHANG-CHIEN, G.-P. Insights into acrylamide and furanic compounds in coffee with a focus on roasting methods and additives. **Food Research International,** v. 192, art. 114800, 2024. DOI: 10.1016/j.foodres.2024.114800.

LANTZ, I. *et al.* Studies on acrylamide levels in roasting, storage and brewing of coffee. **Molecular Nutrition & Food Research,** v. 50, n. 11, p. 1039–1046, 2006. DOI: 10.1002/mnfr.200600069.

NAZIR, N.; SYUKRI, D.; ANGGRAINI, T.; FADRI, R. A.; AFRILIANA, A.; KUSNADI, J.; PUTRI, A. Z.; HARIRY, A. Metabolomic insights on acrylamide formation and mitigation in coffee processing: a review. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 146, art. 107977, 2025. DOI: 10.1016/j.jfca.2025.107977.

STROCCHI, G. *et al.* Acrylamide in coffee: What is known and what still needs to be explored. A review. **Food Chemistry,** v. 393, art. 133406, 2022. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.133406.

TFOUNI, S. A. V. *et al.* Effect of roasting on chlorogenic acids, caffeine, and polycyclic aromatic hydrocarbon levels in two Coffea cultivars: Coffea arabica cv. Catuaí Amarelo IAC-62 and Coffea canephora cv. Apoatã IAC-2258. **International Journal of Food Science & Technology,** v. 47, p. 406–415, 2012. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2011.02854.x.

TFOUNI, S. A. V. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in coffee brew: Influence of roasting and brewing procedures in two Coffea cultivars. **LWT - Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 526–530, 2013. DOI: 10.1016/j.lwt.2012.08.015.

VEZZULLI, F.; TRIACHINI, S.; MULAZZI, A.; LAMBRI, M.; BERTUZZI, T. Acrylamide: impact of precursors concentration, origin, post-harvesting process and roasting level in high-quality arabica and Robusta coffee. **International Journal of Food Science & Technology,** v. 57, n. 12, p. 7468–7476, 2022. DOI: 10.1111/ijfs.15900.