

Estudo da tecnologia de plasma frio por meio da utilização do *software VOSviewer*

Study of cold plasma technology using the VOSviewer software

Estudio de la tecnología de plasma frío utilizando el *software VOSviewer*

Recebido: 15/03/2022 | Revisado: 22/03/2022 | Aceito: 29/03/2022 | Publicado: 05/04/2022

Amanda Cândido Brito

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6193-649X>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: amandacbrito@gmail.com

Lucas Donizete Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9386-6046>
Universidade Federal de Uberlândia, Brasil
E-mail: lucas.donizete@ufu.br

Priscila Cristina Bizam Vianna

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9232-6184>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: priscila.vianna@uftm.edu.br

Aline Dias Paiva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4234-8892>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: alinedpaiva@yahoo.com.br

Letícia Dias dos Anjos Gonçalves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4326-2353>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: leticia.goncalves@uftm.edu.br

Emiliane Andrade Araújo Naves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5103-1929>
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: emiliane.naves@uftm.edu.br

Resumo

Um dos maiores desafios das indústrias de alimentos é oferecer produtos seguros do ponto de vista microbiológico e nutritivos aos consumidores. As doenças transmitidas por alimentos são consideradas um problema recorrente à saúde pública, além de causarem impactos econômicos para as indústrias. Bactérias patogênicas podem ser introduzidas nos alimentos durante várias etapas, ao longo da cadeia de produção. Nesse contexto, destacam-se os biofilmes microbianos como fontes de contaminação de alimentos e de superfícies processadoras. Estes biofilmes formam comunidades resistentes aos sanitizantes químicos convencionais. Assim, fica evidente a demanda por novas alternativas para descontaminação de superfícies, surgindo o interesse pela aplicação do plasma frio. Esta revisão objetivou um estudo sistemático da literatura sobre o uso do plasma frio, utilizando a base de dados da *Science Direct*, com as palavras-chave *cold plasma* e *biofilms*. Os artigos selecionados foram submetidos para análise no *software Vosviewer*. Após interpretação dos mapas de densidade obtidos percebeu-se que os temas mais estudados relacionados ao plasma frio foram segurança de alimentos, preservação de alimentos e plasma. Constatou-se que a tecnologia de plasma frio é uma abordagem nova, para a qual tem sido observado resultados promissores para a segurança microbiológica dos alimentos, sendo uma alternativa viável para descontaminação de superfícies e de alimentos, assim como para a redução da adesão microbiana e formação de biofilmes em alimentos e superfícies de processamento. Entretanto, são necessários estudos complementares para validação e comercialização industrial e sobre seus efeitos sobre as características sensoriais dos alimentos submetidos a esse tratamento.

Palavras-chave: Alimentos; Doenças transmitidas por alimentos; Adesão bacteriana; Biofilmes; Segurança microbiológica; Plasma frio atmosférico.

Abstract

One of the biggest challenges for food industry is to offer microbiologically safe and nutritious products to consumers. Foodborne diseases are considered a recurring public health problem, in addition to causing economic impacts for industries. Pathogenic bacteria can be introduced into foods during several steps along the production chain. In this context, microbial biofilms stand out as sources of contamination of food and processing surfaces. These biofilms form communities resistant to conventional chemical sanitizers. Thus, the demand for new alternatives for surface decontamination is evident, giving rise to interest in the application of cold plasma. This review aimed a systematic work of the literature on the use of cold plasma, using the Science Direct database, with the keywords cold plasma and biofilms. The selected articles were analyzed in Vosviewer software. After interpreting density maps, it was noticed that

the most published topics related to cold plasma were food safety, food preservation and plasma. It was found that the cold plasma is a new approach, for which promising results have been observed for the microbiological safety of foods, being a viable alternative for decontamination of surfaces and foods, as well as for the reduction of microbial adhesion and formation of biofilms on food and processing surfaces. However, further studies are needed for validation and industrial commercialization and on its effects on sensory characteristics of foods subjected to this treatment.

Keywords: Food; Foodborne diseases; Bacterial adhesion; Biofilms; Microbiological safety; Atmospheric cold plasma.

Resumen

Uno de los mayores desafíos para la industria alimentaria es ofrecer productos microbiológicamente seguros y nutritivos a los consumidores. Las enfermedades transmitidas por alimentos son consideradas un problema de salud pública recurrente, además de causar impactos económicos para las industrias. Las bacterias patógenas pueden introducirse en los alimentos durante varios pasos a lo largo de la cadena de producción. En este contexto, las biopelículas microbianas se destacan como fuentes de contaminación de alimentos y superficies de procesamiento. Estas biopelículas forman comunidades resistentes a los desinfectantes químicos convencionales. Así, se hace evidente la demanda de nuevas alternativas para la descontaminación de superficies, despertando el interés por la aplicación del plasma frío. Esta revisión tuvo como objetivo un estudio sistemático de la literatura sobre el uso de plasma frío, utilizando la base de datos *Science Direct*, con las palabras clave *cold plasma* y *biofilms*. Los artículos seleccionados fueron enviados para su análisis en el *software Vosviewer*. Después de interpretar los mapas de densidad obtenidos, se observó que los temas más estudiados relacionados con el plasma frío fueron la seguridad alimentaria, la conservación de alimentos y el plasma. Se encontró que la tecnología de plasma frío es un nuevo enfoque, para el cual se han observado resultados promisorios para la seguridad microbiológica de los alimentos, siendo una alternativa viable para la descontaminación de superficies y alimentos, así como para la reducción de la adhesión microbiana y formación de biopelículas en alimentos y superficies de procesamiento. Sin embargo, se necesitan más estudios para su validación y comercialización industrial y sobre sus efectos en las características sensoriales de los alimentos sometidos a este tratamiento.

Palabras clave: Alimentación; Enfermedades transmitidas por los alimentos; Adhesión bacteriana; Biofilm; Seguridad microbiológica; Plasma frío atmosférico.

1. Introdução

À medida que a população global cresce, a demanda e consumo de alimentos aumentam proporcionalmente (DeFlorio et al., 2021). Um dos maiores desafios da atualidade é garantir a disponibilidade de alimentos microbiologicamente seguros e nutritivos suficientes para uma população em crescimento (Katsigiannis et al., 2021).

Ao longo da cadeia de produção de um alimento, agentes biológicos, representados por bactérias, vírus, fungos e protozoários, podem ser introduzidos nos alimentos em diferentes etapas: (1) na produção primária (na fazenda, onde os alimentos são cultivados ou os animais são criados para alimentação); (2) durante a colheita de produtos de origem vegetal e abate de e animais, (3) durante o transporte; (4) o processamento de alimentos; (5) armazenamento; (6) distribuição; (7) durante o preparo e consumo final (Bintsis, 2018).

Surtos de doenças transmitidas por alimentos (DTA), causadas principalmente por bactérias patogênicas, tem sido preocupação pública frequente (Lu et al., 2018), como destacado pela Organização Mundial da Saúde. Dentre todas as causas de morbimortalidade, as doenças transmitidas por alimentos ainda ocupam posição importante, especialmente entre países em desenvolvimento, resultando em perdas socioeconômicas substanciais (Devleeschauwer et al., 2018).

Estima-se que, anualmente, as DTAs sejam responsáveis por 600 milhões de casos e 420.000 mortes no mundo (WHO, 2020). Segundo o Boletim Epidemiológico (2020) da Secretaria de Vigilância em Saúde do Ministério da Saúde, entre os anos de 2016 a 2019 houve uma média de 626 ($\pm 87,2$) surtos por ano no período analisado, que acometeram um total de 37.247 pessoas (média de 9.312 casos/ano). Foram registrados 38 óbitos em 26 surtos, dos quais 23,1% tiveram os agentes etiológicos identificados como sendo *E. coli EHEC*, *S. aureus*, *T. cruzi* e *Salmonella*.

Muitos patógenos bacterianos veiculados por alimentos são capazes de formar comunidades complexas, denominadas biofilmes, em diferentes substratos comuns à indústria de alimentos, como aço inoxidável, polietileno, madeira, vidro, polipropileno, borracha, além da própria superfície do alimento (Abdallah et al., 2015; Colagiorgi et al., 2017). Nos últimos 30 anos, esses biofilmes tornaram-se grande preocupação em microbiologia ambiental e de alimentos (Carrascosa, 2021). As

superfícies de contato com alimentos contaminadas por bactérias patogênicas foram reconhecidas como um dos fatores mais significativos associados a doenças transmitidas por alimentos (Aviat et al., 2020; Laughman, 2018; USDA, 2016). De acordo com o National Institute of Health (NIH) e o Center for Disease Control (CDC), os biofilmes estão envolvidos em mais de 65% das doenças transmitidas por alimentos (Zhu et al., 2020).

Um grande desafio enfrentado pelas indústrias de alimentos é que os procedimentos de higienização comumente aplicados para eliminar patógenos são pouco eficientes na remoção de biofilmes (Skowron et al., 2018). Sendo assim, novas tecnologias vêm sendo propostas visando o controle e remoção de comunidades microbianas estruturadas em biofilmes (Mir; Shah; Mir, 2016), com destaque para o estudo dos processos de aquecimento dielétrico (radiofrequência e aquecimento de micro-ondas), aquecimento ôhmico, infravermelho (IR), processamento de alta pressão (HPP), campo elétrico pulsado (PEF), ultrassom, alta pressão hidrostática, luz pulsada (PL), processamento de ozônio e plasma frio (CP) (Mandal et al., 2018).

O plasma frio atmosférico destaca-se como uma tecnologia não térmica emergente e promissora, que tem se tornado uma alternativa viável para garantir a segurança microbiológica dos alimentos. Segundo Liao et al. (2017), a inativação microbiana nos alimentos por meio do uso de plasma frio tem sido eficaz, com perdas nutricionais pouco significativas. Além disso, é de baixo custo, ecologicamente correto e não requer consumíveis, permitindo ampliação e adaptação para atender às necessidades industriais (Katsigiannis et al., 2021).

Nessa perspectiva, o presente trabalho objetivou realizar um estudo sistemático da literatura sobre o uso de plasma frio para preservação de alimentos e descontaminação de superfícies, utilizando o *software VOSviewer*.

2. Metodologia

A pesquisa bibliométrica é desenvolvida a partir das informações obtidas de grandes bases de dados, por meio de indicadores que permitem realizar uma análise quantitativa dos dados (Soares, Picoli, & Casagrande, 2018). Neste estudo, primeiramente, foi realizada a pesquisa sistemática na base *Science Direct*, utilizando os termos *cold plasma* e *biofilms*. A partir dos resultados, utilizou-se a análise cientométrica do software *Vosviewer* para identificar o vínculo entre as palavras-chave que compõem os artigos dessa base. Foram encontrados 74 arquivos, a partir dos quais foram selecionados 44 artigos de revisão e de pesquisa, publicados nos últimos 10 anos. A partir disso, foi realizada uma análise cientométrica no Software *VOSviewer*, em que estes artigos foram exportados no formato *.ris*, e delimitados por títulos, palavras-chave e resumos. O software disponibilizou a criação de mapas de densidade, os quais abordaram as palavras-chave mais citadas (Quadro 1).

Quadro 1 - Termos de guia para a pesquisa e resultados.

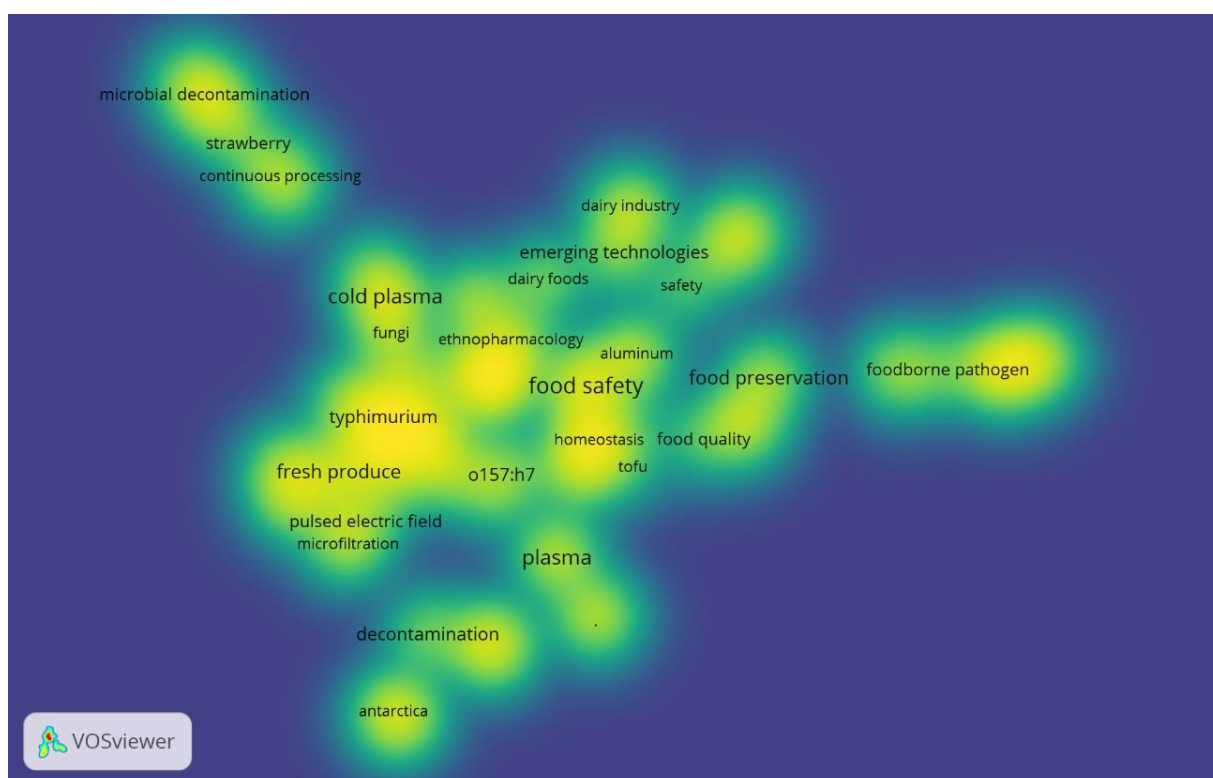
Realizada em:	25 de junho de 2021
Termos de pesquisa:	<i>Cold plasma e biofilms</i>
Período:	2010 até 2021
Campos de Pesquisa:	Títulos, palavras-chave e resumo
Tipo de Publicação:	Artigos de revisão e pesquisa
Nível de Publicação:	Sem restrições
Periódicos:	base <i>Science Direct</i>
Idiomas:	Sem restrições

Fonte: Dos autores (2021).

3. Resultados e Discussão

A pesquisa retornou 44 artigos e com base nisso, o *Software VOSviewer* elaborou um mapa de densidade indicando as palavras-chave mais citadas nos artigos e com maior representatividade para o estudo, e que tiveram relação com as palavras-chave usadas para realizar a pesquisa. A partir de uma análise visual do mapa de densidade obtido, destacaram-se como as palavras-chave de maior relevância: segurança de alimentos, e plasma. Desta forma, a discussão dessa tecnologia emergente, baseou-se, principalmente, na aplicação do plasma para descontaminação de superfícies de alimentos e de processamento de alimentos. A Figura 1 mostra o mapa de densidade dos 44 artigos pesquisados.

Figura 1 - Mapa de densidade de palavras-chaves.



Fonte: Elaborado pelos autores por meio do *Software VOSviewer* (2021).

3.1 Conceito e mecanismo de ação do plasma frio

Em 1928, o físico americano Irving Langmuir (1928) introduziu o termo “plasma” como sendo um gás ionizado e parcialmente neutro, em uma região que contém cargas balanceadas de íons e elétrons (Pankaj et al., 2017). Na última década, o plasma frio (*cold plasma* - CP) despertou interesse significativo para uso como tecnologia não térmica para processamento de alimentos, além de ser uma alternativa econômica, versátil e ecologicamente correta (Aguiar et al., 2021).

O CP envolve o uso da ionização parcial ou total do gás, com íons carregados positivamente e/ou negativamente, átomos, elétrons, moléculas excitadas, radicais livres, fótons e outras espécies reativas (RS), os quais inativam os microrganismos e esporos, garantindo a qualidade microbiológica dos alimentos (Misra et al., 2019; Pasquali et al., 2016). Os gases ionizados são oxigênio, nitrogênio, ou uma mistura de gases nobres, como neônio (Ne), argônio (Ar) ou hélio (He) (Bahrami et al., 2020).

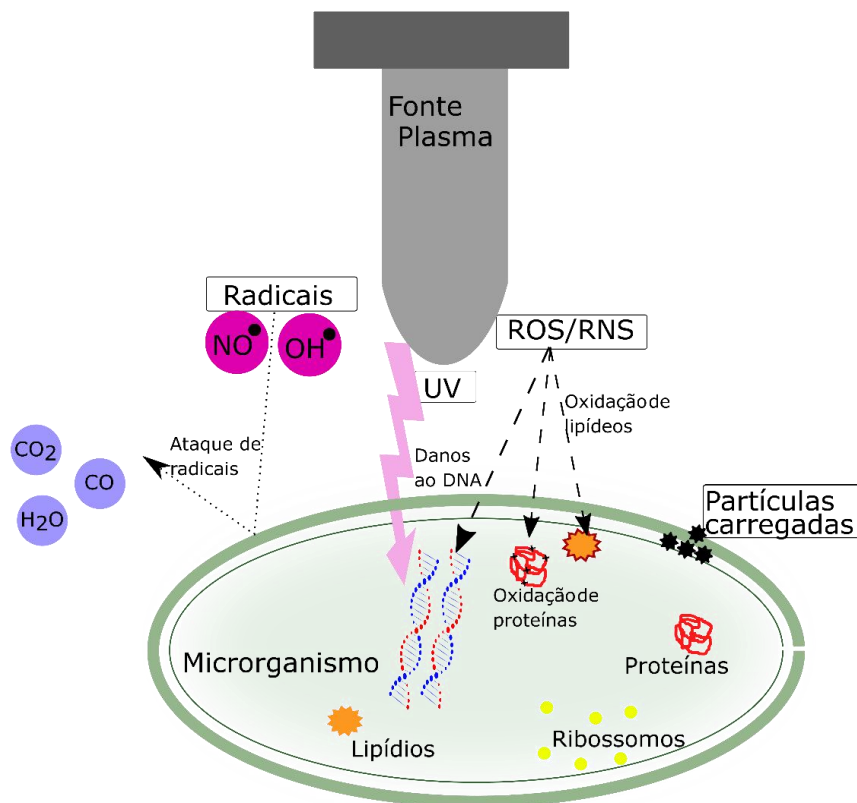
Devido a ionização ocorrida, o CP é um método que possui grande eficácia na inativação de células microbianas, esporos e vírus, em superfícies, embalagens, equipamentos de processamentos e alimentos líquidos/sólidos (Karam et al., 2016; Min et al., 2016; Patange et al., 2018).

De acordo com Scholtz et al. (2015), existem vários tipos de descarga elétrica para geração de plasma não térmico, como: descarga corona, jato de plasma, descarga de micro-ondas e a descarga de barreira dielétrica (DBD), sendo esta última a mais empregada. A DBD é gerada por uma corrente alternada, emitida devido à separação de dois eletrodos de metal, utilizando material isolante como plástico, quartzo ou cerâmica. O gás entre os eletrodos passa a ser ionizado, após ser aplicada uma alta voltagem, e, desta forma, os elétrons formados reagem com a molécula de gás produzindo íons, espécies químicas ativas, radiação UV e calor (Schluter, 2014).

Durante a aplicação do plasma são geradas espécies reativas de oxigênio (ROS), como radical hidroxil (OH), oxigênio atômico (O), peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e ozônio (O₃), além de espécies reativas de nitrogênio (RNS) (Chen et al., 2019, Scholtz, 2015). Segundo Xu et al. (2017), os ROS são capazes de danificar o DNA bacteriano, além de promover a peroxidação lipídica e a desnaturação de proteínas, o que leva à destruição das células alvo.

Para Misra et al. (2011), o modo de ação do CP acontece de diferentes formas, podendo variar com o tipo de microrganismo, e se mostra eficaz na descontaminação de células vegetativas de bactérias Gram-positivas e Gram-negativas, leveduras, fungos filamentosos, vírus e endósporos bacterianos. A Figura 2 apresenta o mecanismo de ação do plasma.

Figura 2 - Mecanismo de ação do plasma frio sobre os microrganismos.



ROS - espécies reativas de oxigênio; RNS – espécies reativas de nitrogênio; UV – Ultravioleta. Fonte: Dos autores (2021).

Adicionalmente, o CP pode ser capaz de desestruturar a parede celular bacteriana ou agir em componentes intracelulares (Han et al., 2016; Liao et al., 2017; Mai-Prochnow et al., 2016). Nesse sentido, a oxidação dos lipídios da membrana afeta a regulação do transporte de massa para dentro e para fora da célula (Laroussi & Leipold, 2004). Além disso, a membrana celular pode sofrer ruptura devido ao acúmulo de partículas carregadas na sua superfície externa, as quais superam as forças de tração da membrana, associado ao fato de que os componentes reativos podem ser adsorvidos na superfície e formar compostos voláteis e provocar aberturas e lesões na membrana (Hertwig et al. 2018).

3.2 Aplicações do plasma frio na indústria de alimentos

Em indústrias de alimentos, a tecnologia de plasma frio tem sido utilizada na descontaminação microbiológica (Pasquali et al., 2016; Xu et al., 2017), inativação de enzimas (Misra et al., 2016; Tappi et al., 2016), remoção de toxinas (Devi et al., 2017; Misra et al., 2019; Shi et al., 2017), modificações de embalagens de alimentos (Oh et al., 2016) e remoção de pesticidas residuais (Sarangapani et al., 2016; Sarangapani et al., 2017). Particularmente para a descontaminação de alimentos, o CP demonstrou ser eficaz contra importantes microrganismos patogênicos veiculados por alimentos, como *Escherichia coli* (Liao et al., 2017), *Staphylococcus aureus* (Han et al., 2016), *Salmonella enterica* (Xu et al., 2017) e *Listeria monocytogenes* (Pasquali et al., 2016).

Pignata et al. (2017) relataram que o tratamento de CP é uma tecnologia utilizada para diminuir a carga microbiana de produtos frescos. No caso de vegetais acondicionados, os alimentos são colocados em embalagens plásticas lacradas, as quais recebem o tratamento de descontaminação por plasma de barreira dielétrica, prevenindo assim uma possível contaminação pós-processamento (Li e Farid, 2016).

Os biofilmes microbianos e as bactérias internalizadas nos tecidos vegetais podem reduzir a eficácia de métodos tradicionais de descontaminação. Ziuzina et al. (2015) investigaram a eficácia do CP na inativação de *Salmonella typhimurium*, *Listeria monocytogenes* e *Escherichia coli* nas formas planctônicas, em biofilmes formados em alface e internalizadas no tecido da alface. O tratamento CP por 30 segundos reduziu populações planctônicas de *Salmonella*, *Listeria* e *E. coli* a níveis indetectáveis. Dependendo das condições de armazenamento, tipo bacteriano e idade do biofilme, os autores observaram que 300 segundos de tratamento com plasma resultaram na redução das populações de biofilme em alface, para no máximo $5 \log \text{UFC} \cdot \text{amostra}^{-1}$. O estudo revelou que a presença de matéria orgânica na suspensão bacteriana apresenta um efeito protetor contra a ação das ROS nas células bacterianas. Os autores demonstraram também que o CP de alta voltagem sobre a embalagem poderia ser uma tecnologia eficaz para superar as dificuldades de eliminação de microrganismos associados aos produtos alimentares. Assim, a existência de biofilmes e bactérias internalizadas deve ser considerada para uma maior otimização dos parâmetros de tratamento CP.

A atividade antimicrobiana de CP contra células planctônicas, biofilmes de *Escherichia coli*, *Salmonella enterica*, *Listeria monocytogenes*, *Pseudomonas fluorescens* e biofilme de cultura mista de *Listeria monocytogenes* e *Pseudomonas fluorescens*, foi avaliada por Patange et al. (2019). Segundo os autores, os microrganismos mostraram susceptibilidade variável ao tratamento CP, dependendo dos fatores do processo. As populações de biofilmes bacterianos formados por uma única espécie ou por culturas mistas foram significativamente reduzidas ($p < 0,05$) quando tratadas por 60 segundos com alta voltagem (80 kV), chegando a níveis não detectáveis após extensão do tempo de tratamento para 120 segundos. Para redução significativa ($p < 0,05$) do biofilme de cultura mista de *L. monocytogenes* e *P. fluorescens* inoculados em alface, foi necessário tratamento de 120 segundos com CP (redução de 2,2 e 4,2 $\log \text{UFC} \cdot \text{mL}^{-1}$, respectivamente). Biofilmes cultivados a 4 °C em alface mostraram maior resistência ao tratamento CP quando comparados aos biofilmes cultivados em condições de abuso de temperatura de 15 °C. Os resultados reforçam que a forma bacteriana, o tipo de biofilme (mono *versus* misto), bem como as condições de estresse ambiental, desempenham um papel importante na eficácia da atividade antimicrobiana do CP.

Handorf et al. (2020) avaliaram a capacidade antimicrobiana de água tratada com plasma sobre a viabilidade e formação de biofilme por *Listeria monocytogenes*. Após tratamento da água deionizada com plasma de micro-ondas durante 100, 300 e 900 segundos (tempo de pré-tratamento), os biofilmes bacterianos foram expostos durante 1, 3 e 5 min (tempo de pós-tratamento) para cada tempo de pré-tratamento, separadamente. Os autores observaram que a população microbiana foi reduzida em $4,7 \pm 0,29 \log \text{UFC} \cdot \text{mL}^{-1}$ de água, a atividade metabólica diminuiu em $47,9 \pm 9,47 \%$ e a vitalidade celular em $69,5 \pm 2,1\%$, em comparação com os biofilmes não tratados. Os autores apontam um impacto antimicrobiano promissor da

água tratada com plasma sobre *Listeria monocytogenes*, o que pode levar a aplicações mais específicas de descontaminação por plasma na indústria de alimentos.

Com relação aos biofilmes, vale ressaltar que quando presentes em superfícies, os micro-organismos aderidos podem causar a contaminação cruzada dos alimentos, levando a mudanças na dinâmica das etapas de limpeza e sanitização dos equipamentos, o que representa um grande desafio para as indústrias alimentícias. Para evitar a formação de biofilmes, a fixação reversível e irreversível dos micro-organismos, é necessária a utilização de um sanitizante forte (Carracosa, et al., 2021). Assim, o plasma apresenta potencial para ser implementado com efeito antimicrobiano na indústria de alimentos e ser uma alternativa ao uso do cloro inorgânico, o qual representa a classe de sanitizantes mais comumente utilizados (Shah e Muriana, 2021). Sanitizantes clorados também podem levar à resistência bacteriana e adaptação a produtos à base de cloro (Yang et al., 2016).

Além disso, o hipoclorito de sódio pode ser afetado pela matéria orgânica porque o cloro livre pode reagir com matéria orgânica natural e ser convertido em cloraminas inorgânicas para gerar trihalometanos, que além de ser cancerígeno, reduz a atividade antimicrobiana contra biofilmes (Fernandes et al., 2015) e é conhecido por ser menos reativo do que o cloro livre (Caracosa, et al., 2021). Portanto, a aplicação do plasma, apresenta-se como uma alternativa ao uso de cloro, que deve ser, provavelmente, reduzido no futuro (Sha et al., 2021).

Scholtz (2015) avaliou a eficácia do tratamento com CP na inativação de fungos filamentosos, leveduras e bactérias. Para *Cladosporium sphaerospermum* e *Penicillium crustosum* em suspensão de 10^4 UFC.mL⁻¹, o plasma interagiu com as células fúngicas e houve inativação após 20-30 minutos; já o *Aspergillus oryzae*, em concentração de 10^2 UFC.mL⁻¹, foi inativado após 30 minutos de tratamento. As bactérias *Escherichia coli* e *Staphylococcus epidermidis* foram inativadas após cerca de 2-4 minutos de exposição ao CP.

Mais recentemente, Kim et al. (2021) investigaram as propriedades de redução da carga microbiana do plasma DBD em superfícies de tábuas de corte de madeira, inoculadas com *Escherichia coli* e *Vibrio parahaemolyticus*. A carga microbiana total para o cupom controle era de 5,7 log UFC·cupom⁻¹. Após o tratamento, considerando o tempo de atuação de 30 e 60 minutos, as contagens foram de 4,6 e 4,1 log UFC·cupom⁻¹ para a *E. coli* e de 4,8 e 4,4 log UFC·cupom⁻¹ para o *V. parahaemolyticus*, respectivamente.

3.3 Influência do plasma frio nas características sensoriais e nutricionais dos alimentos

Os alimentos são matrizes de multicomponentes, incluindo proteínas, lipídeos, carboidratos, água, minerais e vitaminas. Esses componentes, ao interagirem com partículas de plasma, podem afetar a eficiência do tratamento, além de influenciar na qualidade do produto final, dependendo das condições do processo (Surowsky et al., 2016).

Segundo Pankaj et al. (2018) o impacto do CP na qualidade dos alimentos é crucial para sua aceitação como uma tecnologia alternativa de processamento. Em virtude de sua natureza não térmica, o tratamento CP tem mostrado nenhum ou mínimo impacto nos atributos físicos, químicos, nutricionais e sensoriais de vários produtos.

Vale ressaltar que a química plasmática é uma ciência complexa, envolvendo numerosas espécies em reações químicas ocorrendo em diferentes escalas de tempo (Pankaj & Keener, 2017). Por exemplo, o plasma do ar envolve mais de 75 espécies químicas diferentes em quase 500 reações químicas, podendo dificultar o entendimento da interação com componentes alimentares. Contudo, as espécies reativas ao plasma são consideradas como o principal fator para todas as alterações observadas nos atributos de qualidade química dos produtos tratados (Pankaj et al., 2018).

De acordo com Segat et al. (2016), as enzimas são inativadas por reações de oxidação de peptídeos, podendo alterar sua conformação e, conseqüentemente, levar à redução da atividade enzimática. Os autores avaliaram o efeito do CP na atividade e estrutura da enzima do leite fosfatase alcalina. Foi avaliado o efeito do plasma de DBD em altas tensões (40, 50 e

60 kV), durante 15 segundos a 5 minutos sobre a fosfatase. A DBD foi capaz de inativar a enzima em poucos segundos, a máxima temperatura registrada foi de 30°C e não houve alteração no pH do produto.

Sarangapani et al. (2017) observaram a formação de produtos de oxidação secundários em matrizes modelos de gordura lática e de carnes somente quando o tratamento com plasma estendeu o tempo de 30 minutos. As mudanças foram dependentes do tempo de tratamento e da voltagem aplicada.

Kim et al. (2014) e Choi et al. (2015) não observaram efeito significativo na oxidação lipídica após o tratamento CP em carne de porco fresca e congelada e *jerky beef*. No entanto, Jayasena et al. (2015) relataram um aumento da oxidação lipídica na carne fresca de porco e de vaca após tratamento durante 10 minutos. Foi também relatado um aumento da oxidação lipídica no lombo de porco, quando este foi tratado com um gás de plasma contendo oxigênio.

Segundo Misra (2011), a possibilidade de oxidação lipídica provocada pelo uso do plasma pode limitar o uso dessa tecnologia, por impactar negativamente as características sensoriais dos alimentos, como no caso de produtos lácteos-

Quanto aos aspectos sensoriais, frutas e legumes frescos (incluindo morango, maçã, melão e tomate cereja) tratados com CP não apresentaram diferenças significativas na textura (Misra et al., 2014; Tappi et al., 2016; Ziuzina et al., 2016), embora diminuição da firmeza tenha sido reportada após o tratamento de mirtilos (Sarangapani et al., 2017; Lacombe et al., 2015).

4. Considerações Finais

A tecnologia não térmica, de plasma frio atmosférico, tem se apresentado promissora para redução significativa de microrganismos patogênicos e deteriorantes em alimentos e superfícies, além de se mostrar uma técnica totalmente segura. Os sistemas de plasma ainda não estão disponíveis comercialmente como uma ferramenta de sanitização na indústria de alimentos, sendo necessários estudos complementares para validação e comercialização industrial. O CP apresenta potencial para reduzir a adesão de células planctônicas e a formação de biofilmes em superfícies de alimentos ou de contato alimentar.

Os resultados de estudos publicados mostram que a maior vantagem que o CP pode oferecer para as indústrias de alimentos baseia-se na eficiência para inativação microbiana de células vegetativas, tanto na forma livre como aderidas em biofilmes. Em relação aos aspectos sensoriais, como sabor e aroma, o impacto do uso de CP depende do alimento e das condições do tratamento aplicado, sendo necessários mais estudos para a otimização das condições do processo.

Pesquisas futuras devem analisar a eficácia do uso do plasma a frio em escala industrial em diferentes superfícies de processamento e a condição de aplicação para otimizar a destruição e remoção dos microrganismos. Além disso, é necessário avaliar o comportamento das espécies reativas do plasma com alimentos e as reações possíveis de ocorrer. Por último, investigar os impactos nas características sensoriais e nutricionais dos alimentos tratados com essa tecnologia.

Referências

- Abdallah, M., Khelissa, O., Ibrahim, A., Benouel, C., Heliot, L., Dhulster, P., et al. (2015). Impact of growth temperature and surface type on the resistance of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* biofilms to disinfectants. *Int. J. Food Microbiol.* 214, 38–47. [10.1016/j.ijfoodmicro.2015.07.022](https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2015.07.022)
- Aguiar, M. M., Almeida, G. M. de, Camargo Filho, W. L. de, Rosário, D. K. A. do, Araújo, L. A., & Naves, E. A. A. (2021). Alta pressão hidrostática, campos elétricos pulsados e plasma frio na cadeia produtiva de alimentos: Princípios e aplicabilidade industrial. *Research, Society and Development*, 10(2), e50310212670. [10.33448/rsd-v10i2.12670](https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12670)
- Aviat, F., Le, I., Federighi, M., & Montibus, M. (2020). Comparative study of microbiological transfer from four materials used in direct contact with apples. *International Journal of Food Microbiology*, 333, 108780. doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108780
- Bahrami, A., Baboli, Z. M., Schimmel, K., Jafari, S. M., Williams, L. (2020). Eficiência de novas tecnologias de processamento para o controle de *Listeria monocytogenes* em produtos alimentícios. *Tendências em Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 96, 61-78. doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.009
- Bintsis, T. (2018). Microbial pollution and food safety. *AIMS Microbiology*, 4(3), 377–396. [10.3934/microbiol.2018.3.377](https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.3.377)

Boletim Epidemiológico 32. Secretaria de Vigilância em Saúde. Ministério da Saúde. Informe sobre surtos notificados de doenças transmitidas por água e alimentos – Brasil, 2016-2019. v. 51, 2020.

Carrascosa, C., Raheem, D., Ramos, F., Saraiva, A., & Raposo, A. (2021). Microbial Biofilms in the Food Industry—A Comprehensive Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(4), 2014. 10.3390/ijerph18042014

Chen, Y.-Q., Cheng, J.-H., & Sun, D.-W. (2019). Chemical, physical and physiological quality attributes of fruit and vegetables induced by cold plasma treatment: Mechanisms and application advances. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(16), 2676–2690. 10.1080/10408398.2019.1654429

Choi, S., Puligundla, P., & Mok, C. (2015). Corona discharge plasma jet for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* on inoculated pork and its impact on meat quality attributes. *Annals of Microbiology*, 66(2), 685–694. 10.1007/s13213-015-1147-5

Colagiorgi, A., Bruini, I., Di Ciccio, P. A., Zanardi, E., Ghidini, S., and Ianieri, A. (2017). *Listeria monocytogenes* biofilms in the wonderland of food industry. *Pathogens* 6:E41. 10.3390/pathogens6030041

DeFlorio, W., Liu, S., White, A. R., Taylor, T. M., Cisneros-Zevallos, L., Min, Y., & Scholar, E. M. A. (2021). Recent developments in antimicrobial and antifouling coatings to reduce or prevent contamination and cross-contamination of food contact surfaces by bacteria. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(3), 3093–3134. 10.1111/1541-4337.12750

Devi, Y., Thirumdas, R., Sarangapani, C., Deshmukh, R. R., & Annapure, U. S. (2017). Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts. *Food Control*, 77, 187-191. 10.1016/j.foodcont.2017.02.019

Devleesschauwer, B., Haagsma, J. A., Mangen, M.-J. J., Lake, R. J., & Havelaar, A. H. (2018). The Global Burden of Foodborne Disease. *Food Safety Economics*, 107–122. 10.1007/978-3-319-92138-9_7

Fernandes, M. da S., Fujimoto, G., de Souza, L. P., Kabuki, D. Y., da Silva, M. J., & Kuaye, A. Y. (2015). Dissemination of *Enterococcus faecalis* and *Enterococcus faecium* a Ricotta Processing Plant and Evaluation of Pathogenic and Antibiotic Resistance Profiles. *Journal of Food Science*, 80(4), M765–M775. 10.1111/1750-3841.12824

Hertwig, C., Meneses, N., & Mathys, A. (2018). Cold atmospheric pressure plasma and low energy electron beam as alternative nonthermal decontamination technologies for dry food surfaces: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 77, 131–142. 10.1016/j.tifs.2018.05.011

Jayasena, D. D., Kim, H. J., Yong, H. I., Park, S., Kim, K., Choe, W., & Jo, C. (2015). Flexible thin-layer dielectric barrier discharge plasma treatment of pork butt and beef loin: Effects on pathogen inactivation and meat-quality attributes. *Food Microbiology*, 46, 51–57. 10.1016/j.fm.2014.07.009

Han, L., Patil, S., Boehm, D., Milosavljević, V., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2016). Mechanisms of Inactivation by High-Voltage Atmospheric Cold Plasma Differ for *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Applied and Environmental Microbiology*, 82(2), 450–458. 10.1128/aem.02660-15

Handorf, O., Pauker, V. I., Weihe, T., Schnabel, U., Freund, E., Bekeschus, S., Ehlbeck, J. (2020). Plasma-treated water affects *Listeria monocytogenes* vitality and biofilm formation. 10.21203/rs.3.rs-31328/v1

Karam, L., Casetta, M., Chihib, N. E., Bentiss, F., Maschke, U., & Jama, C. (2016). Optimization of cold nitrogen plasma surface modification process for setting up antimicrobial low density polyethylene films. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 64, 299–305. 10.1016/j.jtice.2016.04.018

Katsigiannis, A. S., Bayliss, D. L., & Walsh, J. L. (2021). Cold plasma decontamination of stainless steel food processing surfaces assessed using an industrial disinfection protocol. *Food Control*, 121, 107543. ISSN 0956-7135. doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107543.

Kim, J.-S., Lee, E.-J., Choi, E. H., & Kim, Y.-J. (2014). Inactivation of *Staphylococcus aureus* on the beef jerky by radio-frequency atmospheric pressure plasma discharge treatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 22, 124–130. 10.1016/j.ifset.2013.12.012

Kim, J. Y., Song, M. G., Jeon, E. B., Kim, J. S., Lee, J. S., Choi, E. H., ... Park, S. Y. (2021). Antibacterial effects of non-thermal dielectric barrier discharge plasma against *Escherichia coli* and *Vibrio parahaemolyticus* on the surface of wooden chopping board. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 73, 102784. 10.1016/j.ifset.2021.102784

Lacombe, A., Niemira, B. A., Gurtler, J. B., Fan, X., Sites, J., Boyd, G., & Chen, H. (2015). Atmospheric cold plasma inactivation of aerobic microorganisms on blueberries and effects on quality attributes. *Food Microbiology*, 46, 479–484. 10.1016/j.fm.2014.09.010

Laroussi, M., & Leipold, F. (2004). Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure. *International Journal of Mass Spectrometry*, 233(1-3), 81–86. 10.1016/j.ijms.2003.11.016

Li, X., & Farid, M. (2016). A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies. *Journal of Food Engineering*, 182, 33–45. 10.1016/j.jfoodeng.2016.02.026

Liao, X., Liu, D., Xiang, Q., Ahn, J., Chen, S., Ye, X., & Ding, T. (2017). Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review. *Food Control*, 75, 83–91. 10.1016/j.foodcont.2016.12.021

Mai-Prochnow, A., Clauson, M., Hong, J., & Murphy, A. B. (2016). Gram positive and Gram negative bacteria differ in their sensitivity to cold plasma. *Scientific Reports*, 6(1). 10.1038/srep38610

Mandal, R., Singh, A., & Pratap Singh, A. (2018). Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 80, 93–103. 10.1016/j.tifs.2018.07.014

Min, S. C., Roh, S. H., Niemira, B. A., Sites, J. E., Boyd, G., & Lacombe, A. (2016). Dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma inhibits *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella*, *Listeria monocytogenes*, and Tulane virus in Romaine lettuce. *International Journal of Food Microbiology*, 237, 114–120. 10.1016/j.ijfoodmicro.2016.08.025

- Misra, N. N., Moiseev, T., Patil, S., Pankaj, S. K., Bourke, P., Mosnier, J. P., Cullen, P. J. (2014). Cold Plasma in Modified Atmospheres for Post-harvest Treatment of Strawberries. *Food and Bioprocess Technology*, 7(10), 3045–3054. 10.1007/s11947-014-1356-0
- Misra, N. N., Pankaj, S. K., Segat, A., & Ishikawa, K. (2016). Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. *Trends in Food Science and Technology*, 55, 39-47. 10.1016/j.tifs.2016.07.001
- Misra, N. N., Tiwari, B. K., Raghavarao, K. S. M. S., & Cullen, P. J. (2011). Nonthermal Plasma Inactivation of Food-Borne Pathogens. *Food Engineering Reviews*, 3(3-4), 159–170. 10.1007/s12393-011-9041-9
- Misra, N. N., Yafav, B., Roopesh, M. S., & Jo, C. (2019). Cold Plasma for Effective Fungal and Mycotoxin Control in Foods: Mechanisms, Inactivation Effects, and Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(1), 106-120. 10.1111/1541-4337.12398
- Oh, Y. A., Roh, S. H., & Min, S. C. (2016). Cold plasma treatments for improvement of the applicability of defatted soybean meal-based edible film in food packaging. *Food Hydrocolloids*, 58, 150-159. 10.1016/j.foodhyd.2016.02.022
- Pankaj, S. K., & Keener, K. M. (2017). Cold Plasma Applications in Food Packaging. *Reference Module in Food Science*. 10.1016/b978-0-08-100596-5.21417-0
- Pankaj, S., Wan, Z. & Keener, K., (2018). Effects of Cold Plasma on Food Quality: A Review. *Foods*, 7(1). doi.org/10.3390/foods7010004.
- Pasquali, F., Stratakos, A. C., Koidis, A., Berardinelli, A., Cevoli, C., Ragni, L., Mancusi, R., Manfreda, G., & Trevisani, M. (2016). Atmospheric cold plasma process for vegetable leaf decontamination: A feasibility study on radicchio (red chicory, *Cichorium intybus* L.). *Food Control*, 60, 552-559. 10.1016/j.foodcont.2015.08.043
- Patange, A., Boehm, D., Giltrap, M., Lu, P., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2018). Assessment of the disinfection capacity and eco-toxicological impact of atmospheric cold plasma for treatment of food industry effluents. *Science of The Total Environment*, 631-632, 298–307. 10.1016/j.scitotenv.2018.02.269
- Patange, A., Boehm, D., Ziuzina, D., Cullen, P. J., Gilmore, B., & Bourke, P. (2019). High voltage atmospheric cold air plasma control of bacterial biofilms on fresh produce. *International Journal of Food Microbiology*, 293, 137–145. 10.1016/j.ijfoodmicro.2019.01.005
- Pignata, C., D'Angelo, D., Fea, E., & Gilli, G. (2017). A review on microbiological decontamination of fresh produce with nonthermal plasma. *Journal of Applied Microbiology*, 122(6), 1438–1455. 10.1111/jam.13412
- Sarangapani, C., Misra, N. N., Milosavljevic, V., Bourke, P., O'Regan, F., & Cullen, P. J. (2016). Pesticide degradation in water using atmospheric air cold plasma. *Journal of Water Process Engineering*, 9, 225-232. 10.1016/j.jwpe.2016.01.003
- Sarangapani, C., O'Toole, G., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2017). Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 44, 235-241. 10.1016/j.ifset.2017.02.012.
- Sarangapani, C., Ryan Keogh, D., Dunne, J., Bourke, P., & Cullen, P. J. (2017). Characterisation of cold plasma treated beef and dairy lipids using spectroscopic and chromatographic methods. *Food Chemistry*, 235, 324–333. 10.1016/j.foodchem.2017.05.016
- Scholtz, V., Pazlarova, J., Souskova, H., Khun, J., & Julak, J. (2015). Nonthermal plasma — A tool for decontamination and disinfection. *Biotechnology Advances*, 33(6), 1108–1119. 10.1016/j.biotechadv.2015.01.002
- Segat, A., Misra, N. N., Cullen, P. J., & Innocente, N. (2016). Effect of atmospheric pressure cold plasma (ACP) on activity and structure of alkaline phosphatase. *Food and Bioproducts Processing*, 98, 181–188. 10.1016/j.fbp.2016.01.010
- Shah, K., & Muriana, P. M. (2021). Efficacy of a Next Generation Quaternary Ammonium Chloride Sanitizer on *Staphylococcus* and *Pseudomonas* Biofilms and Practical Application in a Food Processing Environment. *Applied Microbiology*, 1(1), 89–103. 10.3390/aplmicrobiol1010008
- Shi, H., Heleji, K., Stroshine, R. L., Keener, K., & Jensen, J. L. (2017). Reduction of Aflatoxin in Corn by High Voltage Atmospheric Cold Plasma. *Food Bioprocess Technol*, 10, 1042-1052. 10.1007/s11947-017-1873-8
- Skowron, K., Hulisz, K., Gryń, G., Olszewska, H., Wiktorczyk, N., & Paluszak, Z. (2018). Comparison of selected disinfectants efficiency against *Listeria monocytogenes* biofilm formed on various surfaces. *International Microbiology*, 21(1-2), 23–33. 10.1007/s10123-018-0002-5
- Soares, S. V., Picolli, I. R. A., & Casagrande, J. (2018). Pesquisa Bibliográfica. Pesquisa Bibliométrica, Artigo de Revisão e Ensaio Teórico em Administração e Contabilidade. *Administração: Ensino e Pesquisa*, 19(2), 308-339. 10.13058/raep.2018.v19n2.970
- Surowsky, B., Bußler, S., & Schlüter, O. K. (2016). Cold Plasma Interactions With Food Constituents in Liquid and Solid Food Matrices. *Cold Plasma in Food and Agriculture*, 179–203. 10.1016/b978-0-12-801365-6.00007-x
- Tappi, S., Gozzi, G., Vannini, L., Berardinelli, A., Romani, S., Ragni, L., & Rocculi, P. (2016). Cold plasma treatment for fresh-cut melon stabilization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 33, 225-233. 10.1016/j.ifset.2015.12.022
- USDA. (2016). Cleanliness helps prevent foodborne illness [fact sheet]. https://www.fsis.usda.gov/wps/portal/food-safety-topics/foodsafety-education/getanswers/food-safety-fact-sheets/safe-foodhandling/cleanliness-helps-prevent-foodborne-illness/ct_index
- World Health Organization - WHO. (2020). Food safety [fact sheet]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/food-safety>.
- Xu, L., Garner, A. L., Tao, B., & Keener, K. M. (2017). Microbial Inactivation and Quality Changes in Orange Juice Treated by High Voltage Atmospheric Cold Plasma. *Food Bioprocess Technol*, 10(10), 1778-1791. 10.1007/s11947-017-1947-7
- Yang, Y., Mikš-Krajnc, M., Zheng, Q., Lee, S. B., Lee, S. C., and Yuk, H. G. (2016). Biofilm formation of *Salmonella* Enteritidis under food-related environmental stress conditions and its subsequent resistance to chlorine treatment. *Food Microbiol*. 54, 98–105. 10.1016/j.fm.2015.10.010

Zhu, Y., Li, C., Cui, H., & Lin, L. (2020). Feasibility of cold plasma for the control of biofilms in food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 142–151. 10.1016/j.tifs.2020.03.001

Ziuzina, D., Han, L., Cullen, P. J., & Bourke, P. (2015). Cold plasma inactivation of internalised bacteria and biofilms for *Salmonella enterica* serovar Typhimurium, *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli*. *International Journal of Food Microbiology*, 210, 53–61. 10.1016/j.ijfoodmicro.2015.05.019

Ziuzina, D., Misra, N. N., Cullen, P. J., Keener, K., Mosnier, J. P., Vilaró, I., Bourke, P. (2016). Demonstrating the Potential of Industrial Scale In-Package Atmospheric Cold Plasma for Decontamination of Cherry Tomatoes. *Plasma Medicine*, 6(3-4), 397–412. 10.1615/plasmamed.2017019498