



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

TALITA FOGAÇA DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DOS ÍONS SÓDIO E POTÁSSIO NA  
FORMAÇÃO DE FILME DURANTE A SALGA DOS QUEIJOS  
MUSSARELA E PRATO COM APLICAÇÃO DE REDES  
NEURAIAS ARTIFICIAIS**

---

Londrina  
2022

TALITA FOGAÇA DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DOS ÍONS SÓDIO E POTÁSSIO NA  
FORMAÇÃO DE FILME DURANTE A SALGA DOS QUEIJOS  
MUSSARELA E PRATO COM APLICAÇÃO DE REDES  
NEURAS ARTIFICIAIS**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Química.

Orientador: Prof. Dr. Dionísio Borsato

Londrina  
2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

O48i Oliveira, Talita Fogaça de.  
Influência dos íons sódio e potássio na formação de filme durante a salga dos queijos mussarela e prato com aplicação de redes neurais artificiais. / Talita Fogaça de Oliveira. - Londrina, 2022.  
59 f. : il.

Orientador: Dionísio Borsato .  
Coorientador: Karina Benassi Angilelli.  
Tese (Doutorado em Química) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Química, 2022.  
Inclui bibliografia.

1. Mapas auto-organizáveis - Tese. 2. Difusão de sais - Tese. 3. Salmoura estática - Tese. 4. Salmoura dinâmica - Tese. I. Borsato , Dionísio. II. Angilelli, Karina Benassi . III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Química. IV. Título.

CDU 54

TALITA FOGAÇA DE OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DOS ÍONS SÓDIO E POTÁSSIO NA  
FORMAÇÃO DE FILME DURANTE A SALGA DOS QUEIJOS  
MUSSARELA E PRATO COM APLICAÇÃO DE REDES  
NEURAIS ARTIFICIAIS**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Química.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Orientador Dr. Dionísio Borsato  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Profa. Dra. Amélia Elena Terrile  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná -  
UTFPR

---

Profa. Dra. Marcela Corazza  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Profa. Dra. Maria Josefa dos Santos Yabe  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Prof. Dr. Rodolfo Lopes Coppo  
Instituto Federal do Paraná, Campus Ivaiporã –  
IFPR

Londrina, 12 de agosto de 2022.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr Dionísio Borsato, meu pai científico, que sempre acreditou que eu fosse capaz e nunca mediu esforços para me ajudar. Se não fosse por ele, não estaria concluindo esta etapa dos meus estudos. Nunca deixarei de agradecer!

A Ivanira Moreira que além da ajuda no laboratório, sempre esteve por perto aconselhando, sem medir esforços para tudo dar certo.

A Karina Angillelli, minha coorientadora e amiga. Muito obrigada por sempre estar pronta e disposta a me socorrer.

Aos amigos do LPAC sempre para ajudar em tudo.

Aos meus professores da Universidade, sempre serei grata, por todo aprendizado que tive durante os anos de Graduação, Mestrado e Doutorado. Em especial, a Dra. Maria Josefa, minha professora desde o primeiro ano da graduação que me ajudou, apoiou e confiou no meu potencial.

A minha família e meu namorado Leandro, pelo apoio emocional, afetivo e que sempre estiveram ao meu lado. Amo vocês!

A Deus, por ser sempre meu refúgio e minha calma nas horas mais difíceis.

## RESUMO

OLIVEIRA, Talita Fogaça de. **Influência dos íons sódio e potássio na formação de filme durante a salga dos queijos Mussarela e Prato com aplicação de redes neurais artificiais**. 2022. 58 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2022.

Uma ferramenta altamente eficiente, que tem se destacado no processamento e tratamento de dados, são as Redes Neurais Artificiais (RNAs). Os Mapas Auto-organizáveis (MAO), que são um tipo de RNA, são modelos computacionais fáceis de visualizar, que simulam o processo de informações e aquisição de conhecimento. Aplicando esta ferramenta, analisou-se o comportamento do filme formado na superfície dos queijos mussarela e prato, quando submetido a salga por imersão em sistema estático e dinâmico. Para reduzir a quantidade de NaCl nos alimentos, o KCl foi utilizado como substituto parcial em quantidades adequadas, sem causar alterações sensoriais nos queijos. A difusão de sais na salmoura é causada pela transferência de íons de sódio e potássio, induzidos pelo gradiente de concentração desses sais dentro e fora do alimento. A difusão foi modelada utilizando a segunda lei de Fick e simulada pelo método de elementos finitos. Os parâmetros utilizados na simulação foram os coeficientes principais e cruzados, número de Biot de massa e a relação entre o coeficiente de transferência de massa e a condutividade mássica ( $hm/\lambda m$ ) foram ajustados utilizando a otimização simplex super modificada acoplada às funções de desejabilidade. No queijo mussarela, o coeficiente principal de difusão do  $Na^+$  foi 1,23 vezes maior que o coeficiente de difusão principal de  $K^+$ . No queijo prato, o coeficiente principal de difusão do  $Na^+$  é 1,70 vezes maior que o coeficiente de difusão principal de  $K^+$ . Os coeficientes cruzados para o queijo mussarela e prato apresentaram valores menores do que os principais, mostrando que a difusão dos solutos em seu próprio fluxo é mais importante do que a interferência entre eles. A comparação entre os sistemas estático e dinâmico mostraram que a o processo de difusão é influenciado pelo filme formado na interface biosólido/solução, sendo minimizado com a agitação da salmoura. A aplicação de redes neurais artificiais mostrou-se uma ferramenta eficaz na avaliação da influência do filme no processo de difusão dos íons  $Na^+$  e  $K^+$  e na salga dos queijos Mussarela e Prato.

**Palavras-chave:** mapas auto-organizáveis; difusão de sais; salmoura estática; salmoura dinâmica.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Talita Fogaça de. **Influence of sodium and potassium ions on film formation during salting of Mozzarella and Prato cheese with application of artificial neural networks.** 2022. 58 p. Thesis (Postgraduate Program in Chemistry) – State University of Londrina, Londrina, 2022.

A highly efficient tool that has stood out in data processing and treatment is Artificial Neural Networks (ANNs). Self-organized maps (SOM), which is a type of ANNs, are easy-to-view computational models that simulate information processing and knowledge acquisition. Applying this tool, we analyzed the behavior of the film formed on the mozzarella and Prato cheese surface when subjected to salting by immersion in the static and agitated system. In order to reduce the amount of NaCl in the food, KCl was used as a partial substitute in adequate amounts, without causing sensory changes in the cheese. The diffusion of salts in the brine is caused by the transfer of sodium and potassium ions, induced by concentration gradient of these salts inside and outside the food. The diffusion was modeled using Fick's second law and simulated by the finite element method. The parameters used in the simulation were the main and cross diffusion coefficients, mass Biot number and the relationship between the mass transfer coefficient and the mass conductivity ( $hm / \lambda m$ ) that were adjusted using the super modified simplex method coupled to the desirability functions. In mozzarella cheese, the main diffusion coefficient of  $Na^+$  was 1.23 times greater than the main diffusion coefficient of  $K^+$ . In Prato cheese, the main diffusion coefficient of  $Na^+$  is 1.7 times greater than the main diffusion coefficient of  $K^+$ . The cross coefficients presented smaller values than the main ones, showing that the diffusion of the solutes in relation to their own flow is more important than the interference between them. The comparison between the static and dynamic systems showed that the diffusion process is influenced by the film formed at the biosolid/solution interface, being minimized with the brine agitation. The application of artificial neural networks proved to be an effective tool in the evaluation of the influence of the film on the diffusion process of  $Na^+$  and  $K^+$  ions, in the mozzarella cheese salting.

**Key words:** self-organized maps; salts diffusion; static brine; dynamic brine.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> -	Esquema para obtenção do Queijo Mussarela .....	25
<b>Figura 2</b> -	Sólido gerado automaticamente pelo software e a posições utilizadas na simulação, para o queijo Mussarela (a) e queijo Prato (b) .....	28
<b>Figura 3</b> -	Perfil de difusão de concentrações experimentais e simuladas de sal durante o experimento utilizando salmoura estática (a) e salmoura dinâmica (b). Os dados experimentais NaCl são representados por (▲) e KCl por (■), dados simulados NaCl e KCl são representados por (-) e (...).....	34
<b>Figura 4</b> -	Mapas topológicos para a difusão de Na <sup>+</sup> (a e b) e K <sup>+</sup> (c e d). Os mapas (a) e (c) representam o eixo X e (b) e (d) eixo Z. O sistema Estático está representado pela letra S e Dinâmico pela letra D.....	35
<b>Figura 5</b> -	Mapas de peso para difusão de K <sup>+</sup> na superfície do bio sólido no eixo X em sistema estático e dinâmico. ....	36
<b>Figura 6</b> -	Mapas de peso para difusão de K <sup>+</sup> na superfície bio sólido no eixo Z em sistema estático e dinâmico.....	37
<b>Figura 7</b> -	Mapas de peso para difusão de Na <sup>+</sup> na superfície do bio sólido no eixo X em sistema estático e dinâmico .....	38
<b>Figura 8</b> -	Mapas de peso para difusão de Na <sup>+</sup> na superfície do bio sólido no eixo Z em sistema estático e dinâmico.....	39
<b>Figura 9</b> -	Perfil de difusão de concentrações experimentais e simuladas de sal durante o experimento salmoura estática (a) e salmoura dinâmica (b). Os dados experimentais NaCl são representados por (▲) e KCl por (■), dados simulados NaCl e KCl são representados por (-) e (...) .....	42
<b>Figura 10</b> -	Mapas topológicos para a difusão de Na <sup>+</sup> (a e c) e K <sup>+</sup> (b e d). Os mapas (a) e (b) representam o eixo X e (c) e (d) eixo Z. O sistema Estático está representado pela letra S e Dinâmico pela letra D.....	44
<b>Figura 11</b> -	Mapa topológico da difusão de NaCl na superfície do bio sólido para o eixo X em sistema estático (S) e dinâmico (D).....	45

<b>Figura 12</b> - Mapa topológico da difusão de NaCl na superfície do biossólido para o eixo Z em sistema estático (S) e dinâmico (D).....	46
<b>Figura 13</b> - Mapa topológico a difusão de KCl na superfície do biossólido para o eixo X em sistema estático (S) e dinâmico (D).....	47
<b>Figura 14</b> - Mapa topológico da difusão de KCl na superfície do biossólido para o eixo Z em sistema estático (S) e dinâmico (D).....	48

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Coeficientes de difusão principais e cruzados, número de Biot e coeficiente de transferência de massa durante a salga salmoura estática e dinâmica para o queijo Mussarela. ....31
- Tabela 2** – Análise centesimal do queijo Mussarela antes do processo de difusão na salmoura. ....33
- Tabela 3** – Parâmetros obtidos pela otimização simplex durante os processos de difusão de cloreto de sódio e potássio em salga estática e dinâmica.....40
- Tabela 4** – Análise centesimal do queijo Prato antes do processo de difusão na salmoura. ....41

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
2.1	QUEIJO MUSSARELA.....	14
2.2	QUEIJO PRATO .....	14
2.3	SALGA.....	15
2.4	SÓDIO E POTÁSSIO.....	16
2.5	DIFUSÃO .....	17
2.6	MODELAGEM MATEMÁTICA.....	18
2.6.1	Método de Elementos Finitos (MEF) e Otimização Simplex.....	18
2.6.2	Redes Neurais Artificiais (RNA).....	20
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>24</b>
4.1	GERAL .....	24
4.2	ESPECÍFICOS .....	24
<b>5</b>	<b>PARTE EXPERIMENTAL</b> .....	<b>25</b>
5.1	OBTENÇÃO DO QUEIJO MUSSARELA .....	25
5.2	OBTENÇÃO DO QUEIJO PRATO .....	25
5.3	COMPOSIÇÃO CENTESIMAL .....	26
5.4	SALMOURA .....	26
5.5	AMOSTRAGEM E DETERMINAÇÃO DA UMIDADE.....	26
5.6	CALCINAÇÃO.....	27
5.7	PREPARO DAS SOLUÇÕES.....	27
5.8	QUANTIFICAÇÃO DOS ÍONS SÓDIO E POTÁSSIO .....	27
5.9	MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA DIFUSÃO.....	27
5.10	SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	28
5.11	TESTE ESTATÍSTICO .....	29
5.12	COEFICIENTES DE DIFUSÃO E $H_M/\Lambda_M$ .....	29
5.13	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS DO TIPO MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS .....	30

5.14	PROCESSO COMPUTACIONAL .....	30
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>31</b>
6.1	QUEIJO MUSSARELA.....	31
6.2	QUEIJO PRATO .....	40
6.3	APLICAÇÕES PRÁTICAS.....	49
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>56</b>
	ANEXO I - ARTIGO 1: APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE STUDY OF MOZZARELA CHEESE. SALTING. ..	57
	ANEXO II - ARTIGO 2: APPLICATION OF SELF-ORGANIZING MAPS TO EVALUATE THE INFLUENCE AND BEHAVIOR OF THE FILM FORMED DURING OF PRATO CHEESE .....	58

## 1 INTRODUÇÃO

Queijo é um dos alimentos mais consumidos mundialmente e a preferência entre os brasileiros são do tipo Mussarela e Prato. Uma desvantagem para aqueles que consomem muito queijo é que este alimento contribui significativamente para o consumo de sódio que, quando ingerido em excesso, pode causar hipertensão arterial, problemas renais, osteoporose, dentre outras doenças (RODRIGUES *et al.*, 2016).

Visando uma alimentação mais saudável, muitos consumidores têm optado por adquirir alimentos com teores reduzidos de sódio e devido ao grande interesse em consumir esses tipos de produtos, pesquisas estão sendo desenvolvidas no sentido de reduzir ou substituir o cloreto de sódio em alimentos mantendo suas características sensoriais inalteradas (BARAT *et al.*, 2011; BORDIN *et al.*, 2019; MONTEVERDE *et al.*, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2016). O cloreto de potássio tem se destacado como substituto parcial do cloreto de sódio, devido a propriedades semelhantes. É considerado anti-hipertensivo e apresenta ação antimicrobiana semelhante à do cloreto de sódio (BONA *et al.*, 2005; BORDIN *et al.*, 2019; BORSATO *et al.*, 2012). A substituição total do NaCl pelo KCl não é recomendada pois em concentrações acima de 30% proporciona um sabor amago ao produto final (BONA *et al.*, 2007; BORDIN *et al.*, 2019). É possível fazer esta substituição pois este sal, conforme relatado pela literatura, não altera as características sensoriais, físicas ou microbiológicas do produto. Além disso, a ingestão de potássio aumenta a excreção renal de sódio, resultando em um efeito anti-hipertensivo e apresentando também atividade antimicrobiana (BORDIN *et al.*, 2019; BORSATO *et al.*, 2012).

Para inserir os sais no queijo, é necessário realizar a salga, porque é uma etapa muito importante na fabricação deste produto. A salga consiste em imergir o alimento em salmoura, podendo ser estática ou dinâmica, na qual o sal se espalha no sólido por mecanismos de difusão mássica (ALBARRACÍN *et al.*, 2011; GUINEE, 2004). Na indústria a salga é feita em processo estático e o tempo do processo varia de acordo com o volume do queijo. Ainda no processo industrial, a salmoura contém 20% de NaCl e o processo termina quando o queijo atinge aproximadamente 2% de sal difundido (FURTADO, 1991).

Segundo Cremasco *et al.* (2019), a salga acontece quando um fluido está em contato com um sólido e conseqüentemente há formação de um filme em sua

superfície. Para haver uma transferência de massa entre a superfície e o fluido, a corrente deve passar pela camada estacionária, que atua como uma barreira resistiva, e, portanto, há um coeficiente de difusão específico que descreve a transferência de massa neste filme. A questão é que este coeficiente não pode ser determinado apenas experimentalmente, mas por métodos que utilizam dados experimentais acoplados a simulação da difusão utilizando o método de elementos finitos (MEF) associado à otimização simplex (BORSATO *et al.*, 2012). Para avaliar a influência do filme formado é necessário levar em conta a razão entre a resistência à difusividade de massa interna e externa que pode ser quantificada pelo número de massa Biot.

De acordo com Bona *et al.* (2007) e Angilelli *et al.* (2015), o aumento dos valores do número Biot indicam menor influência da barreira durante a transferência de massa, com resistência interna dominante. Durante o processo de difusão, à medida que o número de Biot diminui, há uma maior influência da camada no fluxo dos íons na interface ocorrendo, desta forma, a limitação da difusão por uma resistência externa. Assim, o número Biot está relacionado ao coeficiente do filme, uma vez que quanto maior o seu valor, menor é a influência do filme formado no processo de difusão. Quando se trata de bio-sólidos alimentares, a difusão na superfície e a formação de filmes podem depender da geometria e posição onde ocorre a difusão (CREMASCO *et al.*, 2019). O coeficiente principal, os coeficientes cruzados e a relação entre o coeficiente de transferência de massa e a condutividade mássica também são parâmetros estudados no processo de difusão e, para avaliar todos estes parâmetros ao mesmo tempo, recomenda-se utilizar a simulação multicomponente utilizando otimização simplex.

A otimização simplex é utilizada em trabalhos que apresentam muitas variáveis porque é uma ferramenta que não utiliza uma matemática muito complexa e é de fácil implementação nos processos de análise (CLEMENTE *et al.*, 2020; GALVAN *et al.*, 2020), enquanto que o MEF é uma metodologia que gera soluções numéricas a partir de equações diferenciais, simulando sistemas em condições mais realistas (CLEMENTE *et al.*, 2020).

Para entender melhor os efeitos dos parâmetros durante o processo de difusão, como os coeficientes e número de Biot, algumas ferramentas de análise de dados que utilizam estatísticas não convencionais, associadas a otimização simplex e as redes neurais artificiais do tipo mapas auto-organizáveis, podem ser utilizadas (CREMASCO *et al.*, 2016, 2019; HAYKIN, 2001). Estas ferramentas têm sido

aplicadas para resolver vários tipos de problemas em diferentes áreas da ciência, como engenharia, química, medicina, bioenergia, entre outras (BONA *et al.*, 2012; BORSATO *et al.*, 2011; CREMASCO *et al.*, 2016; LEMES; & DAL PINO, 2011; LINDSEY *et al.*, 2018; WALKOFF *et al.*, 2017). O objetivo dessa ferramenta é transformar um padrão de entrada incidente, de dimensão arbitrária, em um mapa discreto uni- ou bidimensional e realizar esta transformação adaptativamente de uma maneira topologicamente ordenada. Com a utilização desta ferramenta, o resultado pode ser observado através de um mapa topológico que tem como função facilitar a interpretação dos resultados (KOHONEN, 1995).

Sob essa perspectiva, o objetivo deste trabalho foi investigar a formação, influência e comportamento do filme durante a difusão multicomponente de NaCl e KCl, em salmoura estática e dinâmica, nos queijos Mussarela e Prato aplicando redes neurais artificiais do tipo mapas auto-organizáveis com modelagem computacional 3D utilizando o Método de elemento finito (MEF) onde as informações obtidas pelas ferramentas utilizadas podem ser de grande utilidade para a indústria queijeira.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 QUEIJO MUSSARELA

O queijo tipo Mussarela é um dos queijos mais consumidos no mundo, de origem italiana, inicialmente produzido com leite de búfala. Com o passar do tempo, foi havendo modificações em suas formulações e, atualmente, há queijos produzidos com leite de vaca ou misturas leite de vaca e búfala (PERRY, 2004). Este queijo possui alto valor nutricional e é utilizado como ingrediente para pizza, lasanhas, entre outros. No Brasil é o tipo de queijo com maior produção, correspondendo a 28,4% da produção nacional total (JANA; MANDAL, 2011; MARINHEIRO *et al.*, 2015; PAZ *et al.*, 2017).

Este tipo de queijo apresenta características e propriedades funcionais, com destaque para a filagem (COELHO *et al.*, 2012). A filagem consiste em fatiar finamente a massa do queijo, colocar no soro ou água a 80 °C e agitar, até que ocorra a formação de um bloco com consistência firme.

Pelo fato de haver uma quantidade considerável de água contida no queijo Mussarela (entre 45 - 52%) é utilizado o processo de salga utilizando o cloreto de sódio para evitar proliferação bacteriana (JANA; MANDAL, 2011). Além disso, o NaCl é considerado o principal agente determinante no controle da atividade de água em queijos, exercendo também papel crucial no controle do crescimento microbiano, alterações bioquímicas (principalmente durante a maturação) e atividades enzimáticas (GUINEE, 2004).

Os processos físico-químicos, bioquímicos e microbiológicos que ocorrem no queijo Mussarela, também podem modificar algumas características do produto como estrutura, cor, sabor, odor e consistência (SILVA; GARCIA; SANTOS, 2019). Este produto apresenta cor esbranquiçada, formato e peso variáveis, devendo ser mantido em geladeira com temperatura de até 10°C para manter suas características (PERRY, 2004).

### 2.2 QUEIJO PRATO

O queijo tipo Prato é um queijo que se popularizou no Brasil com modificações de dois queijos, um dinamarquês (Danbo) e outro holandês (Gouda).

Estes queijos são similares ao queijo Prato em relação a cor e textura, porém o queijo Prato apresenta sabor mais suave e representa cerca de 20% da produção no Brasil (NARIMATSU *et al.*, 2003; SILVA *et al.*, 2018). Este tipo de queijo é o segundo mais consumido no país, sendo muito utilizado em lanches e como ingrediente culinário pois além de apresentar um sabor suave e levemente adocicado, possui consistência macia e coloração amarelo ouro (DE RENSIS; PETENATE; & VIOTTO, 2009).

Este queijo, que apresenta textura homogênea e consistência com dureza intermediária, olhaduras pequenas, lisas e brilhantes, é produzido em todas as regiões do país e é produzido exclusivamente com leite de vaca pasteurizado. Antes de ser consumido, deve apresentar um período de maturação em torno de 45 a 60 dias (PERRY, 2004). É considerado uma fonte de elementos essenciais, como por exemplo: cálcio, fósforo, de proteínas, gorduras, vitaminas e minerais.

### 2.3 SALGA

Uma característica física importante nos queijos é a quantidade de umidade que eles possuem. De acordo com Jana e Mandal (2011) o queijo Mussarela apresenta em sua composição entre 45 e 52% de umidade, já a porcentagem de umidade contida no queijo Prato varia entre 42 e 44% (SAUER-LEAL; OKADA; PERALTA-ZAMORA, 2008). A quantidade de água presente no queijo facilita a proliferação de microrganismos e, uma das alternativas de resistência à proliferação é a inserção de quantidades significativas de sal, processo conhecido como salga. Na salga há a entrada de solutos no alimento, fazendo com que a água livre presente diminua, diminuindo também a ação de microrganismos (DE PAULA; DE CARVALHO; FURTADO, 2009; GÓMEZ-SALAZAR; CLEMENTE-POLO; SANJUÁN-PELLICCER, 2015).

Segundo Guinee (2004), um dos constituintes mais empregados na salga de queijos é o cloreto de sódio. Este sal desempenha um papel fundamental na qualidade final de um produto e apresenta importante papel no organismo humano. Ele controla impulsos nervosos além de possuir função de preservação de alimentos, promovendo mudanças químicas e nutricionais e aumentando a sua vida útil. No entanto, quando consumido em excesso, este sal pode ocasionar problemas de saúde, como aumento da pressão arterial, desmineralização dos ossos e cálculos renais (ALBARRACÍN *et al.*, 2011; HARKOUSS *et al.*, 2018; MARTELLI, 2014).

Na indústria, o tempo de salga varia de acordo com o volume ocupado pela peça de queijo e, portanto, quanto maior o tempo, maior a quantidade de sal adquirida e maior a perda de peso na salmoura. Porém, a absorção do sal não apresenta uma relação linear com o tempo de salga pois a maior parte do sal é adquirida nas primeiras horas, tornando-se cada vez mais vagarosa, pois o gradiente de concentração reduz ao longo do processo, diminuindo à medida que decorre o tempo de salga. Dessa maneira, conhecer os parâmetros que influenciam a difusão do sal no queijo permite modular o teor deste sal, sendo muito útil para a indústria queijeira (FURTADO, 1991).

## 2.4 SÓDIO E POTÁSSIO

O sódio e o potássio são os principais cátions em fluidos extracelulares e intracelulares, respectivamente. Desempenham importantes funções fisiológicas, incluindo regulação do equilíbrio de fluidos, membrana potencial e contração muscular (WHELTON; HE, 2014).

Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), as doenças não transmissíveis são o principal contribuinte para a mortalidade e morbidade das pessoas, sendo que a ingestão elevada de sódio tem sido associada a várias dessas doenças, incluído hipertensão, doença cardiovascular e acidente vascular cerebral e a diminuição da ingestão de sódio pode reduzir a pressão arterial e o risco das doenças associadas (WHO, 2012a). Dados sobre ingestão de sódio mostram que a população mundial está consumindo muito mais do que o necessário. Em muitos casos, a média de consumo é equivalente a 5g de sal por dia, sendo esta dose mais do que o dobro recomendado pois, para adultos, a recomendação diária é de 2g (HARKOUSS *et al.*, 2018).

Junto com o alto consumo de sódio, a baixa ingestão de potássio também está atrelada as doenças não transmissíveis (WHO, 2012b). Nas décadas passadas, os humanos consumiam mais alimentos ricos em potássio. No entanto, com o aumento do consumo de alimentos industrializados (que acabaram por retirar o potássio de suas receitas) além da redução do consumo de frutas e hortaliças, houve uma grande diminuição da ingestão de potássio que, na maioria dos países desenvolvidos, está em média de 70 mmol por dia sendo que a recomendação, segundo a Organização Mundial da Saúde, é que um adulto faça a ingestão de pelo menos 3,5 g por dia de

potássio (equivalente a 90 mmol). Para pacientes com hipertensão arterial, a recomendação é que seja ingerido aproximadamente 4,7 g por dia de potássio na dieta (HE; MACGREGOR, 2008; FONSECA; ZAMITH; MACHADO, 2015).

De acordo com a OMS, uma ingestão aumentada de potássio pode reduzir a pressão arterial, diminuir o risco de doenças cardiovasculares, além de reduzir a osteoporose (WHO, 2012b).

## 2.5 DIFUSÃO

Dentre algumas funções importantes nos alimentos, o sal adicionado é responsável por fornecer características sensoriais específicas, além de reduzir a atividade de água. Neste contexto, a salga consiste na imersão do sólido em salmoura estática ou dinâmica, utilizada para acelerar o processo de penetração do sal no alimento (BORSATO *et al.*, 2022; GÓMEZ-SALAZAR; CLEMENTE-POLO; SANJUÁN-PELLICCER, 2015). Alimentos industrializados, como o queijo Mussarela e Prato são submetidos ao processo de salga por imersão, no qual o sal se espalha no sólido por mecanismos de difusão de massa (ALBARRACÍN *et al.*, 2011; GUINEE, 2004).

Durante a salga ocorre a perda de água e a captação de íons de sal. Estes íons são difundidos na fase aquosa do queijo e distribuídos, com ajuda de uma rede de canais microscópicos na fase seca. A fase líquida, por sua vez, não permanece constante quando há a dissolução do sal pois as moléculas de água migram para fora do sólido causando resistência à difusão. O fenômeno da difusão de sal consiste em explicar a mudança entre a concentração de sal no interior do alimento e da solução externa da salmoura, levando a um equilíbrio através da transferência de solutos (GÓMEZ-SALAZAR; CLEMENTE-POLO; SANJUÁN-PELLICCER, 2015). A transferência de massa pode ser descrita pela equação de difusão em regime não estacionário ou 2ª Lei de Fick (BORSATO *et al.*, 2022; GÓMEZ-SALAZAR; CLEMENTE-POLO; SANJUÁN-PELLICCER, 2015; ZHANG *et al.*, 2011)).

Esta lei depende de condições iniciais como a distribuição do soluto no sólido antes da difusão e das condições de contorno como a variação da concentração na superfície do material estudado.

Quando vários solutos se difundem, assume-se a lei generalizada de Fick, pois além do coeficiente de difusão principal de cada soluto, são necessários

também os coeficientes de difusão cruzados, que unem a influência de um soluto no fluxo do outro soluto. Geralmente, para íons totalmente dissociáveis, como no caso do  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , os coeficientes cruzados apresentam valores inferiores aos principais (BONA *et al.*, 2007; BORDIN *et al.*, 2019).

No entanto segundo Schwartzberg e Chao (1982), quando um fluido está em contato com um sólido, um filme é formado sobre a sua superfície. Se há uma transferência de massa entre a superfície e o fluido, a corrente deve passar através da camada estacionária, que atua como uma barreira resistiva e, portanto, possui um coeficiente de difusão que descreve a transferência de massa nesse filme. O problema é que esse coeficiente não pode ser determinado apenas experimentalmente. Para tanto, é necessário levar em consideração a razão entre as resistências à difusividade mássica tanto interna quanto externa que podem ser quantificadas pelo número de Biot de massa (ANGILELLI *et al.*, 2015; SCHWARTZBERG; CHAO, 1982).

De acordo Bona *et al.* (2007), valores elevados do número de Biot indicam que a resistência interna é limitante e, à medida que este valor diminui, aumenta a resistência externa, evidenciando uma interferência da camada mais próxima de solução no processo de difusão (RAKOTONDRAMASY-RABESIAKA *et al.*, 2010; SCHWARTZBERG; CHAO, 1982). Dessa forma o Biot se relaciona com o coeficiente de filme pois, de acordo com Bordin *et al.* (2019) quanto maior o valor deste parâmetro, menor é a influência do filme formado e mais rápida é a difusão dos sais para o alimento, reduzindo o tempo de salga.

## 2.6 MODELAGEM MATEMÁTICA

### 2.6.1 Método de Elementos Finitos (MEF) e Otimização Simplex

Para a modelagem do processo, considerando a transferência de massa tridimensional simultânea de dois solutos em um alimento, algumas considerações simplificadoras são importantes. De acordo com Angilelli *et al.* (2015), a difusão do soluto ocorre em uma matriz tridimensional que ocupa um domínio  $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ , associada a um conjunto de coordenadas  $X, Y, Z$ , aceitando a hipótese de que o coeficiente de difusão e difusividade mássica são constantes ao longo do biossólido, independentemente da posição e do tempo de imersão. O processo predominante na mobilidade dos íons é a difusão dos solutos ocorrendo sob condições isotérmicas 20

$\pm 1^\circ\text{C}$ , e a contração da amostra durante o procedimento pode ser considerada desprezível.

A partir destas considerações as concentrações dos sais NaCl e KCl são representadas respectivamente por  $C_1(x, y, z, t)$  e  $C_2(x, y, z, t)$  em um determinado ponto  $P(x, y, z) \in \Omega$  e num tempo definido  $t$ , nas quais podem ser determinadas com base nas equações de Onsager (ONSAGER, 1945):

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D_{11}\nabla^2 C_1 + D_{12}\nabla^2 C_2 \quad (1)$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = D_{21}\nabla^2 C_1 + D_{22}\nabla^2 C_2$$

onde  $D_{ii}$  são os coeficientes de difusão principais,  $D_{ij}$  são os coeficientes de difusão cruzados e  $\nabla^2(\cdot) = \nabla \cdot \nabla(\cdot)$  é o operador laplaciano.

No início do processo de difusão as concentrações iniciais do NaCl e KCl no queijo são dadas por  $C_{1,0}$  e  $C_{2,0}$  de acordo com o sistema de equações 2:

$$C_1(x, y, z, 0) = C_{1,0} \quad (2)$$

$$C_2(x, y, z, 0) = C_{2,0}$$

$$x, y, z \in \Omega$$

Para as condições de contorno no processo de difusão temos as seguintes equações, em que as concentrações  $C_1$  e  $C_2$  são conhecidas:

$$\frac{\partial C_1(R, t)}{\partial n} = \frac{h_m}{\lambda_m} [C_1 - C_{1,s}] \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_2(\pm R, t)}{\partial n} = \frac{h_m}{\lambda_m} [C_2 - C_{2,s}]$$

$$x, y, z \in \partial\Omega, \quad t > 0$$

onde  $h_m$  (m/s) é o coeficiente de transferência de massa do soluto no filme formado em torno do queijo,  $\lambda_m$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) a condutividade mássica;  $\partial\Omega$  é o conjunto de pontos da superfície que contorna o queijo;  $C_{1,s}$  e  $C_{2,s}$ , são as concentrações dos solutos na salmoura que estão em contato direto com o queijo e  $\partial/\partial n$  o operador da derivada normal.  $Bi$  é o número de Biot que expressa a razão entre a resistência interna e externa de transferência de massa e tem uma relação com os coeficientes  $h_m$  e  $\lambda_m$  pela Equação 4:

$$Bi = \frac{h_m \cdot Ri}{\lambda_m}; \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

onde  $Ri$  (m) é a dimensão característica que corresponde a semi distância do eixo-X. Outra forma de expressar os valores de Biot é dada pela Equação 5:

$$Bi = \frac{h_m \cdot m \cdot a}{D_{ii}} \quad (5)$$

Assim, conhecendo o valor do coeficiente de difusão ( $D_{ii}$ ), o termo  $h_m$ , pode ser determinado a partir da Equação 4 (SCHWARTZBERG; CHAO, 1982) onde  $m$  corresponde à razão entre as concentrações do componente de difusão no queijo e na solução, no infinito e  $a=R_i$ .

Utilizando os conhecimentos sobre MEF, alguns trabalhos utilizaram a otimização simplex acoplado ao MEF, para determinar os parâmetros de transferência de massa (BONA *et al.*, 2007; BORDIN *et al.*, 2019; BORSATO *et al.*, 2011; CLEMENTE *et al.*, 2020).

A otimização é um método utilizado quando há muitas variáveis a serem consideradas e quando não há conhecimento sobre o comportamento das variáveis que estão envolvidas no processo.

O simplex é um tipo de otimização que teve início com Spendley; Himsforth; Hext (1962) sendo fácil a sua implementação em processos automatizados. Por definição, o simplex é uma figura geométrica regular que se move sobre uma superfície para evitar regiões de respostas insatisfatórias (BORDIN *et al.*, 2019).

No espaço contendo  $n$  dimensões, o simplex caracteriza-se por ser a figura de um poliedro contendo faces planas com  $n+1$  vértices, onde  $n$  representa o número de variáveis independentes. Este método é um procedimento recorrente, que, tende a levar o simplex a um valor ótimo pela reflexão de pontos específicos. Nas vizinhanças do ótimo, o simplex pode apresentar contração com o objetivo de determinar uma posição mais precisa (CLEMENTE *et al.*, 2020).

## 2.6.2 Redes Neurais Artificiais (RNA)

Como nas mais diversas áreas da ciência a quantidade de informações produzidas é grande, a extração de informações a partir dos resultados de um experimento pode se tornar muito difícil sem usar alguma ferramenta de processamento de dados (CREMASCO *et al.*, 2016). Por essa razão, há necessidade de métodos e aplicações altamente eficientes para tratar os resultados. Uma ferramenta que tem se mostrado adequada para tratamentos, em dados que possuem comportamentos não lineares, são as Redes Neurais Artificiais (RNAs) (BITTAR;

ALVES; MELO, 2018; BORSATO *et al.*, 2011).

A expressão “rede neural” é motivada pela tentativa destes modelos reproduzirem a capacidade que o cérebro humano possui de reconhecer, associar e generalizar padrões, e sendo assim, sua teoria tem origem nos modelos matemáticos e de engenharia de neurônios biológicos (RAUBER, 2005). Segundo Kovács (2002) a RNA é uma importante técnica estatística capaz de resolver uma gama de problemas complexos. Desta maneira, torna o método extremamente útil quando não é possível definir um modelo explícito ou uma lista de regras.

As redes neurais artificiais são aplicadas em situações que existe uma grande quantidade de dados, onde a extração de informações relevantes se torna mais difícil. A utilização das RNA permite obter não somente ganhos significativos de desempenho, mas também possibilita o desenvolvimento de aplicações inovadoras capazes de expandir de forma extraordinária nossos sentidos e habilidades intelectuais e, com isso, permite avaliar a influência de cada atributo auxiliando os especialistas em suas tomadas de decisões (RAUBER, 2005).

Existem vários tipos de redes neurais, dentre eles destacam-se: perceptron, redes de base radial e os mapas auto-organizáveis (MAO). A MAO também pode ser chamada de redes Neurais de Kohonen, pois foi desenvolvida pelo professor Teuvo Kohonen. Ela é uma ferramenta capaz de processar dados multivariados, transformando uma entrada incidente padrão de tamanho arbitrário em um mapa discreto uni ou bidimensional (HAYKIN, 2001). A MAO, realiza essa transformação de forma topologicamente ordenada, com base em um algoritmo de aprendizagem não supervisionado (CREMASCO *et al.*, 2016; MATTOS *et al.*, 2019).

Nas últimas décadas, essa ferramenta vem ganhando espaço na resolução de problemas em diferentes áreas, como na investigação da viscosidade relativa do nanotubo de carbono multi-paredes (MADDAH *et al.*, 2018), previsão de elementos químicos da tabela periódica (LEMES; & DAL PINO, 2011) e avaliação de risco de alagamento (LAI *et al.*, 2017). Cremasco *et al.* (2019) estudou a aplicação de redes neurais artificiais, do tipo MAO, para a difusão de íons inorgânicos em ovo de codorna.

Quando se trata de bio-sólidos alimentares, a difusão na superfície e a formação do filme, podem ser dependentes da geometria e morfologia do sólido. Nesse sentido, é necessário utilizar alguma ferramenta de análise de dados para melhor compreensão dos efeitos desses fatores durante o processo (CREMASCO *et*

*al.*, 2016). Desta forma, as redes neurais artificiais do tipo mapas auto-organizáveis (MAO) conseguem atender e analisar as variáveis de modo a obter respostas claras e objetivas.

### 3 JUSTIFICATIVA

Em todas as fases de produção e armazenamento, os alimentos estão suscetíveis a contaminação e a processos que podem ser responsáveis por alterações químicas, muitas vezes, causadas pela presença de microrganismos. Para reduzir o crescimento microbiano, é necessário aplicar técnicas de conservação dos alimentos. Neste sentido, alguns tipos de processos de conservação são utilizados, como: conservação pelo uso do frio, do calor, branqueamento, pasteurização, esterilização, secagem, liofilização, radiação e adição de aditivos como ácidos, sulfitos, nitritos e cloretos (LEONARDI; AZEVEDO, 2018).

Uma das formas de se conservar alguns alimentos é utilizando o cloreto de sódio, porém, uma das principais desvantagens do uso desse sal está relacionado à problemas de hipertensão. Para minimizar estes problemas, pode ser feita a substituição parcial do cloreto de sódio por cloreto de potássio, mas para isso, é necessário o estudo dos processos difusivos envolvidos.

Muitas informações são relevantes sobre a transferência de massa como por exemplo, se há influência da difusão de um sal frente a outro, quanto tempo é gasto para difusão total, quais as modificações que podem acontecer na matriz alimentar durante a entrada dos sais, se há influência do filme ou não entre outros. Quanto mais se sabe sobre esses aspectos mais fácil fica escolha dos processos industriais a serem aplicados tanto para decidir se há viabilidade de inserção de diferentes sais e, quando for possível, qual o tempo de processamento deve ser aplicado e se há necessidade de agitação. Em escala industrial pequenas mudanças de processamento podem significar melhoria de produção e economia de energia e de matéria prima.

## 4 OBJETIVOS

### 4.1 GERAL

Estudar, por meio da modelagem computacional 3D, utilizando Método de Elementos Finitos (MEF) e as Redes Neurais Artificiais do tipo Mapas auto-organizáveis, a influência do filme formado nos queijos Mussarela e Prato, durante o processo de salga.

### 4.2 ESPECÍFICOS

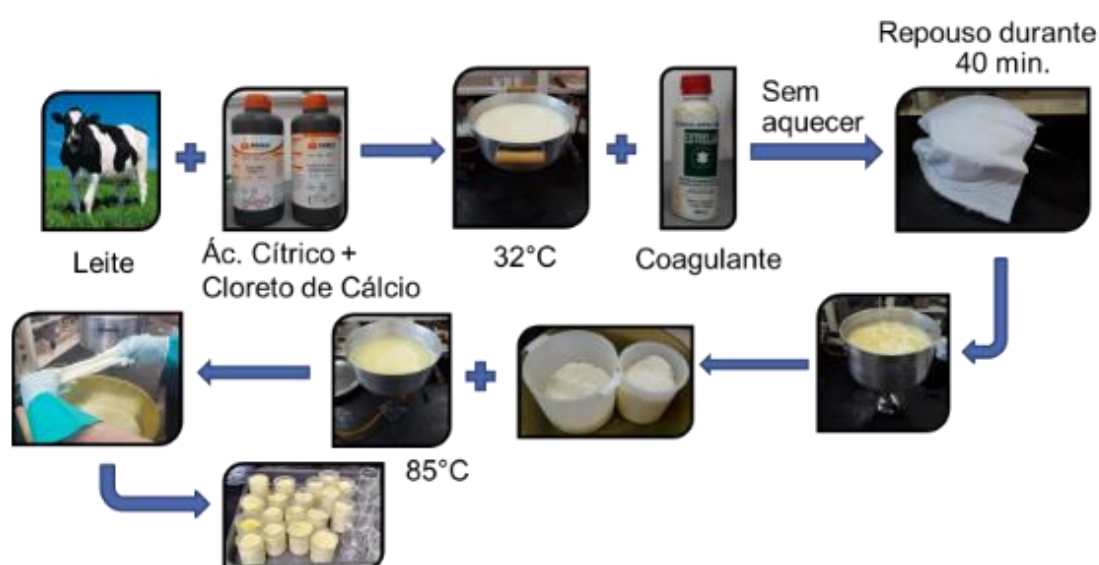
- Realizar a salga do queijo Mussarela e queijo Prato.
- Determinar a composição centesimal do queijo Mussarela e Queijo Prato.
- Determinar os coeficientes de difusão principais e cruzados do NaCl e KCl.
- Determinar os coeficientes de películas.
- Determinar o número de Biot de massa.
- Determinar as concentrações de NaCl e KCl na superfície dos queijos durante o processo de salga.
- Utilizar os Mapas Auto-organizáveis para estudar a influência do filme, no processo de salga.

## 5 PARTE EXPERIMENTAL

### 5.1 OBTENÇÃO DO QUEIJO MUSSARELA

O Queijo Mussarela utilizado foi produzido de acordo com Kosikowski (1978). Misturou-se leite bovino, ácido cítrico e cloreto de cálcio e depois, a mistura foi aquecida até 32 °C, com adição de coalho diluído em água. Após 40 minutos de descanso, a massa formada foi cortada em pedaços homogêneos e aquecida a 85°C com agitação lenta para a realização da filagem do queijo. Os pedaços da massa foram separados em filamentos e, em seguida, o queijo formado foi moldado em béqueres, de modo a obter tamanho padronizado com 0,04 m de diâmetro e 0,02 m de altura (Figura 1).

**Figura 1** - Esquema para obtenção do Queijo Mussarela.



Fonte: Os autores.

### 5.2 OBTENÇÃO DO QUEIJO PRATO

Foram utilizados 3 kg de queijo Prato com geometria retangular, adquirido de Laticínios Campina Alta (Manoel Ribas-PR). O queijo foi dividido em amostras de geometria padronizada de 0,04 m x 0,04 m x 0,02 m.

### 5.3 COMPOSIÇÃO CENTESIMAL

O teor de umidade, proteína, lipídios e cinzas foram determinados de acordo com os métodos descritos pelo Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008). A quantificação da umidade foi realizada em amostras recém retiradas da salmoura, pela secagem em estufa a 105°C até peso constante. Os carboidratos totais, lipídios, proteínas totais, resíduo mineral fixo foram determinados pelo Departamento de Tecnologia de Alimentos e Medicamentos da Universidade Estadual de Londrina. As cinzas foram quantificadas após a incineração na mufla a temperatura de 550°C (BORDIN *et al.*, 2019).

### 5.4 SALMOURA

Preparou-se uma solução contendo 15 L de salmoura com 5% de sais (m/v). A composição do sal foi dividida em 30% KCl e 70% NaCl, seguindo a proporção recomendada por Borsato *et al.* (2012). Para garantir uma concentração constante de sal durante o processo, o volume utilizado da salmoura foi de aproximadamente 30 vezes maior do que as amostras de queijo. Pelo fato de os queijos serem mais densos que a salmoura, as amostras foram dispostas em um suporte composto por fios de nylon, todas submersas. Os processos de difusão foram realizados em salmoura estática e dinâmica, este último com um fluxo de solução de 520 L h<sup>-1</sup>, a uma temperatura constante de 20 °C ( $\pm 1$  °C) segundo Bordin *et al.* (2019).

### 5.5 AMOSTRAGEM E DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

Os queijos foram completamente imersos em salmoura estática e dinâmica e depois coletados em vários intervalos de tempo. O queijo Mussarela completou 62 horas e 50 horas de imersão, no sistema estático e dinâmico, respectivamente. Já as amostras do queijo Prato, ficaram em imersão 45 horas para o sistema estático e 48 horas para o dinâmico. Em intervalos de tempo definidos as amostras foram coletadas, as dimensões determinadas, colocadas em cadinhos de porcelana e posteriormente inseridas em estufa a 105 °C para determinação da umidade (Bordin *et al.*, 2019).

## 5.6 CALCINAÇÃO

Após a determinação da umidade, as amostras foram colocadas na Mufla QUIMIS aquecidas gradativamente com temperatura variando de 150°C até 550°C.

## 5.7 PREPARO DAS SOLUÇÕES

As amostras dos queijos foram inseridas em cadinhos de porcelana e posteriormente colocadas na Mufla, em temperatura máxima de 550 °C. Para evitar que o material contido no cadinho entrasse em combustão, as amostras permaneceram no interior da Mufla por 12 horas. Sob temperatura ambiente, foi adicionado HCl 0,5M nas cinzas contidas nos cadinhos, de modo a dissolvê-las. A solução foi filtrada em papel de filtro (UNIFIL C42 – FAIXA AZUL) e posteriormente transferida para um balão volumétrico de 100mL completando o volume com a mesma solução de HCl. A determinação da concentração das amostras e curvas analíticas foram realizadas no laboratório de Solos, localizado no Centro de Ciências Agrárias (CCA). As curvas analíticas para as análises do queijo Mussarela e Prato, foram construídas com as soluções padrão de sódio e potássio, utilizando NaCl e KCl da marca Synth, nas concentrações de 10, 20, 30, 40 e 50 mg L<sup>-1</sup>, diluídas de soluções padrão iniciais de 100 mg L<sup>-1</sup> de Na<sup>+</sup> e de K<sup>+</sup>.

## 5.8 QUANTIFICAÇÃO DOS ÍONS SÓDIO E POTÁSSIO

A concentração de íons de sódio e potássio em amostras dos queijos foi determinada de acordo com Bordin *et al.* (2019) com modificações, utilizando o fotômetro Micronal, modelo B-462, com pressão de ar de 0,8 kgf cm<sup>-2</sup> e 1,5 kgf cm<sup>-2</sup> pressão da bomba de ar usando gás butano.

## 5.9 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA DIFUSÃO

A modelagem foi realizada utilizando o método de elementos finitos considerando um domínio cilíndrico, para o queijo Mussarela e retangular para o queijo Prato ambos com transferência de massa tridimensional. As equações generalizadas da segunda lei de Fick e equações de Onsager (ONSAGER, 1945)

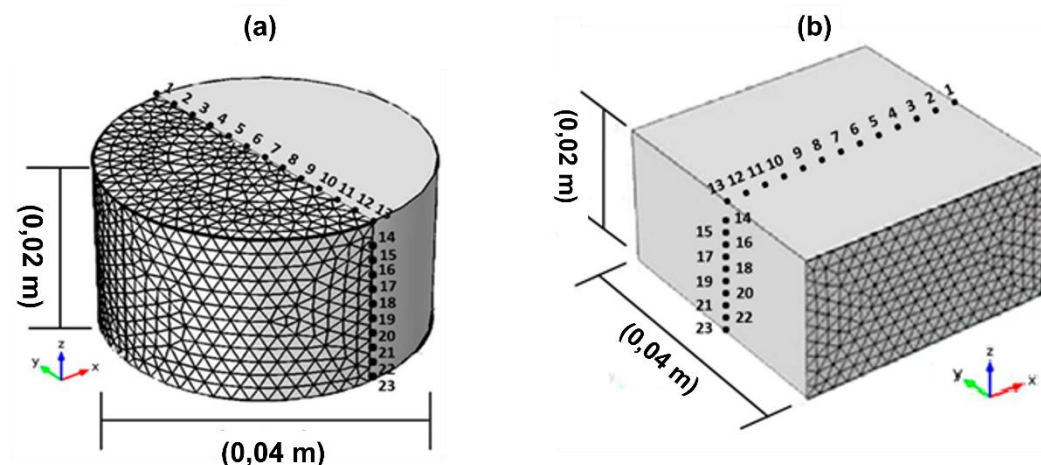
também foram consideradas. Foram aplicadas informações simplificadas descritas por Bordin *et al.* (2019) e Angilelli *et al.* (2015), onde o coeficiente de difusão foi considerado constante, independentemente da posição e do tempo de imersão na salmoura.

A difusão do soluto ocorreu em condições isotérmicas (20 °C) e a contração do queijo durante a salga não foi considerada. Para avaliar a influência do filme formado na superfície do queijo Mussarela, nos sistemas estáticos e dinâmicos, utilizou-se a condição de contorno de Cauchy (BONA *et al.*, 2007; BORDIN *et al.*, 2019) sem utilizar as condições de contorno de Dirichlet, nas quais as concentrações obtidas na superfície do queijo imediatamente após a imersão, são as mesmas da salmoura (CHUNG, 1978). A formulação em Elementos Finitos seguiu os procedimentos estabelecidos por Cremasco *et al.* (2019) e Angilelli *et al.* (2015).

#### 5.10 SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

A simulação foi realizada utilizando a interface física Comsol Multiphysics® versão 5.2 (COMSOL, Inc., Burlington, MA) e a interface física padrão "Transporte de Espécies Diluídas". Os parâmetros utilizados na simulação foram os coeficientes principais e cruzados, número de Biot de massa e a relação entre o coeficiente de transferência de massa e a condutividade mássica ( $h_m / \lambda_m$ ) que foram ajustados usando o método simplex super modificado acoplado às funções de desejabilidade, usando um algoritmo originalmente desenvolvido por Harrington, (1965) e ainda aprimorado por Derringer e Suich (1980) (BONA *et al.*, 2000).

**Figura 2** - Sólido gerado automaticamente pelo software e a posições utilizadas na simulação, para o queijo Mussarela (a) e queijo Prato (b).



Fonte: Os autores.

A Figura 2(a), representa o queijo Mussarela e 2(b) o queijo Prato, gerado automaticamente pelo software, mostrando parte da malha utilizada e os pontos equidistantes escolhidos para o estudo de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ . A malha escolhida foi a extremamente fina.

### 5.11 TESTE ESTATÍSTICO

A qualidade do ajuste foi obtida através da minimização do erro percentual (ANGILELLI *et al.*, 2015):

$$\% \text{ Erro} = 100 \sum_{i=1}^N \left[ \frac{|\bar{C}_{calc} - \bar{C}_{exp}|}{\bar{C}_{exp}} \right] \frac{1}{N} \quad (6)$$

onde  $\bar{C}_{exp}$  a concentração experimental média,  $\bar{C}_{calc}$  a concentração média simulada pela solução numérica e N o número de observações consideradas.

### 5.12 COEFICIENTES DE DIFUSÃO E $h_m/\lambda_m$

Os valores de  $h_m/\lambda_m$  e dos coeficientes principais e cruzados foram ajustados utilizando a otimização simplex super modificada acoplada às funções de desejabilidade. O algoritmo utilizado foi desenvolvido inicialmente por Harrington, 1965) e aprimorado posteriormente por Derringer; Suich (1980).

Várias associações de coeficientes foram geradas pelo software COMSOL por meio do método dos elementos finitos e comparadas pelo algoritmo de

otimização. Novas concentrações foram simuladas e posteriormente foram comparadas com as concentrações experimentais, fornecendo novos erros percentuais (Equação 6). Este processo foi repetido até atingir uma estabilidade dos valores encontrados para os coeficientes principais, cruzados e  $h_m/\lambda_m$  de modo que fosse obtido valores mínimos de erro percentual (BORSATO *et al.*, 2011; BORSATO *et al.*, 2012; ANGILELLI *et al.*, 2015; BORDIN *et al.*, 2019).

### 5.13 REDES NEURAS ARTIFICIAIS DO TIPO MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS

A rotina de rede neural foi desenvolvida pelo nosso grupo de pesquisa, aplicada de acordo com o algoritmo descrito por Haykin (2001) e processada pelo software Matlab® R2007b. Foi utilizado o Mapa Auto-Organizável (MAO) proposto por Kohonen (1995) para avaliar a influência e o comportamento das concentrações de NaCl e KCl na superfície dos queijos.

Para os queijos Mussarela e Prato, a rede aplicada apresentou uma topologia hexagonal 6x6 com 8000 épocas de treinamento, com treinamento de taxa de aprendizagem começando em 0,2 e diminuindo exponencialmente com as épocas de treinamento para  $6,71 \times 10^{-5}$ . A relação inicial da vizinhança foi de 3,5 em decadência para 0,045.

### 5.14 PROCESSO COMPUTACIONAL

Utilizou-se um computador Intel® Core™ CPU i7-4790@ 3,60 GHz, 32 GB de RAM e 250 GB HDD.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 QUEIJO MUSSARELA

A Tabela 1 mostra os coeficientes de difusão principais e cruzados, os valores do coeficiente de transferência de massa ( $h_m$ ) no filme, a relação entre o coeficiente de transferência de massa ( $h_m/\lambda_m$ ) e o número de Biot determinado pelo método de elemento finito utilizando o software COMSOL Multifísic®. Nesta etapa, utilizou-se a otimização simplex juntamente com as funções de conveniência, durante o processo de difusão no sistema estático e dinâmico (BORDIN *et al.*, 2019).

Todas as simulações foram realizadas utilizando-se uma modelagem de geometria 3D, com malha de elemento finito tetraédrica extremamente fina, e o contínuo foi dividido em 44275 elementos tetraédricos com critério de convergência de  $10^{-4}$ .

**Tabela 1** – Coeficientes de difusão principais e cruzados, número de Biot e coeficiente de transferência de massa durante a salga salmoura estática e dinâmica para o queijo Mussarela.

	Salmoura Estática		Salmoura Dinâmica	
	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
<b>Coeficientes Principais (m<sup>2</sup>/s)</b>	1,12×10 <sup>-9</sup> (D <sub>11</sub> )	0,910×10 <sup>-9</sup> (D <sub>22</sub> )	1,12×10 <sup>-9</sup> (D <sub>11</sub> )	0,910×10 <sup>-9</sup> (D <sub>22</sub> )
<b>Coeficientes Cruzados (m<sup>2</sup>/s)</b>	1,70×10 <sup>-10</sup> (D <sub>12</sub> )	1,69×10 <sup>-10</sup> (D <sub>21</sub> )	1,70×10 <sup>-10</sup> (D <sub>12</sub> )	1,69×10 <sup>-10</sup> (D <sub>21</sub> )
<b>h<sub>m</sub> (m/s)</b>	1,28×10 <sup>-6</sup>	1,40×10 <sup>-6</sup>	4,48×10 <sup>-6</sup>	3,88×10 <sup>-6</sup>
<b>Erro Percentual</b>	3,79%	5,66%	5,40%	6,01%
<b>h<sub>m</sub>/λ<sub>m</sub> (m<sup>-1</sup>)</b>		1322		4000
<b>Biot*</b>		26,4		80,0

Fonte: Os autores.

Na Tabela 1, observa-se que os coeficientes principais e cruzados na salmoura estática e dinâmica são os mesmos, uma vez que esses parâmetros estão

relacionados à transferência de massa dentro do bioossólido, não sendo dependentes da perturbação externa do sistema. O coeficiente principal de difusão do  $\text{Na}^+$  ( $D_{11}$ ) é 1,23 vezes maior que o coeficiente de difusão principal de  $\text{K}^+$  ( $D_{22}$ ). Além disso, os coeficientes cruzados apresentaram valores menores do que os principais, mostrando que a difusão dos solutos em seu próprio fluxo é mais importante do que a interferência entre eles.

De acordo com a Tabela 1, a relação otimizada  $h_m/\lambda_m$  mostrou um valor de  $1322 \text{ m}^{-1}$  e um número Biot igual a 26,4, indicando a presença de uma barreira resistiva na superfície externa do bioossólido. Segundo Borsato *et al.* (2012) quanto menor o número de Biot, maior a influência da camada no fluxo de componentes inorgânicos na interface. O número de Biot obtido para o sistema estático indica que a resistência à transferência de massa dominante é externa (BORDIN *et al.*, 2019), e os valores obtidos para o número Biot e  $h_m/\lambda_m$  no sistema dinâmico indicam que a barreira resistiva fica 3 vezes menor quando comparada à difusão no sistema estático. O coeficiente de filme ( $h_m$ ) observado na Tabela 1 tem um valor maior para o sistema dinâmico, indicando que o filme é reduzido pois não houve influência considerável na transferência de íons durante a difusão.

Ainda em relação ao coeficiente principal de difusão para ambos os íons, pode-se observar que o valor é maior para o sódio do que para o potássio, fato que não é possível explicar quando se observa o tamanho dos raios iônicos destes dois íons. Os íons sódio e potássio apresentam, respectivamente, raios iônicos iguais a  $1,02 \times 10^{-10} \text{ m}$  e  $1,38 \times 10^{-10} \text{ m}$  e, neste caso, é o potássio que apresenta maior mobilidade na solução. Os íons  $\text{Na}^+$  possuem menor raio e conseqüentemente maior densidade de carga, possibilitando maior capacidade de interação íon-dipolo com as moléculas de água e menor mobilidade iônica. Sendo assim, o raio de hidratação dos íons sódio é maior e, portanto, o coeficiente principal deveria ser menor do que o coeficiente principal do potássio (CREMASCO *et al.*, 2019).

A explicação deste fato pode estar relacionada a quantidade de proteína encontrada no queijo. A Tabela 2, mostra a composição química do queijo Mussarela, analisado antes do processo de difusão. A quantidade de proteína no queijo foi igual a 25,9%, porcentagem que corrobora com a média de proteína encontrado em alguns trabalhos presentes na literatura (PAZ *et al.*, 2017; VERRUMBERNARDI *et al.*, 2000). Como discutido anteriormente, o coeficiente de difusão principal é maior para o sódio do que para o potássio (Tabela 1) pois, sugere-se que

as proteínas exerçam um efeito de campo de força na difusão, auxiliando o transporte de  $\text{Na}^+$  para o interior do bio sólido (CREMASCO *et al.*, 2019).

**Tabela 2** – Análise centesimal do queijo Mussarela antes do processo de difusão na salmoura.

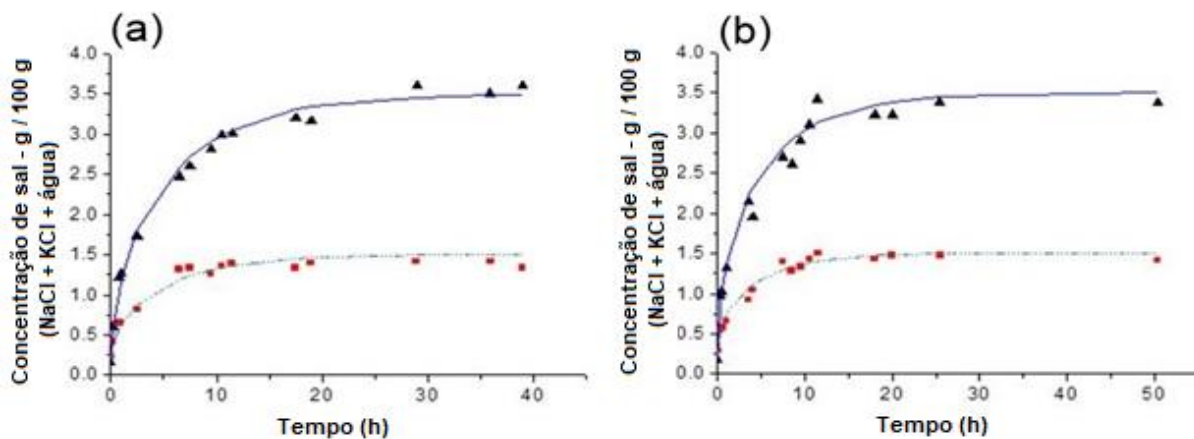
<b>Composição química</b>	<b>g 100g<sup>-1</sup></b>
Umidade	45,7
Lipídios	20,1
Carboidrato	6,06
Proteína	25,9
Cloreto de sódio	0,09
Cloreto de potássio	0,14
Resíduo mineral fixo	2,25

Fonte: Os autores.

O perfil de difusão em sistemas estáticos e dinâmicos, comparando concentrações experimentais e simuladas em g sal/100g (solução) é mostrado na Figura 3. Neste sistema, nota-se uma barreira física na superfície externa do queijo Mussarela, pois observou-se que a transferência de massa era mais rápida quando o sistema de agitação foi aplicado. Nas 5 horas iniciais do processo de difusão, já é possível observar que os sais se difundam mais rapidamente no sistema com agitação. As concentrações de cloreto de sódio se estabilizam antes das 16 horas no sistema dinâmico e após 19 horas de salga no sistema estático. Além disso, o número de Biot para o sistema dinâmico foi de 80,0 e para o sistema estático 26,4 (Tabela 1), indicando a maior influência do filme formado na superfície do queijo quando o processo de salga não é agitado (Figura 3).

Para estudar a influência do filme formado na superfície do queijo no processo de difusão, as concentrações de íons inorgânicos, nas posições localizadas na superfície do queijo Mussarela (Figura 2a) foram simuladas pelo Método dos Elementos Finitos, e os tempos de difusão escolhidos foram utilizados como variáveis de entrada no MAO para obtenção de mapas topológicos e de peso.

**Figura 3** – Perfil de difusão de concentrações experimentais e simuladas de sal durante o experimento utilizando salmoura estática (a) e salmoura dinâmica (b). Os dados experimentais NaCl são representados por (▲) e KCl por (■), dados simulados NaCl e KCl são representados por (-) e (...).



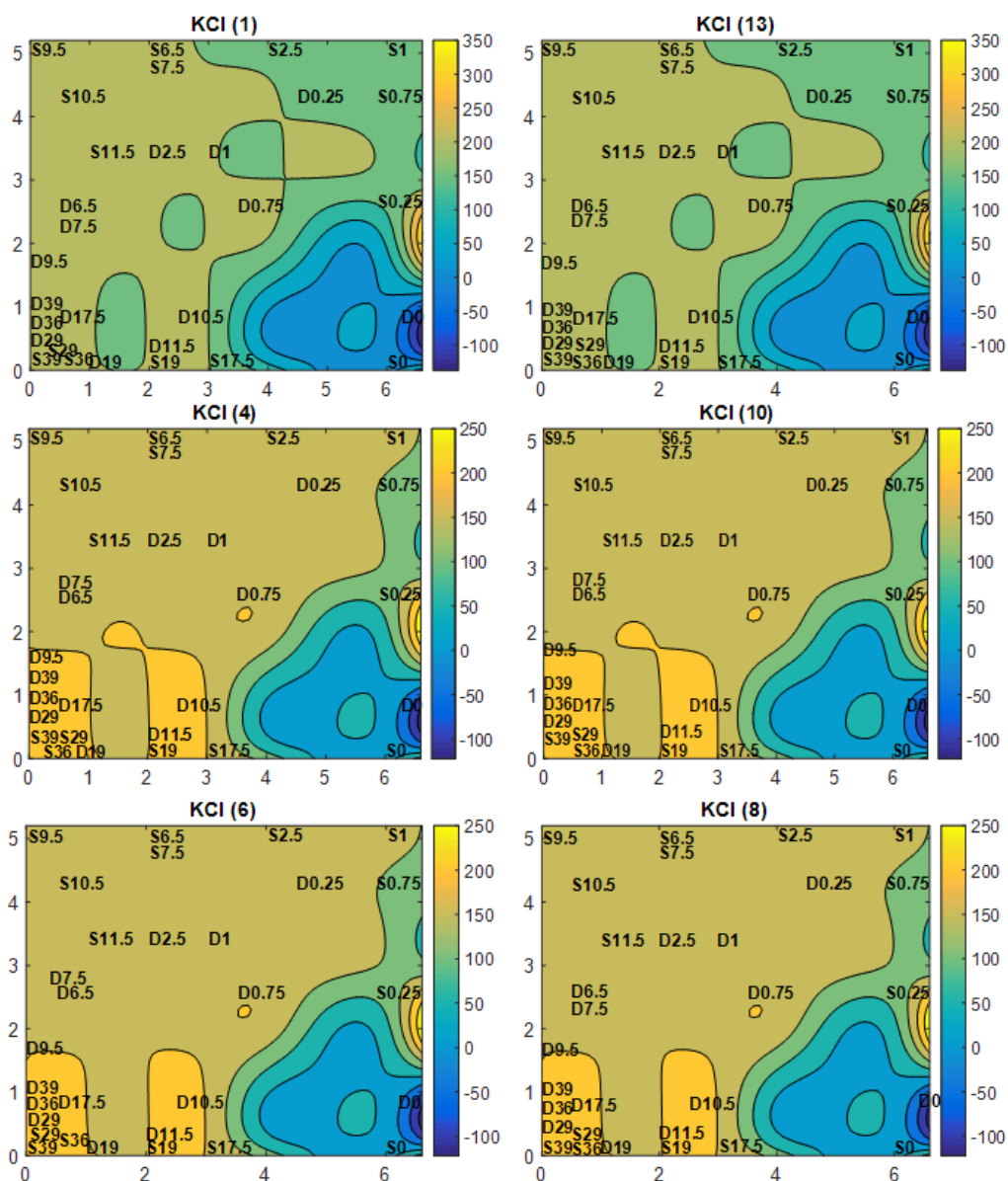
Fonte: Os autores.

A Figura 4 mostra os mapas topológicos, para o sistema estático e dinâmico nos diferentes tempos de difusão para sódio nos eixos X e Z (Figura 4a e 4b, respectivamente) e potássio nos eixos X e Z (Figura 4c e 4d, respectivamente). A letra S representa o sistema estático e a letra D representa o sistema dinâmico. Os números representam os tempos de salga que foram escolhidos para analisar por Redes Neurais Artificiais (RNA) a influência do filme durante o processo de difusão. A rede do tipo Mapa Auto-organizável classifica os dados de entrada como clusters, que podem ser formados por um ou mais neurônios (CREMASCO *et al.*, 2019). A topologia é hexagonal com 6 linhas e 6 colunas (6x6), cada neurônio possuindo 6 lados podendo ter semelhança com até 6 neurônios. Cada mapa apresenta 6 linhas e 6 colunas onde a definição dos grupos é caracterizada pela presença de aglomerados entre neurônios vazios. Dessa forma, os neurônios vizinhos têm a mesma semelhança. Neste sentido, de acordo com a Figura 4, os tempos maiores no processo estático sempre estão próximos aos tempos menores no processo dinâmico.



Entre as posições estudadas, tanto no eixo X quanto no eixo Z, observou-se que as posições 1, 13 e 23 apresentaram pesos mais elevados, em todos os momentos, para a difusão dos dois íons.

**Figura 5** - Mapas de peso para difusão de K<sup>+</sup> na superfície do biossólido no eixo X em sistema estático e dinâmico.



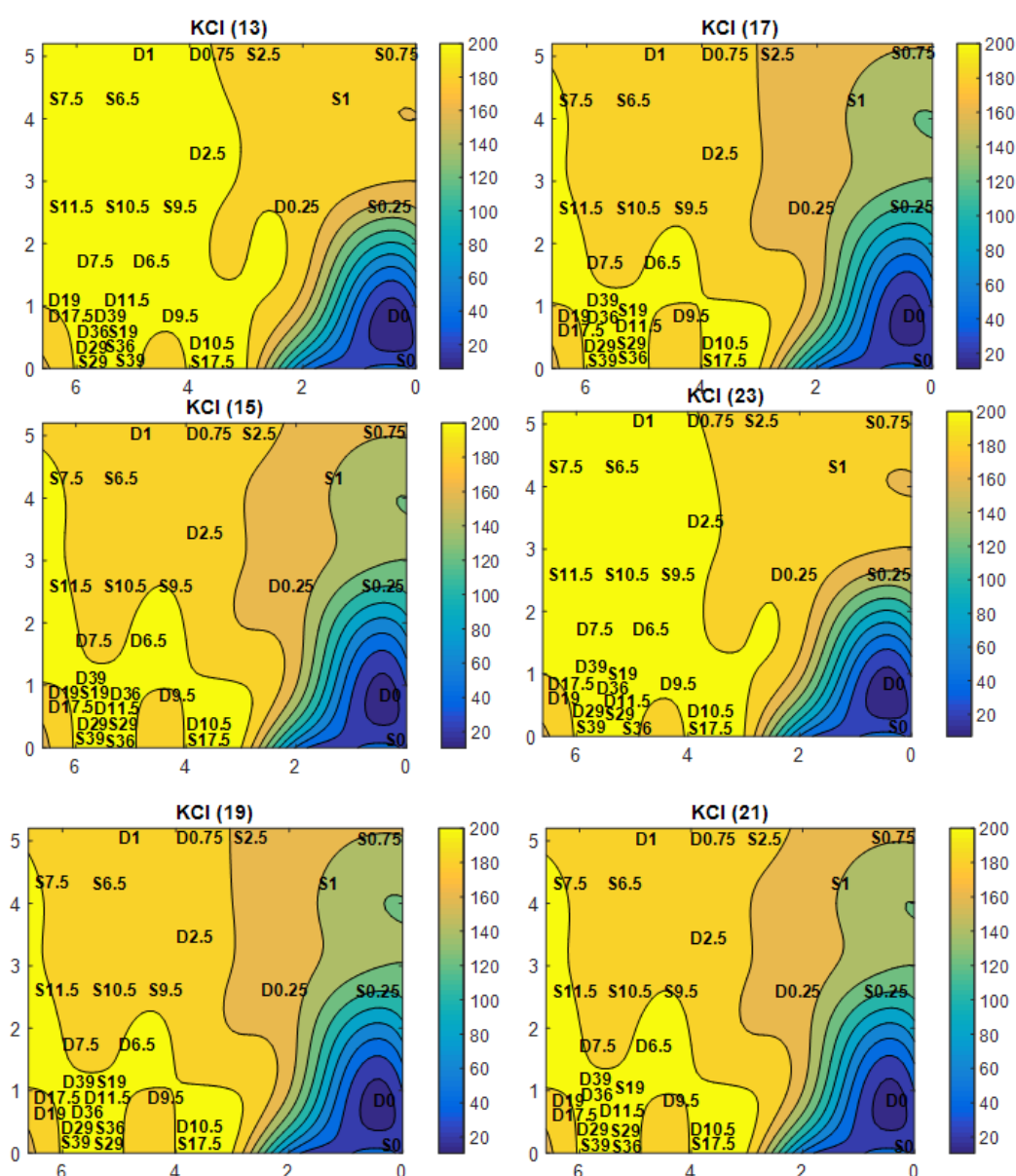
Fonte: Os autores.

O biossólido tem forma cilíndrica e as posições 1, 13 e 23 estão localizadas nas bordas do queijo (Figura 2a), de modo que a difusão ocorra mais rapidamente. Sugere-se, portanto, que a camada de filme formada é mais fina nas bordas e mais grossa na parte externa central do biossólido. Nas demais posições, em ambos os processos, os tempos inferiores a 1 hora de salga estão em regiões de pesos mais baixos, indicando que abaixo deste tempo, a entrada de íons na superfície

ainda não é relevante para o processo de difusão.

Os mapas de peso contidos na Figura 5, para a difusão de KCl no eixo X, mostraram que os tempos, em horas, igual a 9,5, 10,5, 11,5, 17,5 para o sistema dinâmico, e 19, 29, 36, 39 para sistemas estáticos e dinâmicos apresentaram os mesmos pesos nas posições 4, 6, 8 e 10, indicando uma distribuição homogênea deste íon na superfície do bioossólido. Com auxílio dos mapas de peso, observou-se que os níveis  $K^+$  mais altos foram atingidos a partir de 9,5 horas e 19 horas para os sistemas dinâmico (D) e estático (S), respectivamente, com exceção das posições 1 e 13.

**Figura 6** - Mapas de peso para difusão de  $K^+$  na superfície bioossólido no eixo Z em sistema estático e dinâmico.

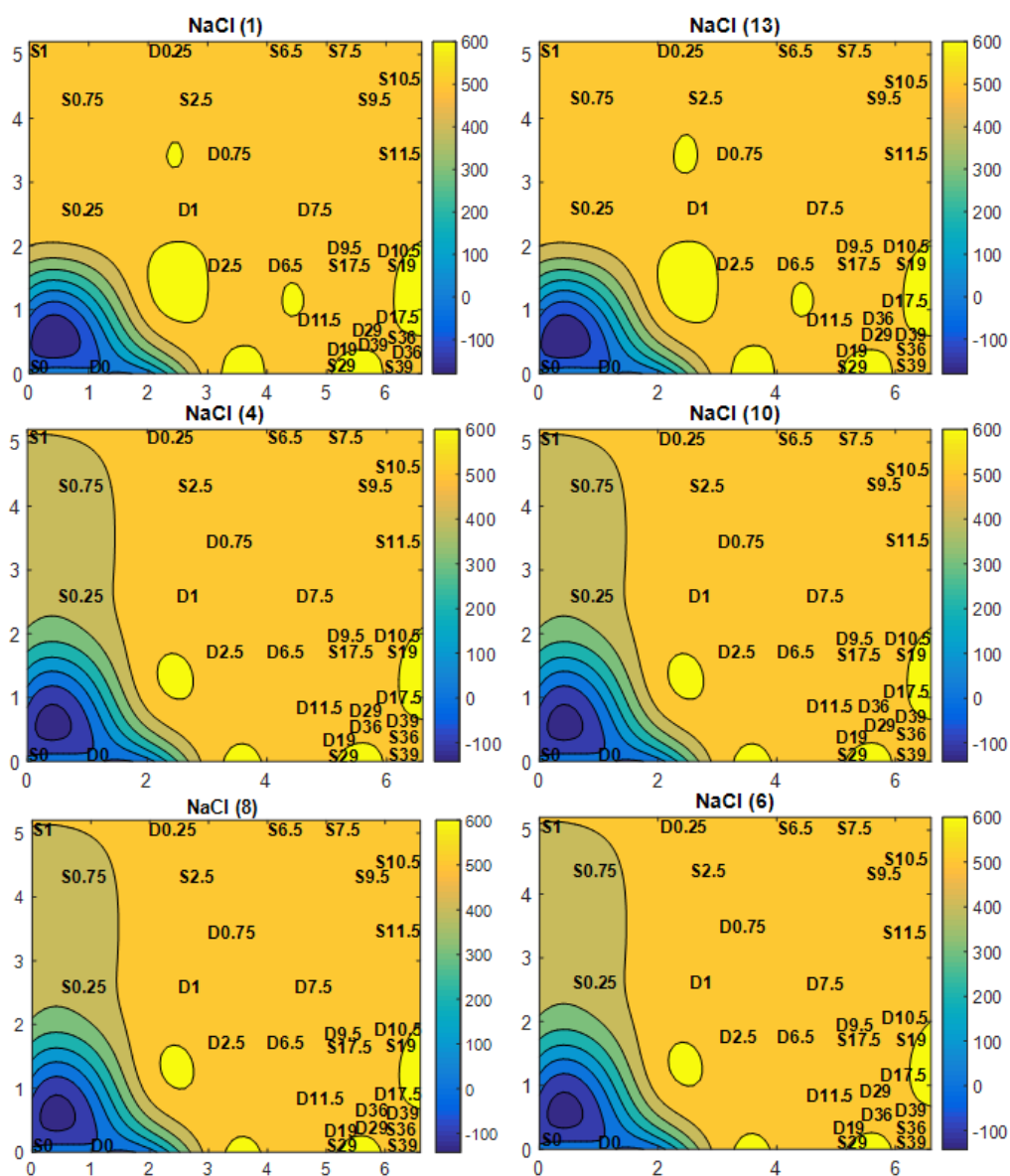


Fonte: Os autores.

A Figura 6 mostra os mapas de peso, contendo posições espelhadas para difusão de potássio no eixo Z. Da mesma forma que ocorre no eixo X, nota-se que as posições 13 e 23, 15 e 21, 17 e 19 apresentam perfis semelhantes de distribuição. A equalização dos íons  $K^+$  ocorreu em 6,5 horas para o sistema dinâmico, e em 7,5 horas para o sistema estático em todas as posições, exceto as de 13 e 23. A partir desses tempos, todos os outros tempos estão na região do mapa com o maior peso.

As Figuras 7 e 8 mostram os mapas de peso para a difusão de  $Na^+$  íons no eixo X e Z, respectivamente.

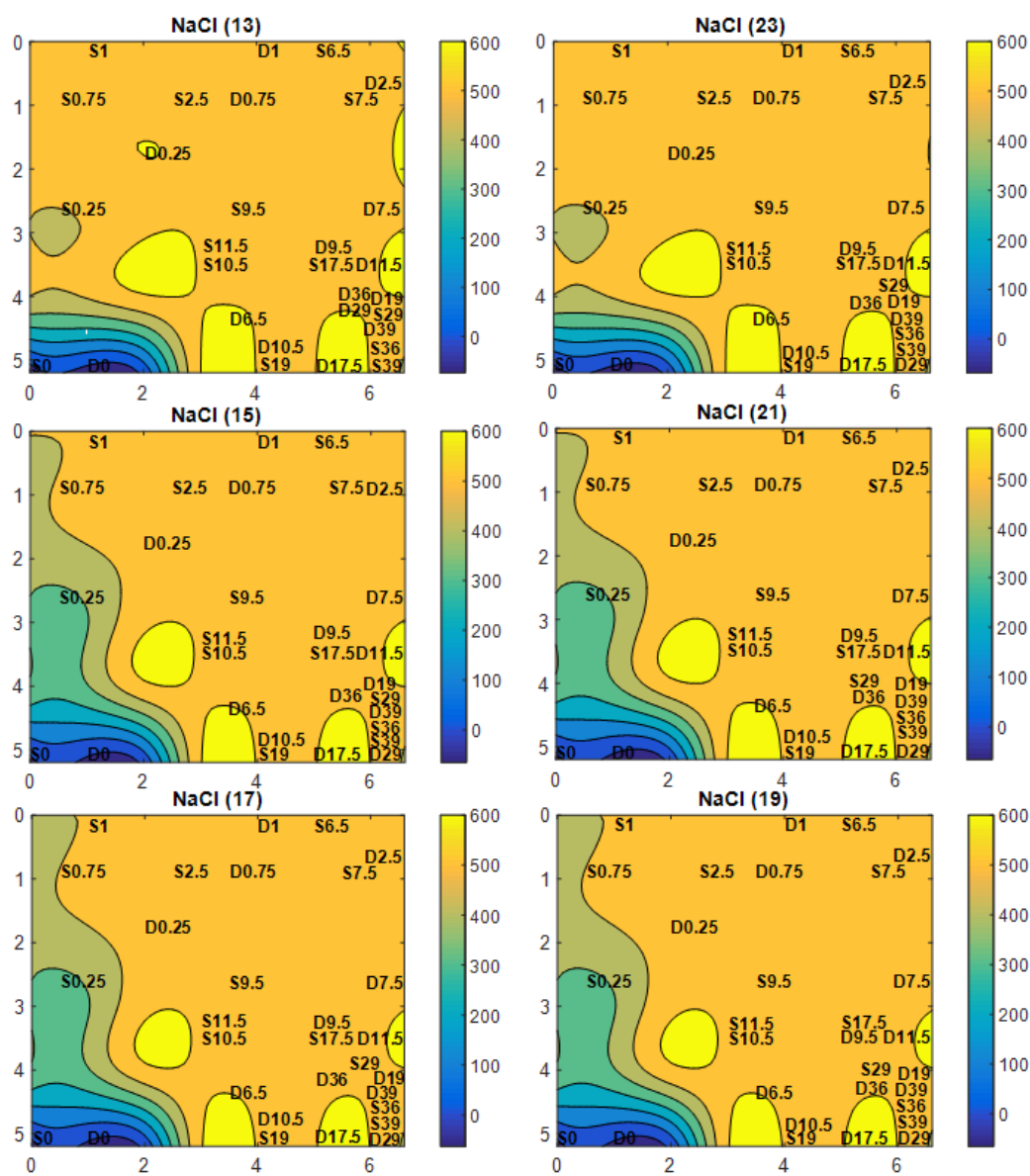
**Figura 7** - Mapas de peso para difusão de  $Na^+$  na superfície do bioossólido no eixo X em sistema estático e dinâmico.



Fonte: Os autores.

Os tempos inferiores a 1 hora de salga estão localizados em regiões de pesos mais baixos para o sistema estático (S) e para o sistema dinâmico (D), os tempos inferiores a 1 hora estão localizados em regiões de peso mais altos. O número de Biot igual a 26,44 (Tabela 1) obtido para salmoura estática concorda com esta observação pois, este número indica a presença de uma barreira resistiva na superfície externa do bio-sólido, com maior influência da camada no fluxo de componentes inorgânicos na interface (CREMASCO *et al.*, 2019). Nos tempos de salga mais longos, no processo estático e dinâmico, foram encontrados o mesmo peso e alcançou-se os maiores níveis de  $\text{Na}^+$  na superfície.

**Figura 8** - Mapas de peso para difusão de  $\text{Na}^+$  na superfície do bio-sólido no eixo Z em sistema estático e dinâmico.



Fonte: Os autores.

## 6.2 QUEIJO PRATO

Os coeficientes principais e cruzados, o coeficiente de filme, a razão entre o coeficiente de transferência de massa e a condutividade mássica e o número Biot são parâmetros determinados por simulação utilizando o método de elemento finito. Estes parâmetros estão relacionados a difusão do queijo Prato, em processo estático e dinâmico, aplicando a otimização simplex atrelada às funções de desejabilidade (BORDIN *et al.*, 2019).

Todas as simulações foram realizadas utilizando-se uma modelagem com geometria 3D, malha de elemento finito tetraédrica extremamente fina, composta por 130.382 elementos com 370.052 graus de liberdade. Uma vez que o método é iterativo e com restrições, para evitar possíveis oscilações e um número excessivo de vértices no procedimento simplex (BONA *et al.*, 2000; BORDIN *et al.*, 2019), os limites inferiores e superiores de cada variável foram definidos por meio de testes preliminares. Os resultados obtidos apresentaram-se dentro do intervalo das variáveis independentes escolhidas e a convergência para o valor ótimo foi alcançada mais rapidamente (ANGILELLI *et al.*, 2015).

**Tabela 3** – Parâmetros obtidos pela otimização simplex durante os processos de difusão de cloreto de sódio e potássio em salga estática e dinâmica.

	Salmoura Estática		Salmoura Dinâmica	
	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
<b>Coeficientes Principais (m<sup>2</sup>/s)</b>	0,500×10 <sup>-9</sup> (D <sub>11</sub> )	0,300×10 <sup>-9</sup> (D <sub>22</sub> )	0,500×10 <sup>-9</sup> (D <sub>11</sub> )	0,300×10 <sup>-9</sup> (D <sub>22</sub> )
<b>Coeficientes Cruzados (m<sup>2</sup>/s)</b>	1,27×10 <sup>-10</sup> (D <sub>12</sub> )	0,700×10 <sup>-10</sup> (D <sub>21</sub> )	1,27×10 <sup>-10</sup> (D <sub>12</sub> )	0,700×10 <sup>-10</sup> (D <sub>21</sub> )
<b>h<sub>m</sub> (m/s)</b>	5,13×10 <sup>-7</sup>	3,07×10 <sup>-7</sup>	2,10×10 <sup>-6</sup>	1,26×10 <sup>-6</sup>
<b>Erro Percentual</b>	6,20%	5,68%	4,64%	4,02%
<b>h<sub>m</sub>/λ<sub>m</sub> (m<sup>-1</sup>)</b>		1026		4200
<b>Biot*</b>		20,5		84,0

\* Número de Biot calculado em relação ao eixo X.

Fonte: Os autores.

Os valores dos coeficientes de difusão principal (D<sub>ii</sub>) e cruzado (D<sub>ij</sub>),

o coeficiente de filme ( $h_m$ ), a razão entre a transferência de massa e o coeficiente de condutividade de em massas ( $h_m/\lambda_m$ ), os erros percentuais obtidos a partir da diferença entre dados experimentais e simulados e o número Biot, utilizando o software COMSOL Multifísics®, durante o processo de difusão, sem e com agitação, estão apresentados na Tabela 3.

Os valores otimizados dos números Biot e dos coeficientes de filme (Tabela 3) mostram uma diferença na transferência de massa entre o processo estático e dinâmico. O menor valor para o número Biot e o valor elevado para  $h_m/\lambda_m$  mostram que a influência da barreira na interface solução/biossólido é maior no sistema estático, indicando resistência aos íons para transferência da solução para o queijo Prato (BORDIN *et al.*, 2019).

Na Tabela 3, observa-se que os coeficientes principais e cruzados na salmoura estática e dinâmica são os mesmos, uma vez que esses parâmetros estão relacionados à transferência de massa dentro do biossólido, não sendo dependentes da perturbação externa do sistema. O coeficiente principal de difusão do  $\text{Na}^+$  ( $D_{11}$ ) é 1,7 vezes maior que o coeficiente de difusão principal de  $\text{K}^+$  ( $D_{22}$ ). Além disso, os coeficientes cruzados apresentaram valores menores do que os principais, mostrando que a difusão dos solutos em seu próprio fluxo é mais importante do que a interferência entre eles.

**Tabela 4** – Análise centesimal do queijo Prato antes do processo de difusão na salmoura.

<b>Composição química</b>	<b>g 100 g<sup>-1</sup></b>
Umidade	38,7
Lipídios	28,6
Carboidrato	3,18
Proteína	26,7
Cloreto de sódio	0,09
Cloreto de potássio	0,14
Resíduo mineral fixo	2,81

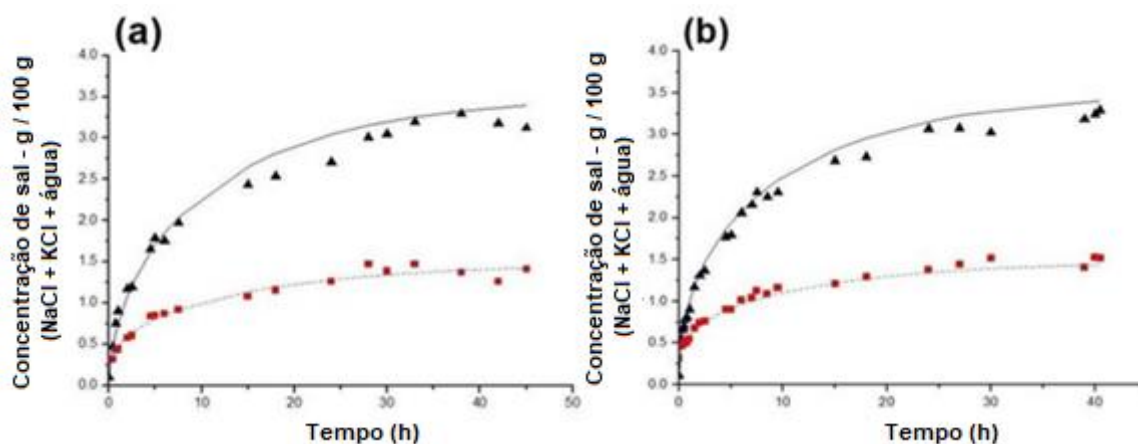
Fonte: Os autores.

Como visto anteriormente para o queijo Mussarela, o coeficiente de difusão principal para o sódio, no queijo Prato, também é maior que do potássio. A

teoria dos raios iônicos, relacionados com a mobilidade dos íons em solução aquosa e consequente raios de hidratação proposto por Lee (1999) atrelado a quantidade de proteínas contidas no bio sólido, explica o maior valor encontrado para o coeficiente de difusão principal para o sódio. Conforme mostra a Tabela 4, a porcentagem de proteínas encontradas no queijo Prato foi de 26,7%, fato que explica as divergências encontradas nos trabalhos realizados por Bona *et al.* (2005, 2007), onde, foi obtido valor maior para o coeficiente de difusão principal do potássio em relação ao sódio.

De acordo com Cremasco *et al.* (2019), em estudo da difusão na interface solução/ovo de codorna, a influência do filme formado durante o processo de difusão pôde ser estudada analisando as concentrações de soluto em diferentes posições ao longo do tempo. O perfil de difusão em sistemas estáticos e dinâmicos, comparando concentrações experimentais e simuladas em g sal/100g (solução) é mostrado na Figura 9. De acordo com a Figura 9, deve haver uma barreira física na superfície externa do queijo Prato, pois observou-se que a transferência de massa era mais rápida quando o sistema de agitação foi aplicado. Além disso, o número de Biot para o sistema dinâmico foi de 84,0 e para o sistema estático 20,5 (Tabela 3), indicando a maior influência do filme formado na superfície do queijo quando o processo de salga não é agitado.

**Figura 9** - Perfil de difusão de concentrações experimentais e simuladas de sal durante o experimento salmoura estática (a) e salmoura dinâmica (b). Os dados experimentais NaCl são representados por (▲) e KCl por (■), dados simulados NaCl e KCl são representados por (-) e (...).



Fonte: Os autores.

As concentrações de NaCl e KCl utilizadas na salmoura foram de

597,83 e 201,48 mol.m<sup>-3</sup>, respectivamente. Estas deveriam ser as concentrações obtidas na superfície do queijo imediatamente após a imersão, se as condições de Dirichlet fossem aplicadas (CHUNG, 1978). No entanto, após 15 minutos de salga, os valores médios simulados encontrados no sistema estático foram de 322,76 e 100,40 mol m<sup>-3</sup> para NaCl e KCl, respectivamente, e na salmoura dinâmica foram 507,07 e 162,30 m<sup>-3</sup> para NaCl e KCl, respectivamente. Esses valores comprovam a influência do filme formado na superfície e que mesmo com agitação, ele não foi eliminado. Desta forma, as condições de Cauchy foram utilizadas (BONA *et al.*, 2007). Sendo assim, a medida que o tempo de salga aumenta, esses valores tendem a se aproximar da concentração inicial da salmoura utilizada.

Para analisar a influência do filme formado na superfície do queijo Prato, a concentração em cada ponto durante as 45 horas de salga, foi simulada pelo método dos elementos finitos (MEF). Os valores obtidos foram analisados com a aplicação de redes neurais do tipo mapas Auto-organizáveis (MAO). Considerando estudos preliminares, utilizou-se 8000 épocas de treinamento já que foi possível verificar que a estabilização do erro médio de quantização ocorreu após 6000 épocas, de modo que esse valor foi utilizado no treinamento da rede.

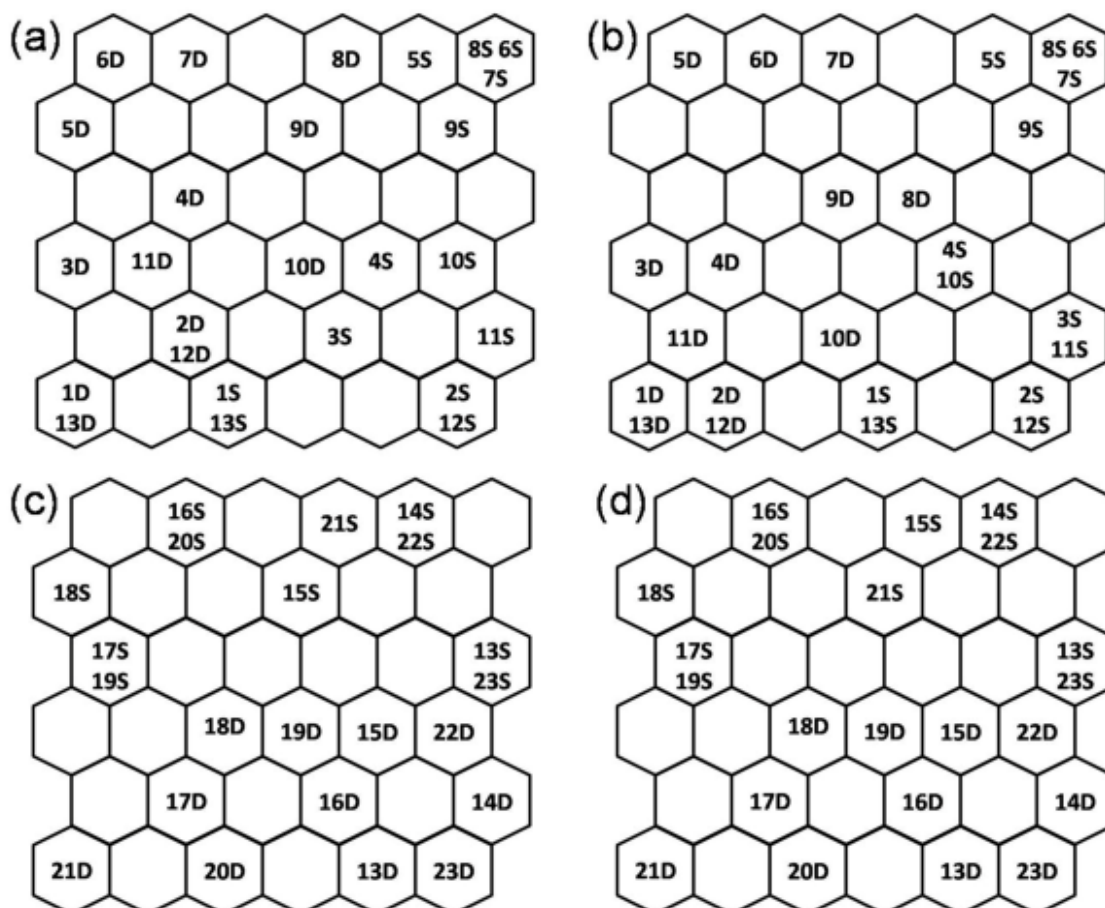
A Figura 10 mostra os mapas topológicos com distribuição de concentração nos pontos localizados na superfície superior e lateral do queijo (Figura 2), durante o processo de difusão multicomponente de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>. A topologia é hexagonal com 6 linhas e 6 colunas (6x6), cada neurônio possuindo 6 lados podendo ter semelhança com até 6 neurônios. Cada mapa apresenta 6 linhas e 6 colunas onde a definição dos grupos é caracterizada pela presença de aglomerados entre neurônios vazios. As figuras 9a e 9b representam os mapas dos pontos superiores no eixo X e as figuras 9c e 9d os pontos laterais no eixo Z para sistema dinâmico (D) e estático (S). De acordo com a Figura 9, nota-se que a influência do filme formado não é a mesma para Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>, uma vez que o mapa topológico apresentou alterações quando analisado no mesmo eixo. Assim, é possível dizer que não apenas as propriedades intrínsecas dos dois íons, como seu raio iônico, densidade de carga, entre outros, que determinam a mobilidade na superfície do queijo, mas também a posição e o tipo de íon considerado.

A Figura 10 (a) mostra algumas posições diferentes do mapa topológico mostrado na Figura 10 (b). O neurônio onde estão localizadas as posições 1D e 13D, para o K<sup>+</sup> no eixo X possui semelhança com os neurônios que estão

localizados nas posições 3D, 4D, 11D, 2D e 12D. Entretanto, este comportamento não se repete no mapa topológico mostrado na Figura 10 (a). Por outro lado, a mesma semelhança entre os neurônios observados na Figura 10 c ocorre na Figura 10 d. Em ambos os eixos, a rede neural utilizada mostrou que na superfície do queijo há uma clara separação entre os processos dinâmicos e estáticos, pois no mapa topológico, quanto mais distante os pontos, menor a semelhança entre eles (CREMASCO *et al.*, 2019).

À medida que as posições analisadas se afastam do ponto central (posição 7 da Figura 2) em direção à borda do queijo, mapas topológicos mostram que sua semelhança diminui, indicando que a espessura do filme formado varia ao longo do eixo X. Assim, na posição 7 a resistência à transferência de íons é maior, diminuindo à medida que se afasta do centro da superfície do queijo. O mesmo comportamento é observado ao analisar as posições localizadas no eixo Z.

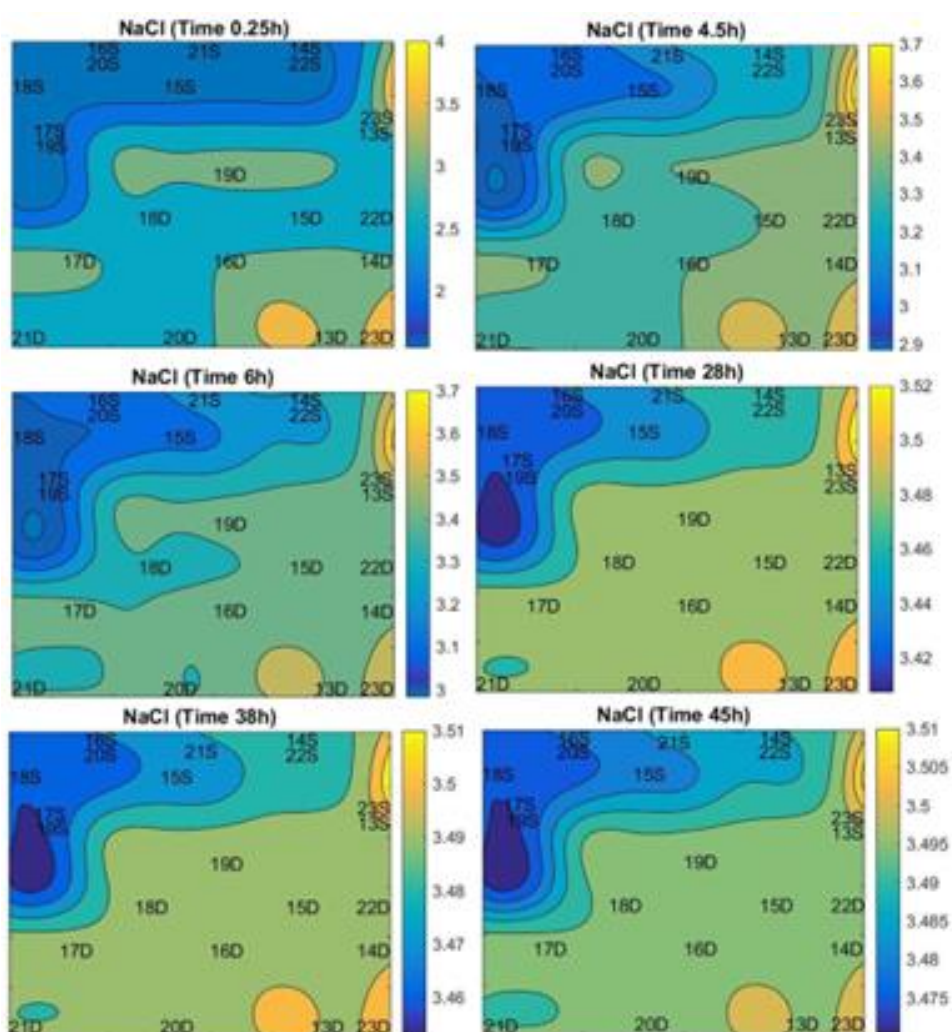
**Figura 10** - Mapas topológicos para a difusão de Na<sup>+</sup> (a e c) e K<sup>+</sup> (b e d). Os mapas (a) e (b) representam o eixo X e (c) e (d) eixo Z. O sistema Estático está representado pela letra S e Dinâmico pela letra D.





se que houve separação dos dados obtidos entre o sistema estático e o dinâmico, nas posições estudadas durante a simulação da difusão do queijo Prato. Cada posição definida para o sistema estático apresentou valores de concentração mais baixos quando comparada com as concentrações das mesmas posições no sistema dinâmico. Esta observação indica que a influência do filme é mais acentuada no sistema estático, uma vez que as concentrações de espécies são menores do que as obtidas para a dinâmica, pois neste sistema a agitação da salmoura reduz a espessura do filme, e conseqüentemente a transferência de massa é mais eficaz (CREMASCO *et al.*, 2019).

**Figura 12** - Mapa topológico da difusão de NaCl na superfície do biossólido para o eixo Z em sistema estático (S) e dinâmico (D).



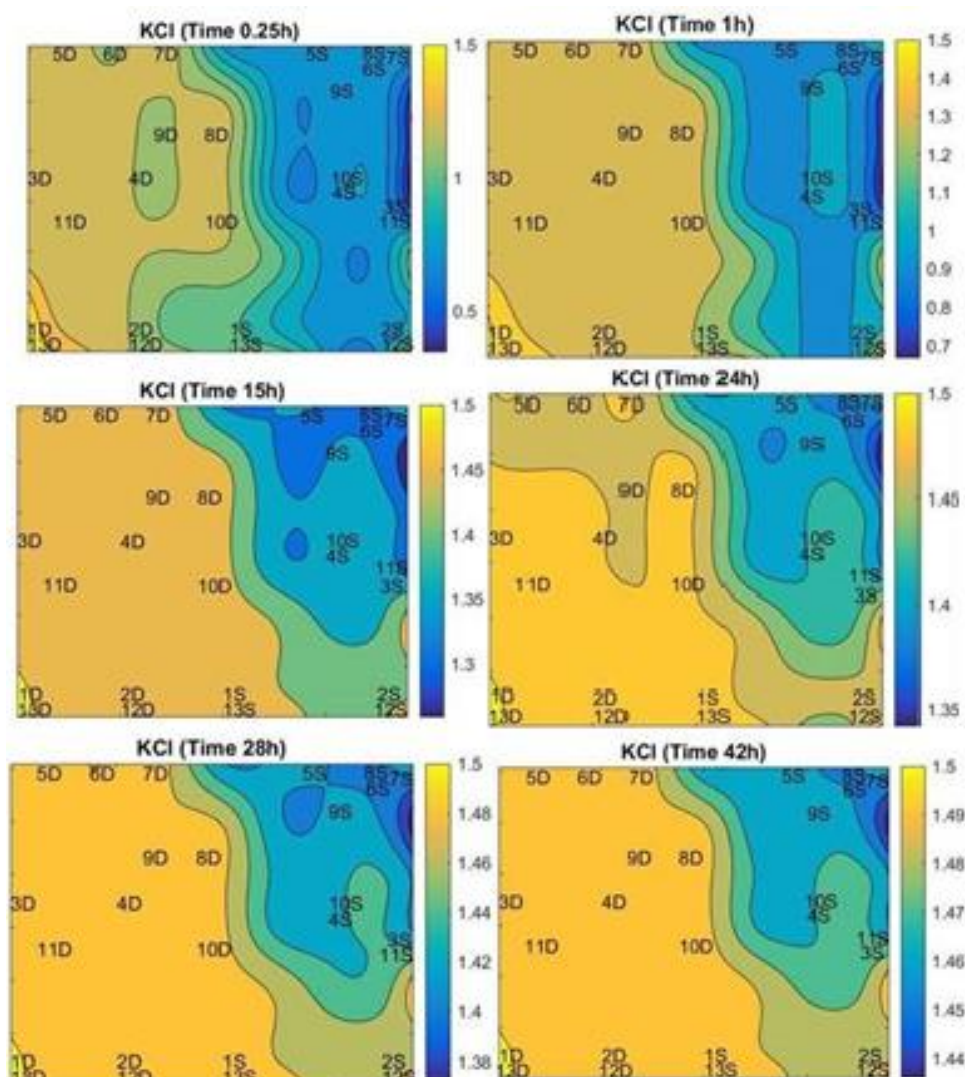
Fonte: Os autores.

Entre as posições estudadas, tanto nos eixos X e Z, observou-se que as posições 1, 13 e 23 apresentaram maiores concentrações. O biossólido é um bloco retangular e a difusão acontece mais rápido nas posições localizadas nas bordas do

queijo. Sugere-se que o filme formado é mais fino na extremidade e mais grosso na parte externa central. Nas posições 1, 13 e 23, o tempo correspondente a 0,25 horas de sal é suficiente para atingir a concentração de salmoura no sistema dinâmico e somente após 28 horas de salga o sistema estático atinge esse equilíbrio.

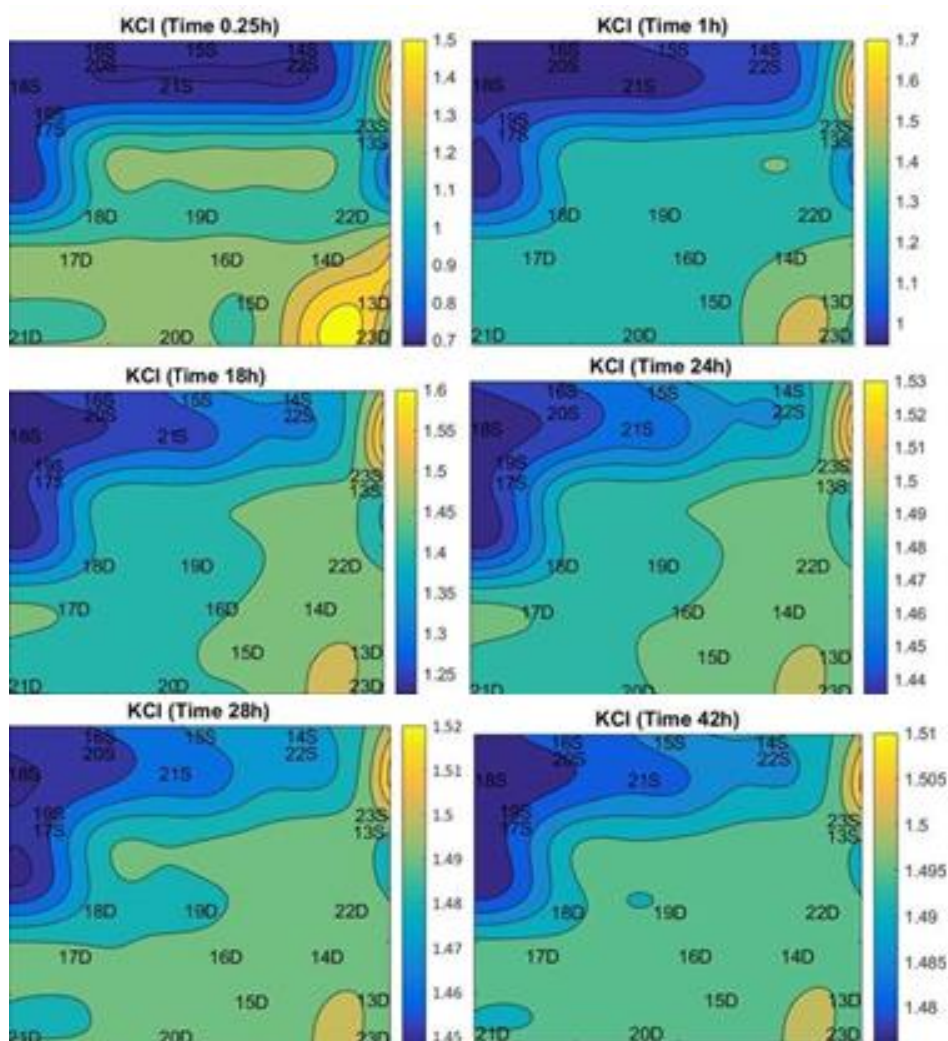
De acordo com as Figuras 11 e 12, observa-se uma diferença de concentração à medida que o tempo de difusão aumenta. A concentração  $\text{Na}^+$  no eixo X atingiu 85,7% e 50,0% de concentração de salmoura após 0,25 horas de sal no sistema dinâmico e estático, respectivamente. No eixo Z, a concentração de  $\text{Na}^+$  alcançou 85,7% e 64,3% no sistema dinâmico e estático, respectivamente. O  $\text{Na}^+$  atingiu 97,8% da concentração da salmoura em ambos os eixos após 28 horas e 97,1% após 6 horas de salmoura no sistema estático e dinâmico, respectivamente.

**Figura 13** - Mapa topológico da difusão de KCl na superfície do biossólido para o eixo X em sistema estático (S) e dinâmico (D).



Fonte: Os autores.

**Figura 14** - Mapa topológico da difusão de KCl na superfície do biossólido para o eixo Z em sistema estático (S) e dinâmico (D).



Fonte: Os autores.

Conforme a Figura 13, no eixo X, 9,00% do  $K^+$  atingiu a concentração de salmoura após 28 e 15 horas de salga no sistema estático e dinâmico, respectivamente. No eixo Z, 97,0% dos íons  $K^+$  atingiram concentração de salmoura após 24 horas no sistema estático e 18 horas no sistema dinâmico (Figura 14).

### 6.3 APLICAÇÕES PRÁTICAS

O processo de salga nas indústrias consiste em deixar o queijo na salmoura estática por 8 horas até difundir 2% (m/v) de sal no sólido. Estas 8 horas é para uma peça de queijo contendo um quilograma, porém, depende do seu volume e este processo não é linear, pois a partir de certo tempo, a quantidade de sal difundida se torna menor (FURTADO, 1991; SENAR, 2011). Neste trabalho, a temperatura, concentração de íons inicial da salmoura e o volume do queijo foram diferentes do que é utilizado pela indústria pois, realizou-se o experimento em pequena escala. Porém, com este estudo, verificou-se que é possível simular pelo método de elementos finitos situações que se aproximam do processo industrial, modulando o tempo e a quantidade de sal desejado, independente do volume do queijo desde que seja do tipo Mussarela ou Prato.

## 7 CONCLUSÃO

A otimização dos coeficientes principais, cruzados e  $h_m/\lambda_m$  foi realizada associando a otimização simplex com o método de elemento finito (MEF). A aplicação das redes neurais artificiais do tipo mapas auto-organizáveis mostrou-se uma ferramenta fácil e eficiente para avaliar o comportamento do filme formado na superfície do queijo, durante o processo de difusão por imersão em solução aquosa. As redes mostraram que o fenômeno da difusão influencia na transferência de massa e no tempo de salga do queijo Mussarela e Prato. Os mapas de peso das variáveis, sobrepostos nos mapas topológicos, permitiram avaliar que a difusão de íons é dificultada pelo filme formado na interface bio-sólido/solução, sendo minimizado com a agitação da salmoura.

## REFERÊNCIAS

- ALBARRACÍN, W. et al. Salt in food processing; usage and reduction: a review. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 46, p. 1329–1336, 2011.
- ANGILELLI, K. et al. Multicomponent Diffusion during Osmotic Dehydration Process in Melon Pieces: Influence of Film Coefficient. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, p. 329–337, 2015a.
- ANGILELLI, K. G. et al. Multicomponent diffusion during osmotic dehydration process in melon pieces: influence of film coefficient. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, n. 4, p. 329–337, 2015b.
- BARAT, J. M. et al. Kinetics studies during NaCl and KCl pork meat brining. **Journal of Food Engineering**, v. 106, p. 102–110, 2011.
- BITTAR, R. D.; ALVES, S. M. DE F.; MELO, F. R. Estimation of physical and chemical soil properties by artificial neural networks. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 3, p. 704–712, 2018.
- BONA, E. et al. Software for optimization using the sequential simplex method. **Acta Scientiarum**, v. 22, p. 1201–1206, 2000.
- BONA, E. et al. Difusão multicomponente durante a salga mista de queijo Prato. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, p. 394–400, 2005.
- BONA, E. et al. Simulation of NaCl and KCl mass transfer during salting of Prato cheese in brine with agitation: a numerical solution. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 24, n. 3, p. 337–349, 2007a.
- BONA, E. et al. Simulation of NaCl and KCl mass transfer during salting of Prato cheese in brine with agitation: a numerical solution. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 24, n. 3, p. 337–349, 2007b.
- BONA, E. et al. Selforganizing maps as a chemometric tool for aromatic pattern recognition of soluble coffee. **Acta Scientiarum Technology**, v. 34(1), p. 111–119, 2012.
- BORDIN, M. S. P. et al. Mathematical modeling of multicomponent NaCl and KCl diffusion process during the salting of pre-cooked champignon mushrooms. **Food chemistry**, v. 273, p. 99–105, 2019a.
- BORDIN, M. S. P. et al. Mathematical modeling of multicomponent NaCl and KCl diffusion process during the salting of pre-cooked champignon mushrooms. **Food Chemistry**, v. 273, p. 99–105, 2019b.
- BORSATO, D. et al. Application of artificial neural networks in the geographical identification of coffee samples. **European Food Research and Technology**, v. 233(3), p. 533–543, 2011.
- BORSATO, D. et al. Saline distribution during multicomponent salting in pre-cooked

quail eggs. **Food Science and Technology**, v. 32, n. 2, p. 281–288, 2012.

BORSATO, D. et al. Mathematical Modeling of the Film Influence on the Salting Time of Mozzarella Cheese in a Static and Dynamic System: Application of Artificial Neural Networks of the Multilayer Perceptron Type. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 33, p. 102–110, 2022.

CHUNG, T. J. **Finite element analysis in fluid dynamics**. [s.l: s.n.]. v. 78

CHUNG, T. J. Finite element analysis in fluid dynamics. **NASA STI/Recon Technical Report A**, v. 78, 1978b.

CLEMENTE, M. A. J. et al. Mathematical modeling of NaCl and KCl diffusion in mozzarella cheese using static and stirred brine. **Heat and Mass Transfer**, v. 56, p. 2203–2210, 2020.

COELHO, K. O. et al. Níveis de células somáticas sobre a proteólise do queijo Mussarela. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 13, p. 682–693, 2012.

CREMASCO, H. et al. Application of self-organising maps towards segmentation of soybean samples by determination of inorganic compounds content. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 1, p. 306–310, 2016.

CREMASCO, H. et al. Influence of film coefficient during multicomponent diffusion–KCl/NaCl in biosolid for static and agitated system using 3D computational simulation. **Food Science and Technology**, 2019.

DE PAULA, J. C. J.; DE CARVALHO, A. F.; FURTADO, M. M. Princípios básicos de fabricação de queijo: do histórico à salga. **Rev. Inst. Latic. “Cândido Tostes”**, v. 64, n. 367/368, p. 19–25, 2009.

DE RENSIS, C. M. V. B.; PETENATE, A. J.; & VIOTTO, W. H. Chemical composition, rheological and sensorial characterization of reduced fat Prato cheese. **Food Science and Technology**, v. 29, p. 488–494, 2009.

DERRINGER, G.; SUICH, R. Simultaneous Optimization of Several Response Variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, n. 4, p. 214–219, 1980.

FONSECA, H. A. R.; ZAMITH, T. P.; MACHADO, V. A. Relações entre o potássio da dieta e a pressão arterial. **Revista Brasileira de Hipertensão**, v. 22, n. 1, p. 9–12, 2015.

FURTADO, M. M. **A arte e a ciência do queijo**. [s.l.] Globo., 1991.

GALVAN, D. et al. Mathematical Modeling of the Transesterification Reaction by Finite Elements: Optimization of Kinetic Parameters Using the Simplex Sequential Method. **J. Braz. Chem. Soc**, v. 31, n. 2, p. 313–319, 2020.

GÓMEZ-SALAZAR, J. A.; CLEMENTE-POLO, G.; SANJUÁN-PELLICER, N. Review of mathematical models to describe the food salting process. **DYNA**, v. 82, n. 190, p. 23–30, 2015.

GUINEE, T. P. Salting and the role of salt in cheese. **International Journal of Dairy Technology**, v. 57, n. 2–3, p. 99–109, 2004.

HARKOUSS, R. et al. Development of a multi-physical finite element-based model that predicts water and salt transfers, proteolysis and water activity during the salting and post-salting stages of the dry-cured ham process. **Journal of Food Engineering**, v. 218, p. 69–79, 2018.

HARRINGTON, E. C. The desirability function. **Industrial Quality Control**, v. 21, n. 10, p. 494–498, 1965.

HAYKIN, S. **Neural Networks, a Comprehensive Foundation**. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 2001.

HE, F. J.; MACGREGOR, G. A. Beneficial effects of potassium on human health. **Physiologia Plantarum**, v. 133, p. 725–735, 2008.

IAL - Instituto Adolfo Lutz (São Paulo). Métodos físico-químicos para análise de alimentos. 1ª edição digital. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. p. 1020.

JANA, A. H.; MANDAL, P. K. Manufacturing and quality of mozzarella cheese: A review. **International Journal of Dairy Science** ., v. 6, p. 199–226, 2011.

KOHONEN, T. **Self-organizing maps**. [s.l.] Springer, 1995.

KOSIKOWSKI, F. **Cheese and fermented milk foods**. New York, NY.: FV Kosikowski and Associates., 1978.

KOVÁCS, Z. L. **Redes neurais artificiais**. [s.l.] Livraria da Física., 2002.

LAI, W. et al. Waterlogging risk assessment based on self-organizing map (SOM) artificial neural networks: a case study of an urban storm in Beijing. **Journal of Mountain Science**, v. 14, n. 5, p. 898–905, 2017.

LEE, J. D. **Química Inorgânica não tão consisa**. [s.l.] Blucher, 1999.

LEMES, M. R.; & DAL PINO, A. Periodic Table of the Elements in the Perspective of Artificial Neural Networks. **Journal of Chemical Education**, v. 88, n. 11, p. 1511–1514, 2011.

LEONARDI, J. G.; AZEVEDO, B. M. Métodos de conservação de alimentos. **Revista Saúde em Foco**, v. 10, n. 1, p. 51–61, 2018.

LINDSEY, R. et al. Deep neural network improves fracture detection by clinicians. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.**, v. 115, n. 45, p. 11591–11596, 2018.

MADDAH, H. et al. Prediction and modeling of MWCNT/Carbon (60/40)/SAE 10 W 40/SAE 85 W 90(50/50) nanofluid viscosity using artificial neural network (ANN) and self-organizing map (SOM). **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 134, n. 3, p. 2275–2286, 2018.

MARINHEIRO, M. F. et al. Qualidade microbiológica de queijo mussarela em peça e fatiado. **Semina: Ciências Agrárias.**, v. 36, n. 3, p. 1329–1334, 2015.

MARTELLI, A. Redução das concentrações de cloreto de sódio na alimentação visando a homeostase da pressão arterial. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 428–436, 2014.

MATTOS, J. B. et al. Mapeamento dos aspectos hidrogeoquímicos de águas subterrâneas a partir de estatística multivariada e redes neurais artificiais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 3, p. 501–514, 2019.

MONTEVERDE, N. L. S. et al. O excesso de sódio presente na alimentação da população brasileira: desafios e estratégias para reduzir o seu consumo. **Ling. Acadêmica**, v. 7, n. 5, p. 67–76, 2017.

NARIMATSU, A. et al. Avaliação da proteólise e do derretimento do queijo prato obtido por ultrafiltração. **Food Science and Technology**, v. 23, p. 177–182, 2003.

ONSAGER, L. Theories and problems of liquid diffusion. **Annals of the New York Academy of Science**, v. 46, n. 11, p. 241–265, 1945a.

ONSAGER, L. Theories and problems of liquid diffusion. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 46, n. 5, p. 241–265, 1945b.

PAZ, N. F. et al. Effect of pH at drainage on the physicochemical, textural and micro-structural characteristics of mozzarella cheese from goat milk. **Food Science and Technology**, v. 37, p. 193–201, 2017.

PERRY, K. S. P. Queijos: aspectos químicos, bioquímicos e microbiológicos. **Química Nova**, v. 27, n. 2, p. 293–300, 2004.

RAKOTONDRAMASY-RABESIAKA, L. et al. Estimation of effective diffusion and transfer rate during the protopine extraction process from *Fumaria officinalis* L. **Separation and Purification Technology**, v. 76, n. 2, p. 126–131, 2010.

RAUBER, T. W. **Redes neurais artificiais**. Universidade Federal do Espírito Santo, , 2005.

RODRIGUES, F. M. et al. Alternatives to reduce sodium in processed foods and the potential of high pressure technology. **Food Science and Technology**, v. 36, n. 1, 2016.

SAUER-LEAL, E.; OKADA, F. M.; PERALTA-ZAMORA, P. Caracterização físico-química de queijo prato por espectroscopia no infravermelho e regressão de mínimos quadrados parciais. **Química Nova**, v. 31, p. 1621–1625, 2008.

SCHWARTZBERG, H. G.; CHAO, R. Y. Solute diffusivities in leaching process. **Food Technology**, v. 36, n. 2, p. 73–86, 1982.

SENAR. QUEIJOS: Produção de derivados do leite. Em: 3. ed. Brasília: Serviço Nacional de Aprendizagem Rural., 2011. p. 100.

SILVA, H. L. A. et al. Sodium reduction and flavor enhancer addition in probiotic prato cheese: Contributions of quantitative descriptive analysis and temporal dominance of sensations for sensory profiling. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 10, p. 8837–8846, 2018.

SILVA, T. E.; GARCIA, L. G. C.; SANTOS, P. A. Estudo do comportamento de queijo Mussarela durante armazenamento refrigerado. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes.**, v. 74, n. 2, p. 135–148, 2019.

SPENDLEY, W.; HIMSWORTH, F. R.; HEXT, G. R. Sequential application of simplex designs in optimization and evolutionary operation. **Technometrics.**, v. 4, n. 4, p. 441–461, 1962.

VERRUMA-BERNARDI, M. R. et al. Elaboração do queijo Mozzarella de leite de búfala pelos métodos tradicional e da acidificação direta. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 20, n. 2, p. 138–144, 2000.

WALKOFF, A. R. et al. Self-organizing maps neural networks applied to the classification of ethanol samples according to the region of commercialization. **Orbital: The Electronic Journal of Chemistry**, v. 9, n. 4, p. 248–255, 2017.

WHELTON, P. K.; HE, J. Health effects of sodium and potassium in humans. *Nutrition and metabolism*. v. 25, p. 75–79, 2014.

WHO. **Guideline: Sodium intake for adults and children**. Geneva: World Health Organization (WHO), 2012a.

WHO. **Guideline: Potassium intake for adults and children**. Geneva: World Health Organization (WHO), 2012b.

ZHANG, Q. et al. Diffusion kinetics of sodium chloride in Grass carp muscle and its diffusion anisotropy. **Journal of Food Engineering**, v. 107, p. 331–318, 2011.

**ANEXOS**

# ANEXO I - ARTIGO 1: APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE STUDY OF MOZZARELLA CHEESE. SALTING.



## Application of artificial neural networks in the study of Mozzarella cheese salting

Talita Fogaça de OLIVEIRA<sup>1</sup>, Marco Aurélio Jeanegitz CLEMENTE<sup>2</sup>, Diego GALVAN<sup>3</sup>, Gustavo FOX<sup>1</sup>, Ana Carolina Gomes MANTOVAN<sup>1</sup>, Ivania MOREIRA<sup>1</sup>, Awacir Casanova ANDRELLLO<sup>2</sup>, Karina Benassi ANGILELLI<sup>1</sup>, Dionísio BORSATO<sup>1\*</sup>

### Abstract

A highly efficient tool that has stood out in data processing and treatment is Artificial Neural Networks (ANNs). Self-organized maps (SOM), which is a type of ANNs, are easy-to-view computational models that simulate information processing and knowledge acquisition. Applying this tool, we analyzed the behavior of the film formed on the mozzarella cheese surface when subjected to salting by immersion. In order to reduce the amount of NaCl in the food, KCl was used as a partial substitute in adequate amounts, without causing sensory changes in the cheese. The diffusion of salts in the brine is caused by the transfer of sodium and potassium ions, induced by concentration gradient of these salts inside and outside the food. The application of artificial neural networks proved to be an effective tool in the evaluation of the influence of the film on the diffusion process of Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> ions, in the mozzarella cheese salting.

**Keywords:** self-organized maps; salts diffusion; static brine; dynamic brine.

**Practical Application:** Stimulation of cheese salting processes providing interesting information for food industries.

### 1 Introduction

Since in the most diverse areas of science the amount of information produced is large, the extraction of information from the results of an experiment can become very difficult without using any data processing tool (Cremaşco et al., 2016). For this reason, there is a need for highly efficient methods and applications to treat the results. A tool that has been shown to be suitable for treatments, in data that have nonlinear behaviors, are the Artificial Neural Networks (ANNs) (Borsato et al., 2011; Bittar et al., 2018).

There are several types of neural networks, and among them the self-organizing maps (SOM) stands out. This tool is able to order multivariate data for similarities, turning a standard incident input of arbitrary size, in an uni or bidimensional discrete map (Haykin, 2001). SOM performs this transformation in a topologically ordered manner, based on an unsupervised learning algorithm (Cremaşco et al., 2016; Mattos et al., 2019).

In the last decades this tool has been gaining space in problems solving in different areas as in the investigation of the relative viscosity of multi-walled carbon nanotube (Maddah et al., 2018), prediction of chemical elements of the periodic table (Lemos & Dal Pino, 2011) and waterlogging risk assessment (Lai et al., 2017). Cremaşco et al. (2019) studied the application of artificial neural networks, SOM type, for the diffusion of inorganic ions in quail egg.

The phenomenon of salts diffusion leads to a balance through the solutes transfer that is induced by the difference in concentrations of salts located inside the food and in the brine (Gómez Salazar et al., 2015). Industrialized foods, such as Mozzarella cheese, are subjected to the salting process by

immersion, in which the salt spreads in the solid by mass diffusion mechanisms (Albarracín et al., 2011; Guinee, 2004).

During the salting process, a film forms on the surface of the solid and acts as an ion entrance barrier, which can be expressed numerically by the mass Biot number (Angilelli et al., 2015; Schwartzberg & Chao, 1982). According to Bordin et al. (2019) the higher the value of this parameter, the lower the influence of the formed film and the faster is the diffusion of salts into the food, reducing the salting time.

Cheeses make a significant contribution to sodium consumption which, when ingested in excess, can cause arterial hypertension (Rodrigues et al., 2015). Thus, in order to reduce the amount of sodium, potassium chloride has been used as a partial substitute up to 30%, since when added in adequate amounts it does not cause sensory changes in foods (Bordin et al., 2019; Horita et al., 2014; Rodrigues et al., 2015).

The objective of this work was to apply the methodology of Artificial Neural Networks (ANN), Self-Organizing Maps (SOM) type, to identify and investigate the behavior of inorganic components in samples of Mozzarella cheese, submitted to the salting process in brines, in the static and agitated system.

### 2 Materials and methods

#### 2.1 Mozzarella cheese and brine

The samples of mozzarella cheese used were produced according to Kostkowski (1978) and Furtado (1991). It was

Received 27 Apr., 2020

Accepted 09 July, 2020

<sup>1</sup>Departamento de Química, Universidade Estadual de Londrina - UEL, Londrina, PR, Brazil

<sup>2</sup>Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina - UEL, Londrina, PR, Brazil

\*Corresponding author: dborsato@uel.br

## ANEXO II - ARTIGO 2: APPLICATION OF SELF-ORGANIZING MAPS TO EVALUATE THE INFLUENCE AND BEHAVIOR OF THE FILM FORMED DURING OF PRATO CHEESE.



### Application of self-organizing maps to evaluate the influence and behavior of the film formed during salting of Prato cheese

Talita Fogaça de OLIVEIRA<sup>1</sup>, Marco Aurélio Jeanegitz CLEMENTE<sup>2</sup>, Diego GALVAN<sup>1</sup>, Gustavo FIX<sup>2</sup>, Ana Carolina Gomes MANTOVANI<sup>2</sup>, Dionísio BORSATO<sup>1\*</sup>

#### Abstract

Problems related to high blood pressure have led consumers to choose foods with low levels of sodium chloride, and an alternative to reduce the salt content of this salt is its partial replacement with KCl. In order to not affect the sensory properties of cheese, salting was performed using a solution containing 70% of NaCl and 30% of KCl in a static and dynamic system. During the salting process by immersion, the mass transfer is affected by the formation of a film on the cheese surface. The analysis of the diffusion of salts in the film can be performed using self-organizing map (SOM) combined with the Finite Element Method (FEM). Through these tools, a greater influence of the film was observed when the static system was applied and that the diffusion is different according to the studied position. On the biosolid sides the diffusion was more pronounced than in the center, indicating a decrease in the film thickness towards the edges. The SOM combined with 3D modeling showed to be an efficient tool to investigate the formation, influence and behavior of the film during the diffusion of Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> on salting of Prato cheese.

**Keywords:** neural networks; diffusion; finite element methods; simulation.

**Practical Application:** Simulation of situations that will be very useful for industries working with diffusive processes.

#### 1 Introduction

Currently, a direct relation between sodium content in food and its influence on blood pressure has led consumers to choose healthier products. Thus, the production of foods with low sodium content is necessary, but sodium chloride plays a fundamental role in the final quality of a product. Therefore, its total substitution is not recommended (Bordin et al., 2019). KCl can replace NaCl by up to 30% without affecting the acceptability of the final product. It is possible to replace part of the sodium chloride with potassium chloride, as this salt does not alter the sensory, physicochemical or microbiological characteristics of the product. In addition, potassium intake increases kidney excretion of sodium, resulting in an antihypertensive effect and also exhibits antimicrobial activity (Bordin et al., 2019; Borsato et al., 2012).

Cheese is a product widely used by Brazilians. The most consumed types are: Prato, Mozzarella, Minas and Parmesan. Among them, Prato cheese stands out for its high nutritional value. A homogeneous distribution of NaCl is essential for its final quality (Bona et al., 2006, 2010; Silva et al., 2017). Therefore, salting is an important step in cheesemaking, consisting of its immersion in brine, static or dynamic, in which the salt spreads into the solid by mass diffusion mechanisms (Albarracín et al., 2011; Guinee, 2004).

Studies on the physicochemical properties and characteristics of various cheeses have recently been conducted. Matera et al. (2018) studied the physicochemical characteristics of Brazilian

cheeses Salum et al. (2019) the compositional properties of enzyme-modified commercial cheeses, Puncoo et al. (2018) the textural and microstructural properties of Krati cheese and Rafiq et al. (2018) cheddar cheese peptide extracts in anticancer activity. Researches related to Prato cheese include the partial replacement of NaCl by KCl and the addition of flavor enhancers to the probiotic Prato cheese (Silva et al., 2018), the change in volatile compound concentration during the maturation of Prato cheese by reducing fat and adding whey protein (Domingos et al., 2019), and attenuation of cigarette smoke-induced lesions in mice by the probiotic Prato cheese (Vasconcelos et al., 2019).

According to Schwartzberg & Chao (1982), when a fluid is in contact with a solid, a film is formed on its surface. If there is a mass transfer between the surface and the fluid, the current must pass through the stationary layer, which acts as a resistive barrier, and therefore there is a specific diffusion coefficient that describes the mass transfer in this film. The question is that this coefficient cannot be determined only experimental, and so to evaluate the influence of the formed film it is necessary to take into account the ratio between the resistance to internal and external mass diffusivity that can be quantified by the Biot mass number. According to Bona et al. (2007), high values of the Biot number indicate that the internal resistance is limiting, and during the diffusion process as the Biot number decreases, the resistance of the film formed at the solid/solution interface increases (Rakotonandramay-Rabesiaka et al., 2010; Schwartzberg & Chao, 1982). Thus, the Biot number is related to the film

Received 19 Nov., 2019

Accepted 27 Jan., 2020

<sup>1</sup>Departamento de Química, Universidade Estadual de Londrina - UEL, Londrina, PR, Brazil

<sup>2</sup>Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina - UEL, Londrina, PR, Brazil

\*Corresponding author: dborsato@uel.br