

**UFRRJ INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**

TESE

Aspectos tecnológicos e nutricionais no desenvolvimento de pães e massas alimentícias integrais de milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) utilizando a tecnologia de extrusão termoplástica

Kênia Letícia Ferreira Pessanha

2021



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**

Aspectos tecnológicos e nutricionais no desenvolvimento de pães e massas alimentícias integrais de milho (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) utilizando a tecnologia de extrusão termoplástica.

KÊNIA LETÍCIA FERREIRA PESSANHA

Sob a orientação do professor

**Ph.D. Carlos Wanderlei Piler de
Carvalho e D.Sc. Cristina Yoshie
Takeiti**

Sob a coorientação da professora

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos, no Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Área de Concentração Tecnologia de Alimentos.

Seropédica, RJ

Outubro de 2021

P475a

Pessanha, Kênia Letícia Ferreira , 1987-
Aspectos tecnológicos e nutricionais no
desenvolvimento de pães e massas alimentícias
integrais de milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.)
utilizando a tecnologia de extrusão termoplástica /
Kênia Letícia Ferreira Pessanha. - Rio de Janeiro,
2021.
67 f.: il.

Orientador: Carlos Wanderlei Piler Carvalho.
Coorientadora: Cristina Yoshie Takeiti.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Tecnologia de Alimentos, 2021.

1. Extrusão termoplástica . 2. pão e pasta
alimentícia glúten-free. 3. Atividade
antihiperlipidêmica. 4. Alimentos funcionais. 5.
Capacidade antioxidante. I. Carvalho, Carlos
Wanderlei Piler, 1967-, orient. II. Takeiti, Cristina
Yoshie, 1974-, coorient. III Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Tecnologia de Alimentos. IV. Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS



TERMO Nº 512/2022 - PPGCTA (12.28.01.00.00.00.41)

Nº do Protocolo: 23083.029733/2022-72

Seropédica-RJ, 13 de maio de 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

KÊNIA LETÍCIA FERREIRA PESSANHA

Tese submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutora, no Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Área de Concentração em Ciência de Alimentos.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 12/11/2021

Dr. CARLOS WANDERLEI PILER DE CARVALHO, EMBRAPA(orientador)

Dra. ELISA HELENA DA ROCHA FERREIRA, UFRRJ

Dr. JOSE LUIS RAMIREZ ASCHERI, EMBRAPA

Dra. VIRGINIA MARTINS DA MATTA, EMBRAPA

Dr. FELIPE MACHADO TROMBETE, UFSJ

Conforme deliberação número 001/2020 da PROPPG

Documento não acessível publicamente

(Assinado digitalmente em 26/05/2022 09:59)
ELISA HELENA DA ROCHA FERREIRA
COORDENADOR CURS/POS-GRADUACAO - SUBSTITUTO
PPGCTA (12.28.01.00.00.00.41)
Matricula: 1806986

(Assinado digitalmente em 13/05/2022 13:31)
VIRGINIA MARTINS DA MATTA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 319.096.985-04

(Assinado digitalmente em 18/05/2022 14:00)
FELIPE MACHADO TROMBETE
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 092.685.916-18

(Assinado digitalmente em 16/05/2022 09:37)
CARLOS WANDERLEI PILER DE CARVALHO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 009.412.587-26

(Assinado digitalmente em 13/05/2022 11:04)
JOSE LUIS RAMIREZ ASCHERI
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 105.290.788-13

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número:
512, ano: **2022**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **13/05/2022** e o código de verificação: **90be117dal**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente Deus, pela sua infinita misericórdia, luz, força e graça para comigo, por me permitir concluir mais esta etapa da minha vida depois desse carrossel de emoções que foram estes 5 anos. Obrigada Senhor pelo amadurecimento, pela saúde, pela cura do covid-19, por todas as oportunidades e por nunca desistir de mim. Agradeço imensamente pelo gosto pelo estudo, pela oportunidade em sempre me aproximar de boas pessoas durante a vida que tanto me estimularam, desde as explicadoras na infância até os professores da faculdade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pela oportunidade concedida para realizar os estudos de pósgraduação.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pelo apoio, em especial ao meu Orientador Professor Carlos Piler, por acreditar em mim, mesmo quando no segundo ano do doutorado eu disse que iria trabalhar e por isso não teria mais uma dedicação exclusiva, porém, não iria desistir. Deu certo! Agradeço também a minha coorientadora Cristina Takeiti, por ser uma balança de equilíbrio e leveza durante este tempo. Obrigada professores, pelas dicas, pela paciência, pelos desafios, incentivos e por todo profissionalismo durante este tempo. Sei que vocês são pesquisadores, mas o título de professor me parece mais nobre rs!

A EMBRAPA Agroindústria de Alimentos, pelas instalações cedidas para a execução completa do presente estudo de doutorado e do mestrado. Foram no total 7 anos de convivência intensa e foi o lugar onde eu aprendi a fazer ciência.

Aos analistas e técnicos da planta piloto IV da EMBRAPA – Agroindústria de alimentos, Mariana Mattos, Francisco Carlos, Adriana Minguita, Neuri Menezes pela amizade, acolhida, orientação, contribuição e boa vontade durante as análises. Sempre digo que vocês não têm ideia da importância que tem para nós, estudantes.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Aos meus amigos queridos, o que seria de mim sem vocês? Mariana, Adriana (nosso caso já deixou de ser profissional a muito tempo, vocês são um presente), Aretha e Renan obrigada pela torcida, por acreditarem e se orgulharem de mim mesmo quando eu achava que não ia dar certo. Aos queridos companheiros do programa de pós-graduação Andrea, Marquito e João, olha, acho que podemos escrever um livro... A Maria Eugenia, Carol Caires e Amanda Martins pelas trocas e pela amizade, assim como a todos os estagiários que passaram pela planta de Cereais, as risadas e as conversas aleatórias tornaram tudo mais fácil.

Agradeço ao meu querido ex-chefe Vicente Nascimento pela oportunidade que me deste em trabalhar e aprender ao seu lado por estes quase 3 anos. Obrigada por acreditar em mim, no meu trabalho e por ter valorizado o meu doutorado.

A toda minha família por acreditar em mim, especialmente aos meus pais por me permitirem estudar desde sempre. A minha vó Letícia e meu vô Apolônio que nunca deixaram de me apoiar, assim como a minha tia Lenice, se ainda estivessem entre nós, estariam muito felizes com essa conquista.

As minhas queridas vizinhas de Paciência, Neuza e Maria, vocês foram a minha referência na infância, obrigada por me considerarem uma filha, vocês são mães para mim também!

Aos poucos e verdadeiros amigos pessoais, e a todos que de uma forma ou de outra colaboraram prontamente na execução deste trabalho, tornando possível sua realização, quero expressar minha gratidão.

*“Mas Deus escolheu as **coisas loucas deste mundo** para confundir as sábias e Deus escolheu as coisas fracas deste mundo para confundir as fortes”*

(I Coríntios 1.27)

RESUMO

PESSANHA, Kênia Letícia Ferreira. **Aspectos tecnológicos e nutricionais no desenvolvimento de pães e massas alimentícias integrais de milho (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) utilizando a tecnologia de extrusão termoplástica**. 2021. 67p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2021.

Novas fontes de alimentos têm sido exploradas com objetivo de proporcionar ao consumidor uma maior diversidade alimentar com teores nutricionais elevados. O milho (*Pennisetum glaucum*) é um cereal com alto teor de nutrientes como proteínas e compostos bioativos, e isento de glúten, sendo uma interessante opção de alimento para celíacos. No Brasil, apesar desta cultura estar adaptada às nossas condições agrícolas com cerca de 4 milhões de hectares plantados, sua produção é destinada apenas para alimentação animal e para cobertura vegetal. É um grão subutilizado na alimentação brasileira, possivelmente pela falta de conhecimento acerca dos benefícios nutricionais e dos produtos que podem ser elaborados com o grão. Massas alimentícias e pães elaborados a partir de farinha refinada são produtos alimentícios tradicionais com alta aceitabilidade, porém de elevado valor energético, alto índice glicêmico, baixos teores de fibra alimentar, minerais e vitaminas. Para elaboração de produtos de panificação e de pastifício é notória a importância das proteínas do glúten, nas quais são fundamentais na formação de rede, microestrutura e textura desses produtos, logo, quando ausentes, são necessários ingredientes ou processos que promovam tais características. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma massa alimentícia e um pão do tipo forma a partir de farinha integral de milho. A principal estratégia utilizada para suprir a ausência do glúten foi a utilização da extrusão termoplástica para a modificação da farinha integral de milho. A tese foi subdividida em três capítulos, no Capítulo I, foi elaborada uma revisão bibliográfica sobre cereais integrais, grãos de milho, produtos de panificação e de pastifício e mercado *gluten free*. No Capítulo II, foi desenvolvido um pão *gluten free* elaborado com 100% de farinha integral de milho a partir da mistura de farinha de milho crua (FMC) e farinha de milho pré-cozida (FMPC) por extrusão. Os pães produzidos com FMPC:FMC (50:50) apresentaram características físicas semelhante aos pães integrais comerciais. O uso da extrusão aumentou a capacidade antioxidante ($215,2 \pm 1,9 \mu\text{M Trolox/g}$) e a inibição enzimática da α -glicosidase ($96,31 \pm 0,005\%$) em relação ao produto elaborado a partir da farinha crua. No Capítulo III foi desenvolvida uma massa alimentícia do tipo *fusilli* com 100% de farinha integral de milho a partir da mistura de farinha de milho crua (FMC) e farinha de milho pré-cozida (FMPC) por extrusão. As massas de *fusilli* formadas pela mistura de farinhas crua e pré-cozida (FMPC:FMC) exibiram melhor integridade, apresentando características satisfatórias, se comparada às massas comerciais integrais *gluten free*. Quanto aos parâmetros de textura, massas com FMPC:FMC apresentaram valores mais elevados do que as com FMC, se aproximando das massas alimentícias comerciais. A capacidade antioxidante (DPPH e FRAP), fenólicos totais e a atividade antihiperlipidêmica foi maior para FMPC:FMC do que para macarrões preparados somente com FMC. O índice de aceitabilidade (IA) do produto preparado com farinha FMPC:FMC foi de 66%. De acordo com os avaliadores, a textura é a característica que mais precisa ser melhorada. Dessa forma, a utilização de farinhas de milho pré-cozidas por extrusão termoplástica pode ser uma alternativa na elaboração de produtos de panificação e de pastifício isentos de glúten e com melhores propriedades funcionais.

Palavras-chave: Extrusão termoplástica, glúten, pão, pasta alimentícia

ABSTRACT

PESSANHA, Kênia Letícia Ferreira. **Technological and nutritional aspects in the development of whole millet bread and pasta (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) using thermoplastic extrusion technology.** 2021. 67p. Thesis (PhD in Food Science and Technology). Technology Institute. Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2021

New food sources have been explored to provide the consumer with greater food diversity with high nutritional contents. Millet (*Pennisetum glaucum*) is a cereal with a high content of nutrients such as proteins and bioactive compounds, and also free from gluten, making it an interesting food option for celiacs. In Brazil, although this crop is adapted to our agricultural conditions with about 4 million hectares planted, its production is intended only for animal feed and for plant coverage. It is an underutilized grain in Brazilian food, possibly due to the lack of knowledge about the nutritional benefits and the products that can be made with the grain. Pasta and bread made from refined flour are traditional food products with high acceptability, but with high energy value, high glycemic index, low levels of dietary fiber, minerals and vitamins. For the elaboration of bakery and pasta products, the importance of gluten proteins is notorious, which are fundamental in the formation of a network, microstructure and texture of these products, therefore, when absent, ingredients or processes that promote such characteristics are necessary. The objective of this work was to develop a pasta and a loaf bread made from whole millet flour. The main strategy used to make up for the absence of gluten was the use of thermoplastic extrusion to modify the whole millet flour. The thesis was subdivided into three chapters, in Chapter I, an extensive bibliographical review was elaborated on whole grains, millet grains, bakery and pastry products and gluten free market. In Chapter II, a gluten free bread made with 100% whole millet flour from a mixture of raw millet flour (RMF) and pre-cooked millet flour (PCMF) by extrusion was developed. Breads produced with PCMF:RMF (50:50) had physical characteristics similar to commercial wholegrain breads. The use of extrusion increased the antioxidant capacity ($215.2 \pm 1.9 \mu\text{M Trolox/g}$) and the enzymatic inhibition of α -glucosidase ($96.31 \pm 0.005\%$) in relation to the product made from raw flour. In Chapter III, a fusilli-type pasta was developed with 100% whole millet flour from a mixture of raw millet flour (RMF) and pre-cooked millet flour (PCMF) by extrusion. The fusilli pasta formed by the mixture of raw and pre-cooked flours (PCMF:RMF) exhibited better integrity, presenting satisfactory characteristics, when compared to commercial gluten free integral pasta. As for the texture parameters, pasta with RMF:PCMF presented higher values than those with RMF, approaching commercial pasta. Antioxidant capacity (DPPH and FRAP), total phenolics and antihyperglycemic activity were higher for RMF:PCMF than for pasta prepared with only RMF. The acceptability index (AI) of the product prepared with RMF:PCMF flour was 66%. According to the evaluators, texture is the characteristic that most needs to be improved. Thus, the use of pre-cooked millet flours by thermoplastic extrusion can be an alternative in the preparation of gluten-free bakery and pasta products with better functional properties.

Keywords: Thermoplastic extrusion, gluten, bread, pasta

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I – REVISÃO DE LITERATURA

Figura 1.1. Diagrama longitudinal do grão de milheto pérola. Adaptado de Taulor, (2016).....6

Figura 1.2. Formação da rede protéica do glúten. Adaptado de Fassano, (2011).14

CAPÍTULO II - IMPACT OF WHOLE MILLET EXTRUDED FLOUR ON THE PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND ANTIHYPERGLYCEMIC ACTIVITY OF GLUTEN FREE BREAD

Figure 2.1. Breads developed with 100% row millet flour, pre-cooked flour and 50:50 pre - cooked and raw flour. (A) digital photograph of the integral bread millet with 100% row flour, (B) digital photograph of the integral bread millet with 100% pre-cooked flour, (C) digital photograph of the integral bread millet with 50:50 pre-cooked and raw flour, (D) digital photograph commercial whole wheat bread, (E) digital photograph commercial whole grain gluten free bread37

CAPÍTULO III - DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE MASSA ALIMENTÍCIA INTEGRAL DE MILHETO (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) COMO ALTERNATIVA DE ALIMENTO GLÚTEN FREE

Figure 3.1 Flours and pasta developed from Millet grains. (A) raw millet flour (RMF), (B) precooked Millet flour (PCMF). (C) dry pasta produced with RMF, (D) dry pasta produced with RMF:PCMF (50:50), (E) cookeed pasta produced with RMF, (F) cooked pasta produced with RMF:PCMF (50:50), (G) mix (PCMF and eggs) to prepare the pasta, (H) cooked pasta produced with PCMF53

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II – IMPACT OF WHOLE MILLET EXTRUDED FLOUR ON THE PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND ANTIHYPERGLYCEMIC ACTIVITY OF GLUTEN FREE BREAD

Table 2.1. Amylose and amylopectin content and *in vitro* antihyperglycemic activity (α glycosidase) of millet-based breads.....36

Table 2.2. Analysis of the texture profile, volume and height of millet-based breads.....36

Table 2.3. Antioxidant capacity by DPPH and FRAP methods, total TCP concentration and nutritional composition of millet-based breads.....36

CAPÍTULO III - DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE MASSA ALIMENTÍCIA INTEGRAL DE MILHETO (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br) COMO ALTERNATIVA DE ALIMENTO GLÚTEN *FREE*

Table 3.1. Characterization of millet-based pasta.....56

Table 3.2. Antioxidant capacity by DPPH and FRAP methods, total phenolic content (TPC) and *in vitro* antihyperglycemic activity (α -glycosidase) of millet-based pasta...60

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
OBJETIVO GERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO I	4
REVISÃO DE LITERATURA	4
1.CEREAIS: UMA VISÃO GERAL NO BRASIL E NO MUNDO	5
1.1.Milheto	5
1.1.1. Cultivo	6
1.1.2.Composição química	7
1.1.3.Principais benefícios à saúde do milheto.....	9
1.2.Farinhas integrais de cereais.....	10
1.2.1.Produtos alimentares à base de farinhas integrais de milheto	10
1.3.Mercado dos produtos <i>glúten-free</i>	13
2.EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA.....	14
3.REFERÊNCIAS	17
CAPÍTULO II	28
IMPACT OF WHOLE MILLET EXTRUDED FLOUR ON THE PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND ANTIHYPERGLYCEMIC ACTIVITY OF GLUTEN FREE BREAD	28
RESUMO	29
ABSTRACT	30
1.INTRODUCTION	31
2.MATERIAL AND METHODS.....	32
2.1.Materials	32
2.2.Millet bread preparation	32
2.3.Amylose and amylopectin content	33
2.4.Analysis of the texture profile of bread	33
2.5.In vitro antihyperglycemic activity of bread	33
2.6.Antioxidant capacity.....	33
2.6.1.Sample preparation	33
2.6.2.Free radical sequestration method (DPPH)	34
2.6.3.Ferric Reduction Antioxidant Power (FRAP)	34
2.6.4.Determination of total phenolic content (TPC)	34
2.7.Determination of volume and height.....	34
2.8.Determination of nutritional composition	34
2.9.Statistical analysis	34
3.RESULTS AND DISCUSSION.....	34
3.1.Millet bread preparation	34
3.2.Amylose and amylopectin content	37
3.3.In vitro antihyperglycemic activity of millet bread.....	38
3.4.Analysis of the texture profile of bread	38
3.5.Antioxidant capacity.....	39
4.CONCLUSION	40
5.REFERENCES	41
CAPÍTULO III	45

WHOLE MILLET (<i>Pennisetum glaucum</i> (L.) R.Br) PASTA-BASED USING THERMOPLASTIC EXTRUSION:A GLUTEN FREE FOOD ALTERNATIVE.	45
RESUMO.....	46
ABSTRACT	47
1.INTRODUCTION	48
2.2.Moisture detection	49
2.3.Millet pasta preparation	49
2.4.Cooking test.....	49
2.5.Analysis of the texture profile of pasta.....	50
2.6.In vitro antihyperglycemic activity of pasta	50
2.7.Antioxidant capacity.....	50
2.7.1.Sample preparation	50
2.7.3.Ferric Reducing Antioxidant Power method (FRAP)	51
2.7.4.Determination of total phenolic content (TPC)	51
2.8.Instrumental color analysis	51
2.9.Sensory analysis	51
2.10.Statistical analysis	52
3.RESULTS AND DISCUSSION.....	52
3.1. Millet pasta preparation.....	52
3.2.Cooking test.....	54
3.3.Analysis of the texture profile of pasta.....	57
3.4.Antioxidant capacity.....	58
3.5.In vitro antihyperglycemic activity of millet pasta.....	58
3.6.Instrumental color analysis.....	59
3.7.Sensory analysis	61
4.CONCLUSION	61
5.REFERENCES	63
CONCLUSÃO GERAL	69

INTRODUÇÃO GERAL

Pães e massas são produtos tradicionais incorporados à cozinha brasileira ao final do século XIX. No entanto, relatos históricos indicam que populações indígenas no Brasil preparavam pães a partir da mandioca. As massas alimentícias são produtos de preparo rápido de alta aceitabilidade e os pães são um dos alimentos mais importantes da humanidade desde a pré-história. Normalmente, estes produtos são elaborados a partir de trigo (*Triticum spp*) e adicionados de outros ingredientes. De modo geral, por serem elaborados com farinhas refinadas possuem elevado valor energético, porém um baixo valor nutricional em termos de minerais, vitaminas e fitoquímicos, como os ácidos fenólicos.

A possibilidade de produzir novos alimentos a partir de cereais diferentes do trigo, ricos nutricionalmente e de baixo custo, tem despertado o interesse da população e de pesquisadores. Atualmente, a nova consciência alimentar somada a um novo estilo de vida e o aumento no número de restrições alimentares crônicas tem direcionado a indústria alimentícia na busca e desenvolvimento de alimentos com alto valor nutricional e isentos de alérgenos como o glúten. Além disso, com a pandemia do Covid-19, os consumidores têm buscado alimentos dentro do seguimento *all natural*, *no additives*, *clean label*, orgânicos, fermentação natural, minimamente processados, sustentáveis e/ou carbono zero (LIMA et al., 2021).

No Brasil, o número de indivíduos obesos cresceu 60% nos últimos 10 anos, atribuído à redução do consumo de ingredientes básicos e tradicionais, ao aumento da ingestão de alimentos processados e ao sedentarismo. Esses hábitos impactam diretamente no avanço das doenças crônicas como a hipertensão arterial e o diabetes, em que mais de 25% da população adulta apresenta algum destes diagnósticos (BRASIL, 2017). Fatores como escolaridade e orçamento familiar atuam fortemente na escolha de alimentos, segundo a Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF 2017-2018), e os gastos com a alimentação têm se tornado inferior a itens como moradia (IBGE, 2017). Diante do cenário preocupante, o Ministério da Saúde recomenda que alimentação saudável aliada à prática de exercícios físicos são primordiais para o combate dessas enfermidades (BRASIL, 2017).

O processo de extrusão termoplástica é uma alternativa viável para o desenvolvimento de produtos alimentícios devido à facilidade de produção industrial, quando comparado a processos tradicionais, pois apresenta baixa pegada hídrica e de energia, propicia a inativação de enzimas, a redução de antinutrientes e da população microbiana pelo efeito conjugado dos fatores térmico, mecânico e pressão promovidos pela extrusora e que resultam em um baixo tempo de residência dos produtos no interior do equipamento (TEBA; ASCHERI; CARVALHO, 2009).

A extrusão termoplástica promove a transformação das características físicas, químicas e nutricionais dos alimentos tais como a destruição parcial ou completa da estrutura semicristalina, fragmentação molecular dos polímeros de amido e desnaturação proteica, melhorando a digestibilidade, plastificação, expansão do material e possibilitando a criação de novas formas e texturas. Muitas dessas modificações são fundamentais para a formação de uma matriz uniforme em produtos sem glúten (TEBA; ASCHERI; CARVALHO, 2009; CASTELLS et al., 2005; RAI, 2008).

O milho da espécie *Pennisetum glaucum* (L.) R.Br. é um cereal com teor de nutrientes equivalentes ou até superiores a outros cereais (BALASUBRAMANIAN; KAUR; SINGH, 2014; ZHANG; HAMAKER, 2012). O grão é rico em fibra alimentar e polifenóis que além do valor nutritivo podem reduzir a ocorrência do aparecimento de distúrbios lipídicos, doenças cardiovasculares, hiperglicemia, retardo do esvaziamento gástrico, entre outros (GUPTA; SRIVASTAVA; PANDEY, 2012; SALEH et al., 2013; KRISHNAN et al., 2011). Porém, apesar destes benefícios, o milho é ainda um cereal subutilizado em muitos países, entretanto consumido diretamente na dieta da população da Índia e da Nigéria.

O potencial do milho na alimentação humana foi evidenciado em trabalhos anteriores desenvolvidos por nosso grupo de pesquisa, especialmente no trabalho de Dias-Martins *et al.* (2018). Além disso, as diversas possibilidades do uso do milho na alimentação foi extensamente discutido e explorado no trabalho de tese de doutorado de Dias-Martins (2019). Posteriormente, foi desenvolvido por Comettant-Rabanal *et al.* (2021) um pão sem glúten utilizando a tecnologia de extrusão termoplástica como pré-tratamento para farinhas de grãos inteiros, incorporados com milho germinado.

Sendo assim, nesta tese foram elaborados uma massa alimentícia e um produto de panificação obtidos totalmente a partir de farinha integral de milho, com propriedades físicas compatíveis com a de um produto tradicional, com elevada capacidade antioxidante, baixo índice glicêmico e isento de glúten, utilizando a tecnologia de extrusão termoplástica. O presente trabalho está organizado em capítulo sendo estes, um artigo publicado e outro a ser submetido à publicação em revista científica.

No Capítulo I foi realizada uma revisão de literatura sobre os principais cereais consumidos na alimentação humana, o milho, o mercado de produtos glúten-free, as farinhas integrais de cereais, pães e massas alimentícias e o processamento de extrusão termoplástica.

O Capítulo II descreve a produção de um pão feito com 100% de farinha de milho integral, variando-se a proporção de farinha crua e extrudada utilizadas. As propriedades físicoquímicas, capacidade antioxidante e índice glicêmico foram comparadas com um pão comercial sem glúten.

O Capítulo III descreve a produção de uma massa alimentícia do tipo *fusilli* baseada na utilização de 100% de farinha integral de milho, avaliando-se as propriedades físicas compatíveis com um alimento tradicional, com elevada capacidade antioxidante, baixo índice glicêmico, isento de glúten e com boa aceitabilidade sensorial utilizando a tecnologia de extrusão termoplástica.

OBJETIVO GERAL

Desenvolver produtos de panificação e de pastifício à base de farinha integral de milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br) utilizando a tecnologia de extrusão termoplástica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir pães utilizando 100% de farinha integral de milheto, variando a proporção de farinha *in natura* e extrudada, com características sensoriais e propriedades físicoquímicas semelhantes ao pão comercial sem glúten.
- Produzir massas alimentícias utilizando 100% de farinha integral de milheto, variando a proporção de farinhas *in natura* e extrudadas, com características sensoriais e propriedades físico-químicas semelhantes as massas alimentícias comerciais sem glúten.
- Determinar a atividade antihiperglicêmica dos produtos de panificação e pastifício obtidos.

CAPÍTULO I
REVISÃO DE LITERATURA

1. CEREAIS: UMA VISÃO GERAL NO BRASIL E NO MUNDO

Cereal é qualquer fruto ou semente comestível da família *Poaceae* que pode ser utilizado como alimento. Gramíneas são plantas herbáceas que apresentam flores pequenas e frutos secos chamados grãos ou “cariopses” e compreendem cerca de 8000 espécies. As cariopses podem ser *nuas*, apresentando somente o gérmen, o endosperma e a membrana da semente, como no caso do trigo e milho, ou *revestida*, com a mesma estrutura revestida de uma casca, a exemplo do arroz e sorgo (TAKEITI, 2017).

Os principais cereais utilizados na alimentação humana e animal são trigo, arroz, milho, cevada, aveia, centeio e sorgo, mas existem outros menos utilizados como o milheto, o triticale, a espelta e os pseudocereais, como o amaranto e a quinoa. O principal uso dos cereais é para a fabricação de farinha destinada a panificação e para o consumo direto, já as fibras e farelos para a fabricação de ração animal (TAKEITI, 2017).

Dentre os cereais, o trigo é um destaque pois é um dos poucos cereais cuja farinha é capaz de formar uma massa viscoelástica quando em mistura com água, porém, dos cerca de 30 tipos de trigo existentes geneticamente diferenciados, só metade é cultivada (o restante cresce de forma silvestre) e destas, apenas três espécies representam mais de 90% do trigo cultivado no mundo, sendo cada uma mais adequada a um tipo de alimento. O *Triticum aestivum* (trigo comum) é o mais cultivado no planeta, respondendo por mais de 4/5 da produção mundial. Em relação à farinha de trigo, a mais usada no Brasil para produtos panificáveis e demais produtos é a Tipo 1 ou especial, produzida a partir da moagem do endosperma do grão com um mínimo de farelo, sendo 56% utilizada para a produção de pães e 15% para massas (ABITRIGO, 2017).

Por conterem grande quantidade de carboidratos, os cereais são a principal fonte de energia ingerida pelos seres humanos. Possuem em sua constituição água, proteínas, lipídios, fibras e minerais (EMBRAPA, 2017), quando integrais, são também fonte de fitoquímicos, oligossacarídeos e amido resistente e, portanto, podem ser definidos como alimentos prebióticos (SHAH, 2001; MIDRULA; SHARMA, 2015).

Em 2020 a produção mundial de cereais foi próxima de 2,710 bilhões de toneladas (FAO, 2017a). O Brasil é o quarto maior produtor de cereais do mundo e o segundo maior exportador do mundo, com 19% do mercado internacional (EMBRAPA, 2021).

1.1. Milheto

O milheto é uma cultura de cereais pertencentes à família *Poaceae*. O prefixo "mille" significa mil e indica que um punhado tem milhares de grãos (TAYLOR; EMMAMBUX, 2008; ADEBIYI, et al., 2016a). Embora existam várias espécies de milheto como *Eleusine coracana*, *Setaria itálica*, *Panicum miliaceum*, *Panicum sumatrense*, *Echinochloa crus-galli* e *Paspalum scrobiculatum* (ADEBIYI et al., 2016a; FAO, 1995), o *Pennisetum glaucum* (Bajara ou milheto-pérola (MP)), compreende quase a metade da produção mundial (JUKANTI et al., 2016; FAO, 2017b).

É provável que o milheto tenha origem africana e há cerca de 2000 anos tenha sido levado para a Índia, onde devido à sua tolerância à seca se estabeleceu nos ambientes mais severos (FAO, 1995). Acredita-se que seja cultivado desde o estabelecimento da civilização humana (SHOBANA et al., 2013).

A planta do *P. glaucum* tem formato ereto entre 0,5 e 4 m de altura, possui crescimento rápido e ciclo anual de verão para o cultivo de 75 a 120 dias. Desenvolve-se na forma de panículas cilíndricas e rígidas com 2 a 3 cm de largura e 15 a 60 cm de comprimento. Cada planta produz de 500 a 2000 sementes, que podem ser quase brancas pérola ou possuir

tons mais escuros (FAO, 1995; DURÃES; MAGALHÃES; SANTOS, 2003; TAYLOR, 2016).

Há grande variação genética na forma do grão de milho, em geral possui formato ovoide com cerca de 3 a 4 mm de comprimento e peso de 1000 sementes de aproximadamente 8 g (FAO, 1995). O pericarpo do milho tem espessura variável, correspondendo a 8% da massa total de grãos (Figura 1). Esta cultivar possui um gérmen grande (17% da massa do grão) e endosperma menor, o que afeta a composição química do grão. O endosperma contém principalmente grânulos de amido e proteína com pequena quantidade de lipídios e fibra, sendo dividido em dois componentes principais: o endosperma do tipo *floury* (macio ou farinhento) que apresenta grânulos de amido de textura macia e o endosperma do tipo córneo (vítreo ou duro) com grânulos de amido menos propensos a deterioração, ataque de doenças ou insetos e intempéries (TAYLOR, 2016; RAI et al., 2008). De acordo com Rai et al., (2008) os grãos do endosperma do tipo *floury* são mais digeríveis do que os do tipo córneos, sendo mais desejáveis em alguns tipos de produtos alimentícios.

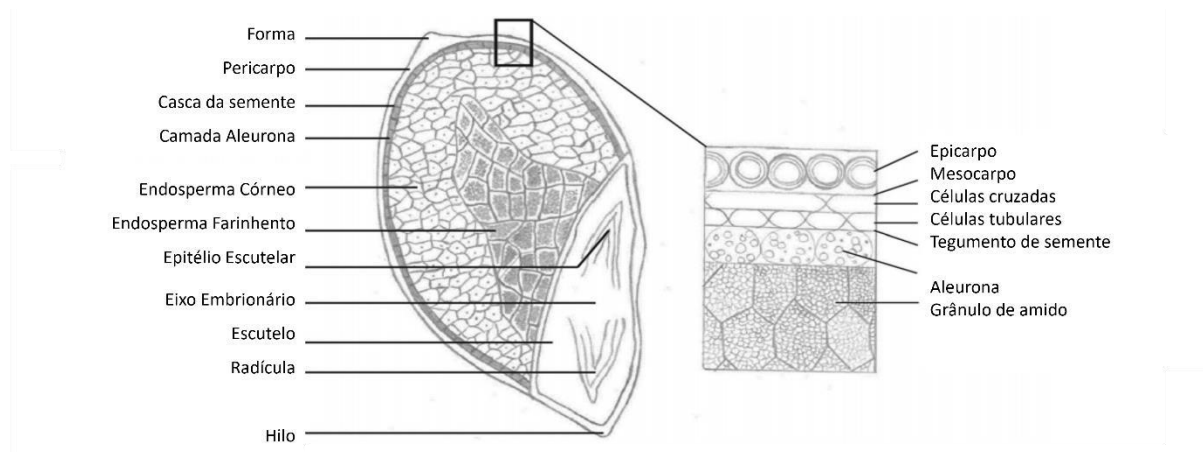


Figura 1.1. Diagrama longitudinal do grão de milho-pérola. Adaptado de Hassan; Sebola; Mabelebele, (2021).

O milho é uma das culturas cerealíferas mais significativas nos trópicos e em nações em desenvolvimento (ADEBIYI et al., 2016a) sendo documentado como rico em fitoquímicos como as flavonas miricetina e apigenina e em ácidos fenólicos como os ácidos ferúlico e gálico, aminoácidos contendo enxofre e minerais como o cálcio e ferro (ODUSOLA; ILESANMI; AKINLOYE, 2013; ADEBIYI et al., 2016b; SHAHIDI; CHANDRASEKAR, 2013). Porém, apesar da sua importância, a produtividade para o consumo humano em geral é baixa, sendo quase inteiramente uma cultura de subsistência. É cultivado em geral por pessoas de baixa renda em nações com baixo índice de desenvolvimento humano e o seu potencial inexplorado ainda é vasto (MACAULEY, 2015; BALASUBRAMANIAN; KAUR; SINGH, 2014; BALASUBRAMANIAN et al., 2014).

1.1.1. Cultivo

O milho é a sexta cultura de cereal mais importante do mundo depois do trigo, arroz, milho, cevada e sorgo, com uma produção mundial em 2019 de mais de 28 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2019; ROUAMBA, 2021). É utilizado para alimentos, combustível e no desenvolvimento de ração animal devido ao seu alto teor protéico, lipídico

e baixa incidência de micotoxinas (FAO 1995; GUIMARÃES; GONÇALVES; RODRIGUES, 2009). Em especial, as aflatoxinas são um contaminante comum dos cereais podendo causar câncer, doença hepática, supressão imunológica e morte, dependendo do nível e da duração da exposição. Segundo Bandyopadhyay, Kumar e Leslie (2007) a contaminação por micotoxinas no milheto é inferior ao do milho e do sorgo. A substituição do milho por milheto poderia reduzir em até 8 vezes o risco de problemas relacionados à aflatoxina.

Além disso, o custo do milheto é inferior ao do milho sendo em média R\$ 61,80/saca de 60 kg frente ao milho debulhado que custa em média R\$ 71,40 a saca de 60 kg (ECONOMIA-GO, 2021).

Os principais produtores mundiais de milheto são a Índia, a Nigéria e a China, responsáveis por 55 % da produção global (FAOSTAT, 2019). No Brasil, os primeiros relatos de seu cultivo apareceram no Rio Grande do Sul em 1929. Na década de 90, o milheto passou a ser utilizado como planta de cobertura no sistema de plantio direto e obteve destaque e expansão no cerrado brasileiro com uma produtividade de grãos que varia de 500 a 1.500 kg ha⁻¹ (PEREIRA et al., 2003; EMBRAPA, 2016). O milheto é mais tolerante à seca do que o sorgo e é o segundo cereal mais tolerante à salinidade após a cevada devido à presença de um sistema radicular extenso que permite alta extração de água e nutrientes das camadas mais profundas do solo, conseguindo produzir e sobreviver com requisitos mínimos de água de 300 mm anuais (RAI et al., 2008; TAYLOR, 2016; FAO, 2017b). Como planta de cobertura, o milheto promove a liberação de nutrientes na superfície do solo e reduz a sua temperatura, melhorando a retenção de água (HECKLER; SALTON, 2002).

Devido a sua rusticidade, o cultivo pode ocorrer em ambientes severos com recursos hídricos limitados e geralmente sem aplicação de fertilizantes ou outros insumos, normalmente sob tais condições outras culturas crescem ou rendem mal (BALASUBRAMANIAN et al., 2014; FAO, 1995). As exigências térmicas e hídricas ideais para a germinação são temperaturas noturnas médias entre 15 e 28 °C e uma precipitação média de 30 mm de água. O ciclo do milheto é de aproximadamente 130 dias, mas quando utilizado na safrinha floresce precocemente em torno de 50 dias (EMBRAPA, 2016). Por estes motivos, o milheto pode ser considerado um alimento de subsistência, apresentando um potencial significativo para diversidade genética garantindo a segurança alimentar e nutricional (ADEBIYI et al., 2016).

Previsões apontam que em 2050, além do aumento populacional em 34%, as mudanças climáticas afetarão adversamente a segurança alimentar aumentando drasticamente os preços dos cereais tradicionais como o milho (FAO, 2017c). Dessa forma, o milheto seria uma importante alternativa para a produção de alimentos.

1.1.2. Composição química

O milheto é uma cultura rica com relação ao teor de proteínas, gorduras, energia, fibras e minerais (SALEH et al., 2013). Possui vitaminas do complexo B (B1, B2 e B3) localizadas na camada aleurona e gérmen e vitamina E localizada no gérmen. O teor de gorduras é em média de 5,1 g/100 g, contém ácidos graxos poliinsaturados, especialmente o milheto-pérola, com maior prevalência do ácido linoléico (43-45%) presente no gérmen (TAYLOR, 2016; MUTHAMILARASAN et al., 2016; SALEH et al., 2013).

O grão contém elevado teor de polissacarídeos não amiláceos (MUTHAMILARASAN et al., 2016), que representam cerca de 95% da fibra alimentar presente no farelo (RAI et al., 2008). O teor médio varia de 8 a 9 g/100 g, sendo a fibra do

tipo insolúvel mais prevalente (90%) (TAYLOR, 2016). Possui ainda minerais concentrados no pericarpo, camada de aleurona e gérmen como o fósforo, potássio, zinco, ferro, manganês e em menor quantidade o cálcio (BALASUBRAMANIAN et al., 2014; TAYLOR, 2016). O teor de cinzas varia de 1,1% a 2,4 % (RAI et al., 2008).

O milheto contém níveis consideráveis de proteínas de alto valor biológico (aproximadamente 14,5 g/100 g), capazes de satisfazer os requisitos nutricionais de um adulto. No entanto, não satisfaz as necessidades proteicas de bebês e crianças, como todo cereal, devido à baixa quantidade de aminoácidos essenciais, como a lisina. Em contrapartida, quando comparado com outros cereais como milho, trigo, sorgo e centeio o teor de lisina do milheto (2,8-3,2 g/100 g) é relativamente superior. As proteínas possuem composição aminoacídica semelhante às zeínas e kafirinas, com altas concentrações de treonina, glutamina, alanina e ácido aspártico, mas é relativamente baixa em prolina, cistina e metionina, apesar de alguns autores reportarem teores consideráveis de metionina e cisteína, que são aminoácidos essenciais e sulfurados, importantes para a formação de pontes dissulfeto. Aminoácidos como arginina e glicina são encontrados no farelo em significativas concentrações, enquanto aminoácidos essenciais como a isoleucina, leucina e fenilalanina estão em menores concentrações no farelo, se comparado aos grãos inteiros (TAYLOR, 2016; RAI et al., 2008; BALASUBRAMANIAN et al., 2014; DAYAKAR et al., 2017; SAINAM et al., 1993; DIAS-MARTINS et al., 2018). As proteínas do milheto são constituídas aproximadamente de 32% de prolaminas (grupo proteico rico em resíduos dos aminoácidos glutamina e prolina). O gérmen é rico em albuminas (6,4 - 9,6%) e globulinas (solúveis em soluções salinas 11-16%), enquanto o endosperma contém glutelinas (solúveis em álcool 30,6 - 45%) e penisetina (33,1-49%), sendo esta última a prolamina mais importante quantitativamente (DAYAKAR et al., 2017; SAINAM et al., 1993; TAYLOR; EMMAMBUX, 2008; CHANDNA; MATTA, 1990).

Fatores exógenos como o tipo de processamento aplicado aos grãos, interações de proteínas com componentes não proteicos e fatores endógenos tais como o teor de antinutrientes e amido podem influenciar a digestibilidade proteica dos grãos (PUSHPARAJ; UROOJ, 2011).

Os níveis de amido no milheto podem variar de 61,0% a 70,3%, assim como o teor de amilose de 17,0 a 21,5% e a atividade de amilase de 567 a 3141 unidades de maltose. A faixa de gelatinização do amido está entre 61 a 69 °C e os teores de açúcares solúveis são baixos (1,4 a 2,8 g/100 g), sendo os principais, a sacarose e a rafinose. O grão possui conteúdo energético superior a outros cereais (RAI et al., 2008; TAYLOR, 2016), com aproximadamente 361 kcal/ 100g (JALGAONKAR; JHA, 2016).

O milheto é um cereal que apresenta fitoquímicos com ação hipoglicemiante reduzindo o índice glicêmico (IG), com capacidade antioxidante (CA), ações antimicrobianas, antiinflamatórias, antivirais, anticancerígenas, anti-hipertensivas e efeitos prebióticos (ADEBIYI et al., 2016a; CHANDRASEKARA; SHAHIDI, 2011; TAYLOR; DUODU, 2015; MUTHAMILARASAN et al., 2016; SALEH et al., 2013). Estudos relatam a presença de ácido fenólicos nos grãos de milheto-pérola, com maior teor de derivados do ácido cinâmico, como o ácido caféico, sinápico e, principalmente, os ácidos ferúlico e *p*-cumárico em sua composição (DYKES; ROONEY, 2006; SHAHIDI; CHANDRASEKARA, 2013; TAYLOR; DUODU, 2015), possuindo capacidade de reduzir algumas células tumorais (N'DRI et al., 2013). Populações consumidoras de milheto, em geral, possuem baixa incidência de certos tipos de câncer esofágico e colorretal (SHAN et al., 2015; SALEH et al., 2013; CHEN et al., 1993; VAN RENSBURG, 1981; WHO, 2017).

1.1.3. Principais benefícios à saúde do milheto

Dietas ricas em alimentos vegetais são protetoras contra várias doenças (CHANDRASEKARA; SHAHIDI, 2012). Além disso, sabe-se que os cereais integrais protegem o corpo contra doenças relacionadas à idade, como diabetes, doenças cardiovasculares e alguns tipos de câncer (FARDET; ROCK; REMESY, 2008). Anteriormente, esses benefícios eram atribuídos exclusivamente às vitaminas, minerais, ácidos graxos essenciais e fibras. No entanto, pesquisas têm sugerido que a combinação de outras substâncias bioativas como amido resistente, oligossacarídeos, lipídios, antioxidantes, fitoesteróis e taninos também exerce efeitos positivos (EDGE; JONES; MARQUART, 2005).

Extratos fenólicos solúveis e insolúveis ligados a diversas variedades de milheto mostraram atividade antioxidante. Mais de 50 compostos fenólicos pertencentes a várias classes foram identificados em diferentes variedades de grãos de milheto inteiros (CHANDRASEKARA; SHAHIDI, 2012). Estudos têm concluído que o milheto pode servir como uma fonte natural de antioxidantes em aplicações alimentares e como um ingrediente bioativo na promoção da saúde e redução do risco da incidência de doenças (SALEH et al., 2013). De acordo com o estudo desenvolvido por THEODORO et al., (2021), a farinha de milheto germinada foi capaz de promover uma ação antiinflamatória e antioxidante em ratos alimentados com alto teor de gordura e frutose. Além disso, a dieta reduziu a adiposidade e a esteatose hepática dos ratos.

Dietas à base de milheto tem apresentado redução na glicose plasmática devido ao maior teor de fibra e à presença de fatores antinutricionais, conhecidos por reduzir a digestibilidade e absorção do amido (KUMARI; SUMATHI, 2002). A *diabetes mellitus* é um distúrbio metabólico crônico que se caracteriza por altos níveis de glicose no sangue. Inibidores químicos sintéticos da α -glicosidase e da amilase pancreática são usados no tratamento clínico da doença, no entanto, os inibidores naturais são potencialmente mais seguros (KIM et al., 2011). Dessa forma, os grãos de milheto podem ser usados na preparação de diversos produtos alimentícios para diabéticos, além de serem potenciais na prevenção e tratamento do diabetes pela sua atividade antihiperlipidêmica (SALEH et al., 2013).

A demanda por alimentos saudáveis tem crescido juntamente com o número de pessoas que sofrem de doença celíaca. A doença celíaca é uma doença imunomediada desencadeada pela ingestão de glúten em indivíduos geneticamente suscetíveis. Por não conter glúten, o milheto tem um potencial considerável em alimentos e bebidas que podem ser adequados para indivíduos que sofrem desta doença (CHANDRASEKARA; SHAHIDI, 2012).

Os grãos de milheto são conhecidos por serem ricos em ácidos fenólicos, taninos e fitato que atuam como ingredientes antinutricionais (THOMPSON, 1993). No entanto, estudos demonstraram que esses antinutrientes reduzem o risco de câncer de cólon do útero e mama (GRAF; EATON, 1990). O consumo de milheto também foi associado à menor incidência de câncer de esôfago (VAN RENSBURG, 1981).

Outros estudos relatam a eficiência do milheto na prevenção de doenças cardiovasculares ao reduzir os triglicerídeos plasmáticos e na proteção contra o envelhecimento (LEE et al., 2010; HEGDE; CHANDRAKASAN; CHANDRAA, 2002). Constatou-se que

frações e extratos do grão de milheto têm atividade antimicrobiana contra algumas espécies de fungos e bactérias mostrando ser uma alternativa natural na preservação de alimentos e para fins terapêuticos (VISWANATH; UROOJ; MALLESHI, 2009).

1.2. Farinhas integrais de cereais

A ANVISA por meio da RDC nº 263 define farinha como “*produto obtido de partes comestíveis de uma ou mais espécies de cereais, leguminosas, frutos, sementes, tubérculos e rizomas por moagem e ou outros processos tecnológicos considerados seguros para produção de alimentos*” com umidade máxima de 15,0 % (g /100 g) (BRASIL, 2005). Segundo a RDC nº 493 (BRASIL, 2021), ingredientes integrais são cereais ou qualquer derivado quebrado, trincado, flocado, moído, triturado ou submetido a outros processos tecnológicos considerados seguros para produção de alimentos, cujos componentes anatômicos - endosperma amiláceo, farelo e gérmen - estão presentes na proporção típica que ocorre na cariopse intacta. Dessa forma, a farinha integral é o produto obtido pela moagem ou raladura da parte comestível dos grãos, rizomas, frutas ou tubérculos integrais (BRASIL, 1978).

As farinhas integrais possuem diversos componentes nutricionais como as fibras, as vitaminas, os fitoquímicos, os lipídios, as proteínas e, principalmente, o amido que é um grânulo composto de amilose, uma molécula linear formada por glicoses unidas por ligações do tipo α 1-4 e de amilopectina, uma molécula ramificada formadas por glicoses unidas por ligações do tipo α 1-4 e α 1-6. Na panificação, o amido é importante para a formação do miolo e é fonte de açúcar para os microrganismos fermentadores (CARR, 2003).

Em relação ao milheto, o indivíduo diabético também pode se beneficiar dos produtos elaborados com a farinha integral do grão, pois a ingestão de alimentos integrais fornece benefícios para a redução do risco da incidência e para o manejo do *diabetes mellitus*. Dados epidemiológicos demonstram uma menor incidência de diabetes em populações consumidoras de milheto (ADA, 2005; SALEH et al., 2013). Provavelmente, pela presença de fibras que são fermentadas no cólon e geram ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), como o acetato, o propionato e butirato, que são absorvidos pelo epitélio do cólon transformando-se em fonte de energia para os colonócitos e, desta forma, alguns estudos sugerem ação anticarcinogênica (GRAF; EATON, 1990; VAN RENSBURG, 1981). Ainda, os AGCC, são estimuladores do peptídeo GLP-1, encontrado na mucosa do íleo distal e do intestino grosso sendo considerado um potente agente antidiabetogênico pelo estímulo à secreção de insulina, redução do glucagon, retardo do esvaziamento gástrico e do apetite (GEE et al., 1996; GUTZWILLER et al., 1999; FLINT et al., 1998).

1.2.1. Produtos alimentares à base de farinhas integrais de milheto

Como alimento promissor, em alguns países africanos e na Índia, o milheto é utilizado para o preparo de bebidas alcoólicas e não alcoólicas e alimentos como arroz, cuscuz, massas, bolos, pães, mingau, *snacks* (TAYLOR; DOUDU, 2015; AWOLU, 2017), alimentos pré-cozidos para o desmame (NKAMA; GBENYI; HAMAKER, 2015), produtos fermentados e farinhas (ZHU, 2014).

Apesar do milheto ser comestível, após cozimento o grão apresenta textura pouco agradável e cor escura, sendo necessário a aplicação de técnicas para preparar produtos alimentícios de maior apelo ao consumidor (KRISHNA et al., 2011). Ainda, o conteúdo lipídico pode ser problemático no que se refere ao armazenamento da farinha de milheto. Especificamente, o milheto-pérola que possui alta atividade enzimática pela presença de

polifenoloxidase, lipase, peroxidase e, especialmente, a lipoxigenase que age principalmente sobre o ácido oleico que é o lipídio de maior teor no grão de milho, propiciando o surgimento de ranço e odor. Ainda, os produtos da oxidação podem reagir com os compostos fenólicos e causar alteração de cor e nas propriedades organolépticas (GOYAL; CHUGH, 2017). Geralmente, tratamentos térmicos, como branqueamento e refrigeração são utilizados para prolongar a vida útil da farinha de milho pelo efeito de inativação enzimática (GOYAL; CHUGH, 2017; GOYAL et al., 2017). Estudos sugerem que o uso de ácido ascórbico e vitamina E inibam aproximadamente 70% da atividade da lipoxigenase (SHARMA; CHUNG, 2017).

De acordo com a RDC nº 493 (BRASIL, 2021), os alimentos contendo cereais são classificados como integral quando o produto contiver, no mínimo, 30 % de ingredientes integrais; e quando a quantidade dos ingredientes integrais for superior à quantidade dos ingredientes refinados.

O primeiro pão foi feito por volta de 10.000 anos a.C, e pode ter sido desenvolvido por experimentação deliberada com água e farinha de grãos. Os egípcios foram os pioneiros na produção de pães e tornaram a arte de fazer pão popular em todo o mundo (MODAL; DATTA, 2008).

Segundo a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) pela RDC nº 263, *pães são os produtos obtidos da farinha de trigo e ou outras farinhas, adicionados de líquido, resultantes do processo de fermentação ou não e cocção, podendo conter outros ingredientes, desde que não descaracterizem os produtos. Podem apresentar cobertura, recheio, formato e textura diversos* (ANVISA, 2005).

Para a formação da massa, os componentes prioritários são a água, a farinha, o sal e fermento (*Saccharomyces cerevisiae*) podendo ser adicionado gordura e açúcar. A água promove a dissolução e hidratação da farinha assegurando a formação da rede de glúten. O sal atua reduzindo a solubilidade da gliadina, proporcionando uma massa menos pegajosa e, consequentemente, formando uma rede de glúten mais forte pela presença dos íons sódio e cloreto que aproximam as cadeias proteicas contribuindo para maior força e elasticidade na massa. O fermento produz o gás carbônico responsável pela formação dos alvéolos internos e crescimento da massa. O açúcar promove coloração ao pão e é utilizado como substrato pelas leveduras, conferindo maciez e suavidade à massa pela absorção de água. As gorduras contribuem para o aumento do volume do pão auxiliando na retenção do gás (FOOD INGREDIENTS BRASIL, 2009; MODAL; DATTA, 2008).

Para o preparo de pães, a fermentação é a etapa primordial, pois ocorre o processo de transformações bioquímicas onde o consumo do substrato (açúcar) pela ação microbiana (*Saccharomyces cerevisiae*) promove a formação de ácidos e de gás carbônico. À medida que o dióxido de carbono é produzido, a massa se expande e o retém, existindo uma relação entre o gás produzido e o gás retido que depende da qualidade da estrutura do glúten. Quanto mais gás retido, maior o volume do pão (CABALLERO; TRUGO; FINGLAS, 2003).

O volume e a densidade são parâmetros diretamente relacionados com o teor de sólidos e com a fração de ar existente na massa assada. Massas com densidade alta ou volume específico baixo (embatumadas) apresentam características sensoriais desagradáveis aos consumidores. Pães franceses apresentam volume específico médio de 4,6 mL/g e densidade 0,22 g/mL enquanto pães de forma apresentam volume de 4,1 mL/g e densidade 0,24 g/mL (ESTELLER; LANNES, 2005).

Existem diferentes tipos de fermentação sendo as mais comuns, (i) o método direto, em que a homogeneização de todos os ingredientes da massa ocorre em uma única etapa e esta segue para o período fermentativo e (ii) o método “esponja” ou indireto, onde parte dos

ingredientes são separados para o preparo de uma massa "esponja" que fermenta por um longo período de tempo (4 a 6 h) e, após, são adicionados aos demais ingredientes da massa ocorrendo a homogeneização e a fermentação principal (CAUVAIN; YOUNG, 2009; VALADÃO, 2014).

Um dos parâmetros fundamentais que deve ser observado durante a fermentação é a umidade relativa do ambiente. Para que o pão apresente características ideais, a umidade relativa do ambiente deve ser de 80 %. Quando menores que 75 %, promovem o ressecamento superficial da massa, dificultando o crescimento e a abertura da pestana, podendo ficar ainda com casca grossa e ressecada (ABNT, 2015).

A umidade dos pães pode variar de acordo com o tipo e condições de processamento. Nos pães com crosta crocante, como os pães franceses, a umidade tende a ser menor (25-30%), entretanto, os pães do tipo Forma contêm de 30-35 % de umidade. Devido à alta taxa de absorção de água pelas fibras, pães integrais podem apresentar umidade de até 40 % (ESTELLER; LANNES, 2005) e, portanto, estão mais suscetíveis ao desenvolvimento de bolores e leveduras.

A legislação da ABNT NBR 16170 (2015) estabelece os requisitos de qualidade e define os parâmetros para o pão tipo francês. Uma pontuação é atribuída para cada um dos atributos dos pães com respeito as características externas, internas e sensoriais. Quanto mais próximo de 100%, melhor está o pão em termos de qualidade e atendimento aos requisitos da norma.

O consumo de grãos integrais está associado ao menor risco de desenvolvimento de doenças crônicas não transmissíveis (DCNT), dessa forma, é importante estimular o consumo de produtos integrais como os pães. No Brasil, a legislação de panificação vigente, RDC n° 263 não contém definição específica para pães integrais, no entanto, de acordo com a RDC n° 493 da ANVISA, o produto é considerado integral quando tiver no mínimo 30% de ingredientes integrais (Brasil, 2021; Brasil, 2005).

Em função do aumento de casos de doença celíaca, existem no mercado inúmeros pães sem glúten, alguns não apresentam as qualidades desejadas como bom volume específico, cor da crosta adequada, simetria, resistência à quebra, boa estrutura da célula do miolo e maciez, pois a presença do glúten é importante para obtenção destas características. Desta forma, a elaboração de pães sem glúten com alta qualidade tem sido um desafio tecnológico. Na tentativa de solucionar este problema, melhoradores de farinhas, proteínas, enzimas e amidos têm sido utilizados na elaboração destes produtos e, assim, conferem adequadas características sensoriais e físico-químicas à massa (STORK et al., 2009; CAUVAIN; YOUNG, 2009; QUEIROZ; LOPES, 2008).

Segundo a RDC n° 93 (BRASIL, 2000), massa alimentícia ou macarrão é o produto obtido, exclusivamente, a partir de farinha de trigo comum e ou sêmola/semolina de trigo e ou farinha de trigo *durum* e ou sêmola/semolina de trigo *durum*. A massa alimentícia é o produto não fermentado, apresentado sob várias formas, recheado ou não, obtido pelo empasto, amassamento mecânico da farinha, podendo ou não ser adicionado de outros ingredientes e acompanhado ou não de temperos e ou complementos, isoladamente ou adicionados diretamente à massa. No que diz respeito a massa alimentícia integral ou macarrão integral a legislação define como sendo o *produto obtido a partir de farinha de trigo integral e ou farinha integral de trigo durum ou a partir da mistura de farinha de trigo integral e ou farinha integral de trigo durum e ou farelo de trigo e ou farelo de trigo durum com farinha de trigo comum e ou sêmola/semolina de trigo e ou farinha de trigo durum e ou sêmola/semolina de trigo durum* (BRASIL, 2000).

Segundo dados da ABIMAP (2020), no mercado internacional as massas alimentícias apresentaram um aumento expressivo de 159% em faturamento, totalizando 29 mil toneladas em volume, 247 % a mais que em 2019. No Brasil, o setor registrou aumento de 14% em faturamento e 6 % em volume de vendas, atingindo R\$ 11,2 bilhões e 1,3 milhão de toneladas em 2020. (ABIMAP, 2020).

Devido à preocupação crescente com a saúde, massas nutritivas ricas em fibras, micronutrientes essenciais e que possuam baixo índice glicêmico (IG) e baixa carga glicêmica (CG) podem ser preferidas pelo consumidor, pois dietas com baixo IG e baixa CG estão associadas com a redução no risco de desenvolvimento de doenças crônicas. Tais parâmetros representam um indicador global de resposta glicêmica e demanda insulínica induzida por uma porção de alimento que quando utilizados em conjunto, oferecem uma informação tangível sobre o alimento em suas porções reais (PORTERO- MCLELLAN et al., 2010).

1.2. Mercado dos produtos *glúten-free*

Atualmente, devido à mudança dos hábitos alimentares e aumento gradual de casos de alergias alimentares em todo o mundo, há uma crescente demanda da população por alimentos sustentáveis e nutritivos. Sabe-se que 1 a 5% da população mundial apresenta algum tipo de intolerância aos cereais que contém glúten e este cenário se tornou um dos maiores desafios na área de alimentos panificáveis, que consiste em desenvolver produtos para um seleto grupo de pessoas que apresentam tal intolerância, os denominados doentes celíacos ou intolerantes ao glúten (GILISSEN; VAN DER MEER; SMULDERS, 2014; ELLI et al., 2015).

O intolerante ao glúten apresenta sintomas próximos à forma clássica da doença celíaca (gases e diarreia), porém não expressa a doença autoimune sistêmica, já o celíaco possui um distúrbio genético de má absorção crônica do intestino causado pela exposição ao glúten, de forma que exposição promove a produção de anticorpos ocasionando severas lesões da mucosa intestinal resultando na má absorção de nutrientes (CESAR et al., 2006). A doença clássica pode se manifestar nos primeiros anos de vida, com quadros clínicos de diarreia crônica, vômitos, entre outros, ou na idade adulta, está relacionada ao aparecimento de diversas enfermidades (SILVA et al., 2006) e a forma de tratamento é a exclusão do glúten da dieta.

Além da doença celíaca clássica, outras condições clínicas estão relacionadas a ingestão de glúten e podem ser agrupadas como autoimunes (doença celíaca clássica, ataxia de glúten, dermatite herpetiforme), alérgicas (alergia respiratória, alergia alimentar e urticária de contato) e não autoimunes e não alérgicas (sensibilidade ao glúten não celíaca) (SHARMA et al., 2020; WATKINS; ZAWAHIR, 2017).

Segundo a Associação dos Celíacos do Brasil, o pão é o produto preferível dos celíacos em relação a produtos sem glúten (47 %), seguido pelas massas alimentícias (ACELBRA, 2004). O *Codex Alimentarius* (2008) define que o limite máximo para que o alimento seja considerado isento de glúten é de 20 ppm. No Brasil, a Lei 10.674/2003 dispõe apenas sobre a advertência sobre a presença ou ausência de glúten no rótulo ou bula de todos os alimentos industrializados. No entanto, a quantidade aceitável de glúten para adoção do “Não contém glúten” ainda não está regulamentada.

O glúten - presente nos cereais como o trigo, centeio e cevada - é formado pela fração prolamínica denominada gliadina (responsável pela resistência da massa à extensão - extensibilidade) e pela fração glutenina (responsável pela elasticidade) (FENNEMA, 2010),

componentes que desempenham papel fundamental nas propriedades viscoelásticas dos produtos de panificação, pois permitem a retenção do gás carbônico produzido durante a fermentação da massa (STORCK et al., 2009). No entanto, a fração proteica tóxica presente é a prolaminica (GONÇALVES, 2013) devido sua resistência à degradação pelos sucos gástrico, pancreático e intestinal, permanecendo no lúmen intestinal mesmo após a degradação do glúten. A abundância e localização dos resíduos de prolina são apontadas como uma das razões para a resistência. A glutamina e a prolina atravessam a barreira do epitélio intestinal caso haja aumento da sua permeabilidade, e em contato com a mucosa interagem com as células apresentadoras de antígenos (CUNHA; CARNEIRO; AMIL, 2013).

No trigo, que é o cereal mais utilizado para elaboração de produtos panificáveis e de pastifício, as proteínas são divididas em dois grupos: as albuminas (hidrossolúveis) e globulinas (solúveis em solução salinas), não formadoras de glúten, que representam 15% das proteínas totais e o grupo formado pelas gliadinas e gluteninas que compreendem 85% das proteínas do grão. As gliadinas são proteínas pegajosas, solúveis em álcool, de cadeia simples, com ligações intramoleculares compostas de sequências repetitivas de glutamina e aminoácidos apolares como a prolina, fenilalanina e tirosina. Já as gluteninas apresentam ligações intra e intermoleculares, possuem cadeias ramificadas, são coesas, elásticas, compostas de sequências repetitivas de glutamina, prolina e cisteína e são solúveis em soluções ácidas e/ou básicas (EL DASH; CAMARGO; DIAZ, 1982; WIESER, 2007). Quando a farinha de trigo e a água são homogeneizadas mecanicamente, há hidratação das gliadinas e das gluteninas formando o complexo proteico denominado glúten (Figura 2) pela associação de ambas através de ligações de hidrogênio, ligações de Van der Waals e pontes dissulfeto devido à presença de aminoácidos, principalmente a cisteína (BOBBIO; BOBBIO, 1995).

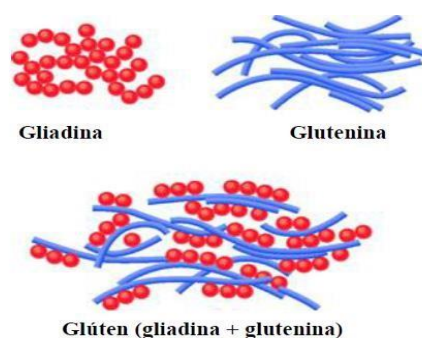


Figura 1.2. Formação da rede proteica do glúten. Adaptado de Fassano (2011).

2. EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA

A extrusão é um processamento termomecânico em que alimentos que contenham amido ou proteína são submetidos a uma combinação de umidade, pressão, temperatura e cisalhamento mecânico, resultando em transformações moleculares e físico-químicas como a destruição parcial ou completa da estrutura semicristalina, fragmentação molecular dos polímeros de amido e desnaturação proteica, o que melhora a sua digestibilidade (CASTELLS et al., 2005; RAI, 2008). Diferente da tecnologia de secagem, a extrusão combina uma série de operações unitárias, ou seja, mistura, cozimento, corte, sopro, modelagem final e secagem em um processo contínuo, rápido e eficiente, no que se refere ao gasto de energia, e pode ser usado para produzir uma ampla variedade de alimentos ricos

em amido, incluindo lanches, cereais prontos para comer, confeitarias e pães torrados extrudados (SUKNARK; PHILLIPS; CHINNAN, 1997).

As etapas do processo compreendem o preparo dos ingredientes em proporção adequada, condicionamento a um teor adequado de umidade e introdução da matéria-prima no equipamento por meio do alimentador, que impele o material através do parafuso em direção à matriz. À medida que o produto atravessa as diferentes zonas de extrusão (de alimentação, de transição e de alta pressão), ocorre aumento gradativo do atrito mecânico provocado por modificações de geometria do parafuso e de abertura da matriz. Em consequência, aumentam também a temperatura e a pressão, ocorrendo o cozimento do produto (GUERREIRO, 2007). A qualidade final do produto é diretamente dependente de fatores como a matéria-prima utilizada e as variáveis do processo como a temperatura, o tipo de parafuso utilizado e velocidade de rotação do mesmo (VARGAS-SOLÓRZANO et al., 2014).

Para o preparo de massas sem glúten deve haver ingredientes que possam substituir as funções estruturais do glúten, como o amido modificado química ou fisicamente que é fundamental para a formação de uma matriz uniforme (EL-DASH, 1981; JULIANO; SAKURAI, 1995), capaz de minimizar a perda de sólidos durante o cozimento da pasta. Dessa forma, o processamento por extrusão termoplástica pode ser usado com o objetivo de se adquirir farinhas com diferentes graus de cozimento. A adição de uma fração de amido pré-cozido com predomínio de ligações de hidrogênio pode aumentar o número de ligações secundárias, pois quando o amido é tratado em altas temperaturas ele se comporta como ligante substituindo a função do glúten de formar uma rede, pois o aquecimento do amido em condições de umidade ideal causa intumescimento dos grânulos até a completa gelatinização resultando na quebra e rearranjo das ligações de hidrogênio, permitindo a plastificação e a formação de texturas desejáveis (YE et al., 2017; ASCHERI, 2006).

Estudos *in vitro* demonstram que extrudados elaborados com milho apresentam uma redução significativa de carboidratos prontamente digeríveis com maior prevalência de carboidratos de digestão lenta (BRENNAN et al., 2012; SALEH, 2013), sendo este de pouco impacto no aumento da glicemia. A classificação do amido com base na sua digestibilidade é dada como (i) amido rapidamente digerível, hidrolisado em 20 min; (ii) amido lentamente digerível, hidrolisado entre 20 e 120 min e (iii) amido resistente (AR), que é o amido não hidrolisado em 120 min. O AR é classificado como AR₁ (fisicamente inacessível, se o amido estiver contido em uma estrutura interna ou parcialmente rompida na planta; se as paredes celulares rígidas inibirem o seu intumescimento e dispersão como em alguns legumes/tubérculos; ou por sua estrutura densamente empacotada), AR₂ (em que a forma da estrutura cristalina do grânulo (A, B e C) influencia sua digestão) ou AR₃ (amido retrogradado) (ENGLYST et al., 1992; KAM et al., 2016). O AR₄ tem sido evidenciado por sofrer modificações em sua estrutura química, sendo considerado o tipo mais resistente à hidrólise enzimática. O AR₅ é formado por complexos amilose-lipídeo e apresenta maiores temperaturas de gelatinização e tendência a retrogradação. São insolúveis em água e não suscetíveis a degradação por α -amilase (FUENTES-ZARAGOZA et al., 2011).

A utilização da extrusão termoplástica em alimentos possui inúmeras vantagens, dentre elas está a sua versatilidade, produção contínua em larga escala e por unidade de área, menores gastos com mão-de-obra e energia, produtos alimentícios com melhores características funcionais, sensoriais e nutricionais e a não geração de efluentes industriais ou material de risco (ASCHERI; CARVALHO, 2008). Além disso com esta tecnologia consegue-se uma homogeneização e reestruturação de ingredientes pouco atrativos em ingredientes com texturas e formas mais aceitáveis; melhora a digestibilidade e inibe fatores

anti-nutricionais por meio do aquecimento e reduz a umidade do produto (MARQUES; MARQUES; COSTA, 2015). Outra vantagem é a agregação de valor ao produto. Quando a tecnologia de extrusão termoplástica é empregada de forma adequada, o produto passa a ter um elevado valor agregado, podendo chegar até 2000%, em relação ao valor do custo da matéria prima *in natura* e o valor de venda do produto nos supermercados (CEREDA; VILPOUX; FRANCO, 2003).

No que diz respeito as desvantagens do processo de extrusão termoplástica podemos destacar a alteração de cor e aroma dos alimentos devido a expansão do produto, ao calor excessivo ou a reações com proteínas, açúcares redutores ou íons metálicos, sendo em alguns casos necessário a adição de aditivos (corantes e aromatizantes (FELLOWS, 2008).

Alguns estudos têm demonstrado com sucesso a utilização da extrusão termoplástica para a obtenção de produtos de panificação e pastifício com redução ou isenção de glúten. PATIL *et al.* (2016) estudaram o desenvolvimento de pães com farinha de trigo com diferentes níveis de substituição de farinha de milho cru e extrudada e concluíram que pães elaborados com farinha de milho extrudada apresentaram melhores propriedades tecnológicas (volume e altura) e textura (baixa dureza, alta resiliência) do que pães obtidos com farinha de milho crua.

SILVA; ASCHERI.; ASCHERI, (2016) propôs o desenvolvimento de massas alimentícias sem glúten elaboradas com arroz integral e fubá de milho utilizando extrusão termoplástica. Os autores conseguiram melhores resultados com relação a textura das massas na proporção de 40:60 (fubá:arroz), 30 g/100 g de umidade, e a 70 °C. Segundo os autores, as perdas de sólidos durante o cozimento e o baixo teor de fibras ainda são desafios que precisam ser ultrapassados

COMETTANT-RABANAL *et al.*, (2021) com o intuito de produzir pães sem glúten, utilizaram a tecnologia de extrusão termoplástica como pré-tratamento de farinhas integrais (milho, arroz integral parboilizado e sorgo). Como resultado, os autores verificaram que o processo de extrusão termoplástica melhorou a consistência, a absorção de água e propriedades viscoelásticas das massas. Promoveu um aumento do volume específico e melhor distribuição interna de células de ar. Além disso, a adição de milho germinado desenvolveu maior maciez nos pães.

3. REFERÊNCIAS

ABITRIGO - **Associação Brasileira da Indústria do Trigo**. Disponível em: <http://www.abitrigo.com.br/farinha-de-trigo.php>. Acesso em: 20 out. 2017.

ABIMAP- Associação Brasileira das Indústrias de Biscoitos, Massas Alimentícias e Pães & Bolos Industrializados. 2020. Indústrias de biscoitos, massas alimentícias e pães & bolos industrializados alcançam 9% a mais em faturamento, totalizando R\$ 40 bilhões em 2020. Disponível em: <https://www.abimapi.com.br/noticias-detalle.php?i=NDQ4Nw==>. Acesso em: 27 set. 2020

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas - **NBR 16170** - Guia de implementação | Pão francês – diretrizes para avaliação da qualidade e classificação | Reavaliação dos pães para atestar o cumprimento à norma, 2015.

ACELBRA – **Associação dos Celíacos do Brasil**. 2004. Disponível em: <http://www.ancelbra.org.br/2004/estatisticas.php>. Acesso em: 17 Out. 2017

ADA - American Diabetes Association. Diagnosis and classification of diabetes mellitus. **Diabet Care**, v. 28, p. 37–42, 2005.

ADEBIYI, J. A.; *et al.* Effect of fermentation and malting on the microstructure and selected physicochemical properties of pearl millet (*Pennisetum glaucum*) flour and biscuit. **Journal of Cereal Science**, v. 70, p. 132-139, 2016a.

ADEBIYI, J. A.; *et al.* Fermented and malted millet products in Africa: Expedition from traditional/ethnic foods to industrial value added products. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. In Press, 2016b.

ANVISA- Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução - **RDC nº 93**, de 31 de outubro de 2000. 2000. Dispõe sobre o Regulamento Técnico para Fixação de Identidade e Qualidade de Massa Alimentícia, 2000. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2000/rdc0093_31_10_2000.html. Acesso em: 25 ago. 2021.

ANVISA- Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução – **RDC nº 263**, de 22 de setembro de 2005. Regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos. 2005 Disponível em: <https://www.saude.rj.gov.br/comum/code/MostrarArquivo.php?C=MjIwMw%2C%2C>. Acesso em: 22 Nov. 2017.

ANVISA- Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução - **RDC nº 493**, de 15 de abril de 2021. Dispõe sobre os requisitos de composição e rotulagem dos alimentos contendo cereais para classificação e identificação como integral e para destaque da presença de ingredientes integrais, 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-rdc-n-493-de-15-de-abril-de-2021-315225504>. Acesso em: 24 ago. 2021.

ASCHERI, J.L.R. **Curso de processo de extrusão de alimentos: aspectos tecnológicos para o desenvolvimento e produção de alimentos para consumo humano e animal.** EMBRAPA, outubro, 2006.

ASCHERI, J.L.R; CARVALHO, C.W.P. **Processo de extrusão de alimentos: aspectos tecnológicos para o desenvolvimento e produção de alimentos para consumo humano.** Rio de Janeiro: Embrapa; 2008

AWOLU, O. O. Optimization of the functional characteristics, pasting and rheological properties of pearl millet-based composite flour. **Helyon**, v. 3, n. 2, e00240, 2017.

BALASUBRAMANIAN, S.; *et al.* Development and shelf-life evaluation of pearl millet based upma dry mix. **J. Food Sci. Technol**, v. 51, n. 6, p. 1110–1117, 2014.

BALASUBRAMANIAN, S.; KAUR, J.; SINGH, D. Optimization of weaning mix based on malted and extruded pearl millet and barley. **J. Food Sci. Technol**, v. 51, n. 4, p. 682–690, 2014.

BANDYOPADHYAY, R.; KUMAR, M.; LESLIE, J. Relative severity of aflatoxin contamination of cereal crops in West Africa. **Food Additives and Contaminants: Part A**, v. 24, n. 10, p. 1109-1114, 2007

BOBBIO, F. O; BOBBIO, P. A. **Química do processamento de alimentos.** 3ª ed. São Paulo: Varela, 1995.

BRASIL. **Obesidade cresce 60% em dez anos no Brasil.** Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/saude/2017/04/obesidade-cresce-60-em-dez-anos-no-brasil>. Acesso em 06 nov. 2017.

BRASIL. **CNNPA nº 12**, de 1978. Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos. Disponível em: http://www.anvisa.gov.br/anvisa/legis/resol/12_78.pdf. Acesso em: 22 nov. 2017.

BRASIL. **Lei n. 10.674** de 16 de maio de 2003. Obriga a que os produtos alimentícios comercializados informem sobre a presença de glúten, como medida preventiva e de controle da doença celíaca. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/110.674.htm#:~:text=Obriga%20a%20que%20os%20produtos,Art. Acesso em: 22 dez. 2021.

BRENNAN, M. A.; *et al.* Amaranth, millet and buckwheat flours affect the physical properties of extruded breakfast cereals and modulate their potential glycaemic impact. **Starch/Starke**, v.64, p.392–8, 2012.

CABALLERO, B.; TRUGO, L. C.; FINGLAS, P. M. **Encyclopedia of food sciences and nutrition.** San Diego, Calif, Academic, 2003.

CARR, L. G. **Análises físicas, de textura e sensorial de pão francês pré-assado congelado.**

100 p. São Paulo 2003 - Dissertação de mestrado - Engenharia química, Escola politécnica – Universidade de São Paulo. 2003

CASTELLS, M.; *et al.* Fate of mycotoxins in cereals during extrusion cooking: a review. **Food Addit Contam**, v. 22, p. 150–157, 2005.

CAUVAIN, S. P.; YOUNG, L. S. **Tecnologia da panificação.** 2ª edição. Tradução de: Carlos David Szlak. Barueri, SP: Manole, 2009. 418p.

CEREDA, M.P.; VILPOUX, O.F.; FRANCO, C.M.L. Uso do Amido e seus derivados na produção de salgadinhos extrudados (snacks). In: Cereda, M. P.; Vilpoux, O. F. (Ed.). **Tecnologia, usos e potencialidades de tuberosas amiláceas** Latino Americanas, São Paulo: Fundação Cargill, 2003. p. 132-143.

CÉSAR, S.; *et al.* Elaboração de pão sem glúten. **Revista Ceres**, v. 53, n. 306, p. 150-155, 2006.

CHANDNA, M.; MATTA, N. K. Characterization of pearl millet protein fractions. **Phytochem**, v. 29, p. 3395-3399, 1990.

CHANDRASEKARA, A.; SHAHIDI, F. Antiproliferative potential and DNA scission inhibitory activity of phenolics from whole millet grains. **Journal of Functional Foods**, v. 3, n. 3, p. 159-170, 2011.

CHANDRASEKARA A.; SHAHIDI F. Bioaccessibility and antioxidant potential of millet grain phenolics as affected by simulated in vitro digestion and microbial fermentation. **Journal of Functional Foods**, v. 4, p. 226–37, 2012.

CHEN, F., *et al.* Corn and wheat-flour consumption and mortality from esophageal cancer in shanxi, China. **International journal of cancer**, v. 53, n.6, p. 902-906, 1993

CODEX ALIMENTARIUS. **Standard for foods for special dietary use for persons intolerant to gluten.** 2008. Disponível em: http://www.fao.org/input/download/standards/291/CXS_118e_2015.pdf. Acesso em: 21 out. 2017.

COMETTANT-RABANAL, R.; CARVALHO, C. W. P.; ASCHERI, J. L. R.; CHÁVEZ, D. W. H.; GERMANI, R. Extruded whole grain flours and sprout millet as functional ingredients for gluten-free bread. **LWT**, 150, 112042, 2021

CUNHA, M; CARNEIRO, F; AMIL, J. Doença celíaca refratária. **Arq Med**, v. 27, n. 1, p. 1926, 2013.

DAYAKA, R. B.; *et al.* **Nutritional and Health benefits of Millets.** ICAR_Indian Institute of Millets Research (IIMR) Rajendranagar, Hyderabad, p. 112, 2017.

DIAS-MARTINS, A.M.; PESSANHA, K.L.F.; PACHECO, S.; RODRIGUES, J.A.S.; CARVALHO, C.W.P. Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food security, processing, health benefits and nutritional products. **Food Research International**, v. 109, n. p. 175-186, 2018.

DIAS-MARTINS, Amanda Mattos. **Efeitos de diferentes processamentos sobre a qualidade nutricional e funcional de grãos de milho (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.)**. RJ. 2019. 105p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Instituto de Tecnologia, Departamento de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2019.

DYKES, L.; ROONEY, L. W. Sorghum and millet phenols and antioxidants. **Journal of Cereal Science**, v. 44, n. 3, p. 236-251, 2006.

DURÃES, F. O. M.; MAGALHÃES, P. C.; SANTOS, F. G. **Fisiologia da Planta de Milheto**. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. 2003. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/487540/fisiologia-da-planta-demilheto>. Acesso em: 27 set. 2017.

ECONOMIA-GO. **Milho debulhado, sorgo e milho têm nova pauta fiscal**. 2021. Disponível em: <https://www.goias.gov.br/servico/28-agronegocio/124013-milho-debulhado,sorgo-e-milheto-t%C3%AAm-nova-pauta-fiscal.html> Acesso em: 23 ago. 2021

EDGE, M.S.; JONES, J.M.; MARQUART, L. A new life for whole grains. **J Am Diet Assoc**, v. 105, n.12, p.1856–60, 2005

EL-DASH, A. A. Application and control of thermoplastic extrusion of cereals for food and industrial uses. In: POMERANZ, Y.; MUNCH, L. **Cereal a renewable resource: theory and practice**. Wageningen: American Association of Cereal Chemists, 1981, p. 165-216.

ELLI, L.; *et al.* Diagnosis of gluten related disorders: celiac disease, wheat allergy and nonceliac gluten sensitivity. **World J. Gastroenterol**, v. 21, p. 7110-7119, 2015.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária - O AGRO NO BRASIL E NO MUNDO: UMA SÍNTESE DO PERÍODO DE 2000 A 2020 Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/62618376/O+AGRO+NO+BRASIL+E+NO+MUNDO.pdf/41e20155-5cd9-f4ad-7119-945e147396cb> Acesso em: 23 ago. 2021

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária. **Embrapa Milho e Sorgo. Cultivo do milho**. Sistema de Produção, 3 ISSN 1679-012X, abril /2016.

ENGLYST, H. N.; KINGMAN, S. M.; CUMMINGS, J. H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. **Eur. J. Clin. Nutr**, v. 46, n. 2, p. S33–S50, 1992.

ESTELLER, M.S.; LANNER, S.C.S. Parâmetros complementares para fixação de identidade e qualidade de produtos panificados. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v.24, n.4, p. 802-806, 2005.

FAO - Food and Agriculture Organization. **World Food Situation**. 2017a. Disponível em: <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/>. Acesso em: 23 ago. 2021

FAO - Food and Agriculture Organization. **The world sorghum and millet economies: facts, trends and Outlook**. 2017b. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/W1808E/w1808e0c.htm#TopOfPage>. Acesso em: 24 out. 2017.
FAO - Food and Agriculture Organization. **How to Feed the World in 2050**. 2017c. Disponível em: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf. Acesso em: 24 out. 2017.

FAO - Food and Agriculture Organization. **Sorghum and Millets in Human Nutrition**. FAO Food and Nutrition Series, v. 27, 1995.

FAOSTAT- Food and Agriculture Organization Statistics. 2019. **MILLET MARKET - GROWTH, TRENDS, COVID-19 IMPACT, AND FORECASTS (2021 - 2026)**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/millet-market>. Acesso em: 23 ago. 2021.

FARDET, A.; ROCK, E.; REMESY, C. Is the in vitro antioxidant potential of whole-grain cereals and cereal products well reflected in vivo? **J Cereal Sci** v. 8, p.258–76, 2008.

FASSANO, A. Zonulin and Its Regulation of Intestinal Barrier Function: The Biological Door to Inflammation, Autoimmunity, and Cancer. **Physiol Rev**, v. 91, p. 151–175, 2011.
Fellows, P.J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. Porto Alegre: Artmed;2008

FENNEMA, O.R. **Química de alimentos**.4ªed. – Editora Artmed, 2010

FLINT, A.; *et al.* Glucagon-like Peptide 1 promotes satiety and suppresses energy intake in humans. **J. Clin Invest**, v.101, n. 3, 515-520, 1998.

FUENTES-ZARAGOZA, E.; SÁNCHEZ-ZAPATA, E.; SENDRA, E.; SAYAS, E.; NAVARRO, C.; FERNÁNDEZ-LÓPEZ; PÉREZ-ALVAREZ, J.A. Resistant starch as prebiotic: A review. *Starch/Stärke*, v. 63, p. 406-415, 2011

FOOD INGREDIENTS BRASIL. **Panificação**. Nº10, 2009. Disponível em: https://revistafi.com.br/upload_arquivos/201606/2016060018792001465325646.pdf. Acesso em: 16 jul. 2021.

GEE, J. M.; *et al.* Hydrates elevate plasma enteroglucagon but high viscosity is also necessary to stimulate small bowel mucosal cell proliferation in rats. **J Nutr**, v. 126, p. 373-379, 1996.

GILISSEN, L. J. W. J.; VAN DER, M. I. M.; SMULDERS, M. J. M. Reducing the incidence of allergy and intolerance to cereals. **Journal of Cereal Science**. v. 59, p.337-353, 2014.

GONÇALVES, C. B. C. D.; *et al.* Estudo da prevalência da doença celíaca em crianças e adolescentes com diabetes melito tipo 1: resultado de 10 anos de acompanhamento. **Arquivos Brasileiros de Endocrinologia Metabólica**, v.57 n.5, 2013.

GOYAL, P.; CHUGH, L. K. Shelf life determinants and enzyme activities of pearl millet: a comparison of changes in stored flour of hybrids, CMS lines, inbreds and composites. **J Food Sci Technol**, v. 54, n.10, p.3161–3169, 2017.

GOYAL, P.; *et al.* Peroxidase activity, its isozymes and deterioration of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. BR.] flour during storage. **Journal of Agriculture and Ecology**, v.3, 41-51, 2017.

GRAF, E.; EATON, J.W. Antioxidant functions of phytic acid. **Free Radic Biol Med**, v. 8, n, 1 , p 61–69, 1990.

GUIMARÃES, J. R.; GONÇALVES, L.; RODRIGUES, J. Utilização do milheto para produção de silagem. **Embrapa Cerrados. Documentos**, 2009.

GUPTA, N., SRIVASTAVA, A. K., PANDEY, V. N. Biodiversity and nutraceutical quality of some indian millets. Proceedings of the National Academy of Sciences, **India Section B: Biological Sci**, v. 82, n. 2, p. 265-272, 2012

GUERREIRO, L. **Dossiê técnico: Produtos extrusados para consumo humano, animal e industrial**. REDETEC – Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro, 25 p, 2007. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NTk=>>. Acessado em: 25 nov. 2017.

GUTZWILLER JP.; *et al.* Glucagon-like Peptide promotes satiety and reduces food intake in patients with diabetes mellitus type 2. The American Physiological Society, v. 276, p. 15411544, 1999.

HASSAN, Z.M., SEBOLA, N.A. & MABELEBELE, M. The nutritional use of millet grain for food and feed: a review. **Agric & Food Secur**, v. 10 (16), p. 1-4, 2021.

HEGDE, P.S.; CHANDRAKASAN, G.; CHANDRAA, T.S. Inhibition of collagen glycation and crosslinking in vitro by methanolic extracts of Finger millet (*Eleusine coracana*) and Kodo millet (*Paspalum scrobiculatum*). **J Nutr Biochem**, v.13, p.517–21, 2002.

HECKLER, J.; SALTON, J. Palha: fundamento do Sistema Plantio Direto. **Embrapa Agropecuária Oeste. Coleção sistema plantio direto**, 2002.

IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística - **Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF) 2017/2018**. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agenciahttps://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia->

[noticias/2013-agencia-de-noticias/releases/10448-ibge-inicia-a-pesquisa-de-orcamentos-familiares-pof-2017-2018.html](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2013-agencia-de-noticias/releases/10448-ibge-inicia-a-pesquisa-de-orcamentos-familiares-pof-2017-2018.html)noticias/2013-agencia-de-noticias/releases/10448-ibge-inicia-a-pesquisa-de-orcamentos<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2013-agencia-de-noticias/releases/10448-ibge-inicia-a-pesquisa-de-orcamentos-familiares-pof-2017-2018.html>familiares-pof-2017-2018.html. Acesso em: 06 nov. 2017

JALGAONKAR, K.; JHA, S. K. Influence of particle size and blend composition on quality of wheat semolina-pearl millet pasta. **Journal of Cereal Science**, v. 71, p. 239-245, 2016.

JUKANTI, A.K.; *et al.* Crops that feed the world 11. Pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.): an important source of food security, nutrition and health in the arid and semi-arid tropics. **Food Sec.** v. 8, p. 307-329, 2016.

JULIANO, B. O.; SAKURAI, J. Miscellaneous rice products. In: **Rice: chemistry and technology**. 2 th. Saint Paul: American Association of Cereal Chemistry, 1995, p. 569-618.

KAM, J.; *et al.* Dietary Interventions for Type 2 Diabetes: How Millet Comes to Help. **Frontiers in Plant Science** , v.7, 2016.

KIM, J. S.; HYUN, T. K.; KIM, M. J. The inhibitory effects of ethanol extracts from sorghum, foxtail millet and proso millet on α -glucosidase and α -amylase activities. **Food Chemistry** v.124, p.1647–5, 2011.

KRISHNAN, R.; *et al.* Quality characteristics of biscuits prepared from finger millet seed coat based composite flour. **Food Chemistry**, v. 129, p.499–506, 2011.

KUMARI, P.L; SUMATHI, S. Effect of consumption of finger millet on hyperglycemia in non-insulin dependent diabetes mellitus (NIDDM) subjects. **Plant Foods Hum Nutr**, v.57, p.205–13, 2002.

LEE, S.H.; CHUNG, I-M.; CHA, Y-S.; PARKA, Y. Millet consumption decreased serum concentration of triglyceride and C-reactive protein but not oxidative status in hyperlipidemic rats. **Nutr Res**, v.30, p.290–6, 2010.

LIMA, E. R.; SILVA, T. S. S.; VILELA, A. B. A.; RODRIGUES, V. P.; BOERY, R. N. S. de O. Implications of the COVID-19 pandemic in brazilian food habits: integrative review. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. e29810414125, 2021.

MACAULEY, H. T. R. Cereal Crops: Rice, Maize, Millet, Sorghum, Wheat. In: AFRICA, U. N. E. C. F., **Feeding Africa**. AbdouDiouf International Conference Center, Africa, 2015
MARQUES, E. C.; MARQUES, R. C.; COSTA, S. R. R. da. Aspectos da tecnologia de extrusão termoplástica em alimentos sobre a saúde do consumidor. **Revista Gestão & Saúde**, [S.l.], v. 6, n. 2, p. Pag. 1935–1951, 2015. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/rgs/article/view/3037>. Acesso em: 19 jan. 2022.

MONDAL, A.; DATTA A. K. Bread baking – A review. **Journal of Food Engineering**, v. 86, p. 465-474, 2008.

MRIDULA, D.; SHARMA, M. Development of non-dairy probiotic drink utilizing sprouted cereals, legume and soymilk. **LWT - Food Science and Technology**, v. 62, p. 482-487, 2015.

MUTHAMILARASAN, M.; *et al.* M. Exploration of millet models for developing nutrient rich graminaceous crops. **Plant Sci.** v. 242, p. 89-97, 2016

NKAMA, I.; GBENYI, D. I.; HAMAKER, B. R. Effects of Malting and Roasting of Millet and Sorghum on Protein Digestibility, Mineral Availability, Soluble Sugar Composition and Consumer Acceptability of Dakuwa. **Indian J Nutri**, v. 2, n. 1, p. 112, 2015.

N'DRI, D.; *et al.* Effect of cooking on the total antioxidant capacity and phenolic profile of some whole-meal African cereals. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 93, n.1, p. 29-36, 2013.

ODUSOLA, K. B.; ILESANMI, F. F.; AKINLOYE, O. A. Assessment of nutritional composition and antioxidant ability of pearl millet (*Pennisetum glaucum*). **American Journal of Research Communication**, v. 6, p. 262-272, 2013

PATIL, S. S., RUDRA, S. G., VARGHESE, E., KAUR, C. Effect of extruded finger Millet (*Eleusine coracana* L.) on textural properties and sensory acceptability of composite bread. **Food Bioscience**, v. 14, p. 62–69, 2016

PEREIRA, F. I. A.; *et al.* **Manejo da cultura do milheto**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. (Embrapa Milho e Sorgo, Circular Técnico, 29) 17 p., 2003.

PORTERO-MCLELLAN, K. C.; *et al.* Determinação do índice glicêmico e da carga glicêmica de dietas hospitalares para indivíduos com diabetes Identification of glycemic index and glycemic load in hospital meals for individuals with diabetes. **Cad. Saúde Colet**, v. 18, n.2, p. 259-65, 2010.

PUSHPARAJ, F. S. UROOJ, A. Influence of processing on dietary fiber, tannin and in vitro protein digestibility of pearl millet. **Food and Nutrition Sciences**, v. 2 nº. 8, p. 895-900, 2011.

QUEIROZ, M; LOPES, J. D. S. **Curso básico de panificação**. Viçosa, MG: CPT – Centro de Produções Técnicas, 2008, 194p.

RAI, K. N.; *et al.* Adaptation and potential Uses of Sorghum and Pearl Millet in Alternative and Health Foods. **Comprehensive reviews in food science and food safety**, v. 7, 2008.

ROUAMBA, A.; SHIMELIS, H.; DRABO, I.; LAING, M.; GANGASHETTY, P.; MATHEW, I.; SHAYANOWAKO, A. I. T. *et al.* (2021). Constraints to Pearl Millet (*Pennisetum glaucum*) Production and Farmers' Approaches to *Striga hermonthica* Management in Burkina Faso. **Sustainability**, v. 13, n. 15, p. 8460, 2021.

SALEH, A. S. M.; ZHANG, Q.; CHEN, J.; SHEN, Q. Millet Grains: Nutritional Quality, Processing, and Potential Health Benefits. **Compr. Rev. FoodSci. FoodSafety**. v.12, p. 281295, 2013.

SAINAM, M. N.; *et al.* Effect of chemical modification on some structural and functional properties of pennisetin, a major seed storage protein from pearl millet. **Phytochemistry**, v. 34, 4, p. 919-925, 1993

SHAH, N. P. Functional foods, probiotics and prebiotics. **Food Technology**, v. 55, p. 46-53, 2001.

SHAN, S., SHI, J., LI, Z., GAO, H., SHI, T., LI, Z., LI, Z. Targeted anti-colon cancer activities of a millet bran-derived peroxidase were mediated by elevated ROS generation. **Food & function**, v. 6, n. 7, p. 2331-2338, 2015.

SHAHIDI, F.; CHANDRASEKARA, A. Millet grain phenolics and their role in disease risk reduction and health promotion: A review. **Journal of Functional Foods**, v. 5, n. 2, p. 570581, 2013.

SHARMA, B.; CHUGH, L. C. Two isoforms of lipoxygenase from mature grains of pearl millet [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.]: purification and physicochemico-kinetic characterization. **J Food Sci Technol**, v. 54, n.6, p.1577–1584, 2017.

SHARMA, N.; BHATIAS, S.; CHUNDURI, V.; KAUR, S.; SHARMA, S.; KAPOOR, P.; KUMARI, A.; GARG, M. Pathogenesis of celiac disease and other gluten related disorders in wheat and strategies for mitigating them. **Frontiers in Nutrition**. v.7, 2020

SHOBANA, S.; *et al.* Finger millet (*ragi*, *Eleusinecoracana* L): a review of its nutritional properties, processing, and plausible health benefits. **Adv. FoodNutr**, v.69, p. 1-39, 2013.

SILVA, P. C.; *et al.* Doença Celíaca: Revisão. **Clinica e Pesquisa em Odontologia**, v.2, n.5/6, p. 401-406, 2006.

SILVA, E.M.M.; ASCHERI, J.L.R.; ASCHERI, D. P. R. Quality assessment of glutenfree pasta prepared with a brown rice and corn meal blend via thermoplastic extrusion. **LWT - Food Science and Technology**, v. 68, p. 698–706, 2016.

SUKNARK, K.; PHILLIPS, R. D.; CHINNAN, M. S. Physical properties of directly expanded extrudates formulated from partially defatted peanut flour and different types of starch. *Food Research International*, v. 30, n. 8, p. 575-583, 1997

STORCK, C. R.; *et al.* Características tecnológicas de pães elaborados com farinha de arroz e transglutaminase. **Braz. J. Food Technol.**, II SSA, janeiro 2009.

TAKEITI, C.Y. Ageitec - Agência Embrapa de Informação Tecnológica. **Cereais e grãos**. Disponível em:

http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000fid57plx02wyiv80z4s47384pdxjo.html. Acesso em: 04 abr. 2017.

TAYLOR, J. R. N. Millet Pearl: Overview. In: (Ed.). **Encyclopedia of Food Grains (Second Edition)**. Oxford: Academic Press, 2016, p.190-198.

TAYLOR, J. R. N.; DUODU, K. G. Effects of processing sorghum and millets on their phenolic phytochemicals and the implications of this to the health-enhancing properties of sorghum and millet food and beverage products. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, p. 225–27, 2015

TAYLOR, J. R. N.; EMMAMBUX, M.N. Gluten-free cereal products and beverages. In: Arendt, E.K., Bello, F.D. (Eds.), **Gluten-free Foods and Beverages from Millets**. Elsevier Inc., Amsterdam, pp. 119e148, 2008.

TEBA C S, ASCHERI J L R, CARVALHO C W P. Efeito dos parâmetros de extrusão sobre as propriedades de pasta de massas alimentícias pré-cozidas de arroz e feijão. **Alimento e Nutrição**, v. 20, p. 411-426, 2009.

THEODORO, J.M.V.; MARTINEZ, O.D.M.; GRANCIERI, M.; TOLEDO, R.C.L.; DIAS MARTINS, A.M.; DIAS, D.M.; ... MARTINO, H.S.D. Germinated millet flour (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) reduces inflammation, oxidative stress, and liver steatosis in rats fed with high-fat high-fructose diet. **Journal of Cereal Science**, v. 99, p. 103207, 2021.

THOMPSON, L.V. Potential health benefits and problems associated with antinutrients in foods. **Food Res Intl**, v.26, p.131–49, 1993.

VAN RENSBURG, S.J. Epidemiological and dietary evidence for a specific nutritional predisposition to esophageal cancer. **J Natl Cancer Inst** v.67, n.2, p.243–51, 1981.

VALADÃO, R. C. **Produção de Transglutaminase Microbiana e Aplicação em Pão Sem Glúten**. 2014 Tese. (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Instituto de Tecnologia, Departamento de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2014

VAN RENSBURG, S. J. Epidemiologic and dietary evidence for a specific nutritional predisposition to esophageal cancer. **Journal of the National Cancer Institute**, v. 67, n.2, p. 243-25, 1981.

VARGAS-SOLÓRZANO, J. W.; et al. Physicochemical properties of expanded extrudates from colored sorghum genotypes. **Food Research International**, v. 55, p. 37-44, 2014.

VISWANATH, V.; UROOJ, A.; MALLESHI, N.G. Evaluation of antioxidant and antimicrobial properties of finger millet polyphenols (*Eleusine coracana*). **Food Chem**, v. 114, n.1, p.340–6, 2009.

WATKINS, R.D.; ZAWAHIR, S. Celiac disease and nonceliac gluten sensitivity. **Pediatric clinics**. v.64, n.3, p.563-576, 2017

WIESER, H. Chemistry of gluten proteins. **Food Microbiology**, v 24 (2), p.115-119, 2007.
WHO - World Health Organization. **World Health Organization India: WHO statistical profile**. Disponível em: <http://www.who.int/gho/countries/ind.pdf>. Acesso em: 21 out. 2017

YE, J.; HU, X.; LUO, S.; LIU, W.; CHEN, J.; ZENG, Z.; LIU, C. Properties of Starch after Extrusion: A Review. **Starch - Stärke**, v. 70, n.11-12, 2017

ZHANG, G.; HAMAKER, B. Nutraceutical and health properties of sorghum and millet, in LIANGLI, Y.; TSAO, R.; SHAHIDI, F. **Cereals and Pulses: Nutraceutical Properties and Health Benefits**, ed. by Wiley, Ames, IA, p. 165–186, 2012.

ZHU, F. Structure, physicochemical properties, and uses of millet starch. **Food Research International**, v. 64, p. 200–211, 2014.

CAPÍTULO II
IMPACT OF WHOLE MILLET EXTRUDED FLOUR ON THE
PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES AND
ANTIHYPERGLYCEMIC ACTIVITY OF GLUTEN FREE BREAD

Published at *LWT - Food Science and Technology* (A1, IF: 4.006), 147, 111495, 2021.

RESUMO

O milheto (*Pennisetum glaucum*) é um pequeno grão de cereal, sem glúten, originário da África e que atualmente não está introduzido na dieta ocidental. É uma interessante fonte de fibra alimentar, vitaminas, minerais, proteínas e compostos fenólicos superior aos cereais consumidos tradicionalmente. É uma cultura muito eficaz adotada em sistema de plantio direto com uma área plantada de mais de 4 milhões de hectares no Brasil. O pão é um produto alimentar de grande aceitação tradicionalmente feito de trigo e, principalmente, elaborado a partir de farinhas refinadas. No entanto, é conhecido por apresentar alto índice glicêmico e baixos níveis de fibra alimentar e por conter naturalmente proteínas do glúten. O objetivo deste trabalho foi desenvolver pães integrais a partir de misturas de farinhas crus e extrudadas de milheto e avaliar os parâmetros físico-químicos em comparação à pães integrais comerciais com e sem glúten. O uso da extrusão aumentou a capacidade antioxidante ($215,2 \pm 1,9 \mu\text{M Trolox/g}$) e a inibição enzimática da α -glicosidase ($96,31 \pm 0,005\%$) em relação ao produto elaborado a partir da farinha crua. O milheto se apresenta como um alimento potencial interessante para a produção de pães na dieta da população brasileira, principalmente, para indivíduos acometidos por alergia ao glúten e pela diabetes.

Palavras-chave: α -glicosidase; sem glúten; capacidade antioxidante

ABSTRACT

Millet (*Pennisetum glaucum*) is a small gluten-free cereal originated from Africa that is not currently introduced in the Western diet. It is an interesting source of dietary fiber, vitamins, minerals, proteins and phenolic compounds superior to the most traditional consumed cereals. It is very effective crop adopted in no tilling farming system planted with an area of more than 4 million hectares in Brazil. Bread is a food product of high acceptance that is traditionally made from wheat, particularly from refined flours. However, it is known to present a high glycemic index and low levels of dietary fiber and naturally contains gluten proteins. The objective of this work was to develop whole grain bread using blends of raw and extruded flours from millet and to evaluate the physicochemical parameters in comparison to commercial whole bread products with and without gluten. The use of extrusion increased antioxidant capacity ($215.2 \pm 1.9 \mu\text{M Trolox/g}$) and enzymatic inhibition of α -glucosidase (96.31 ± 0.005) in relation to the product elaborated from raw flour. Millet is presented as potential food interesting for the production of bread considered in the diet of Brazilian population, particularly to those suffering from gluten allergy and diabetes.

Keywords: α -glucosidase; gluten-free; antioxidant capacity

1. INTRODUCTION

Bread is obtained by swelling, kneading and cooking under technologically appropriate conditions, from fermented or unfermented dough prepared with wheat flour and/or other flours that naturally contains gluten-forming proteins (Mondal & Datta 2008). Traditionally, bread is made mainly from refined wheat flour (*Triticum* spp) added with other ingredients such as water, salt and leavening agents, presenting a high energy density with low nutritional value. Modern life style demands easy consumption and practicality that increases the consumption of fast-prepared foods or home-cooked meals considering the experience in the Covid-19 era. In addition to this scenario, food awareness and/or presence of chronic diseases with food restriction drives the food industry to changes including gluten free products development along with high nutritional value (Modal & Datta, 2008).

Millet emerges as an interesting cultivar dating back from the Neolithic era, that presents nutrient content equivalent to or even higher than other cereals (e.g. sorghum) (Balasubramanian et al., 2014; Zhang & Hamaker 2012). It is the sixth most important crop in the world, with production close to 29 million tons (Faostat, 2015). However, the millet grains are still underutilized in many countries but widely consumed in African Countries and India.

So, millet grains are rich in dietary fiber and polyphenols that could reduce the occurrence of lipid disorders, cardiovascular diseases, hyperglycemia, delayed gastric emptiness among others (Saleh *et al.*, 2013; Dias-Martins *et al.*, 2018). The phenolic acids presented in pearl millet are *p*-hydroxybenzoic acids, gallic, vanillic, caffeic, ferulic, sinapic and *p*-coumaric acid (Shahidi & Chandrasekara, 2013, Taylor & Doudu, 2015). In addition, whole meal flour offers many health benefits due to the high content of fibers and phenolic compounds, contributing to lower glycemic index due to enzymatic inhibition than refined cereals, which results in decreased hydrolysis of carbohydrates and consequent reduction of available glucose for absorption. Millet grains also contain high content of non-starch polysaccharides (Taylor, 2016; Muthamilarasan *et al.*, 2016), in which about 95 % of dietary fiber are presented in the bran (Rai *et al.*, 2008). Average content ranges from 8 to 9 g / 100 g and the majority fiber type is insoluble (90%), which is known to play an important role in glycemic control (Taylor, 2016). Starch levels in the grains may range from 61.0 to 70.3% and the grain also has similar energy content to other traditional cereals (Rai *et al.* 2008, Taylor, 2016), approximately 361 kcal / 100 g (Jalgaonkar & Jha, 2016).

Development of innovative products can be effectively helped using thermoplastic extrusion process as a tool of viable alternative to industrial production, when compared to traditional processes, presenting a low water and energy footprints (Balasubramanian et al., 2014). Furthermore, it provides enzymatic inactivation, reduction of antinutrients and microbial population by the conjugated effect of the thermal and mechanical shear, resulting in a low residence time in the extruder. In addition, thermoplastic extrusion confers physicochemical modifications in starch, fibers and proteins that could be useful in developing food for specific purposes, both in terms of technological properties and required nutritional characteristics. Concerning to physicochemical changes caused by extrusion cooking, such as exposure of hydroxyl groups contributes to increase the water absorption capacity and the complexes formed by starch and proteins that can imitate viscoelastic properties, similar to the gluten network. Hydrothermal modifications can induce interactions (new hydrogen bonds) between glucan chains and facilitate chain realignment (Vamadevan & Bertoft, 2020). In this regard, different combinations between raw and

extruded gluten free flours could provide final product (e.g. bread) of desirable technological characteristics close to gluten-based products (Patil et al., 2016).

The objective of this study was the produce bread using 100% of whole grain millet flour varying the proportion of raw and extruded flours by comparing it to commercial gluten free bread based on their physicochemical properties, antioxidant capacity and glycemic index.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Materials

BRS 1502 millet cultivar of *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. was produced in the experimental fields of Embrapa Milho e Sorgo (Sete Lagoas, Latitude S 19°27'57 ", Longitude W 44°14'49 ", Southeast Region, Brazil) in 2018, transported and stored in a cold chamber at 16 °C, during the experiments. The other ingredients for the preparation of bread, such as salt, sugar, eggs, dry yeast and fat were purchased in local market of Rio de Janeiro (Brazil). Two controls commercial breads: 1. whole wheat bread (Fig. 1d) and 2. whole wheat gluten free bread (Fig. 1e) was purchased in local markets of Rio de Janeiro (Brazil).

2.2. Millet bread preparation

In order to obtain raw whole grain millet flour (RMF) and precooked millet flour (PCMF), whole millet grains were ground in an LM3100 hammer mill (Perten Instruments AB, Huddingen, Sweden) equipped with a sieve opening sieve of 0.8 mm. PCMF was obtained by processing RMF in a twin screw extruder Evolum HT25 (Clextral Inc., Firminy, France) with screws of 25 mm sectional diameter running at 500 rpm, 40:1 length/diameter ratio (L/D), barrel with ten temperature controlled heating zones (25, 40, 60, 80, 110, 120, 120, 140 and 140 °C), fitted with a circular die of 4 holes of 3.8 mm diameter each. The water content of the RMF was adjusted to 15% water content with help of a water feed piston pump (Zhejiang Ailipu Technology, Co. Ltd., Talzhou Shi, China).

After processing, the extrudates were dried in a fan oven (Hauber Macanuda, Joinville, Brazil) at 45 °C overnight and then shredded in an industrial blender (Skymesen, Brusque, Brazil) and subsequently packaged in plastic bags and sealed until the later analyzes and elaboration of the products.

The bread formulation was developed from previous tests, being the best formulation chosen. Bread making was carried out using 100% RMF, 100% PCMF and 50:50 blend of RMF:PCMF. The other ingredients added, based on 100% flour, were water (35%), dry yeast (5%), salt (2%), fat (8%), whole liquid eggs (35%) and fine granulated white sugar (10%). The bread making process was the direct fermentation of the dough, in which yeast and sugar were dissolved in the liquid phase and added to other ingredients in a planetary mixer M5A (Guangzhou Panyu Jianye Imp. & Exp. Trading Co. Ltd, Guangzhou, China) equipped with flatter beater until complete homogenization, remaining at rest for 30 min. The dough were placed in rectangular metal trays (15x7x4 cm) previously greased with soybean oil and placed in fermentation chamber at 35 °C and 75 % humidity for 90 min. Breads were then baked in an electrical oven FE5012PT (Suggar, Belo Horizonte, Brazil) at 200 °C for 40 min. After cooling, they were stored in polyethylene packages at room temperature until further analysis.

2.3. Amylose and amylopectin content

Amylose and amylopectin contents of RMF, PCMF and breads were determined using a Megazyme Assay kit (Megazyme Intl. Ireland Ltd., Wicklow, Ireland), according to 79-13 (AACC, 2000) method. The results were expressed in percentage.

2.4. Analysis of the texture profile of bread

The texture profile analyzes (TPA) was performed out according to Torbica and his collaborators (2019), with modifications, in a TA XT Plus texture analyzer software Exponent version 6.1.11.0 (Stable Micro Systems, Surrey, UK), fit to a 30 kg load cell, following the application guide, using a cylinder probe of 10 mm diameter at test speed of 5 mm/s. The compression was performed in 2 cycles and the deformation percentage was set to 50%. Seven squares of each bread sample excluding the shell, sized 20 mm x 20 mm and approximately 12 mm high were analyzed and the parameters hardness, gumminess, elasticity, cohesion, chewiness and resilience were calculated. Commercial gluten free bread (control 1) and whole wheat bread (control 2) were used as control samples.

2.5. In vitro antihyperglycemic activity of bread

The antihyperglycemic activity of bread samples were determined according to AlDhaheri, *et al.* (2017) and Ayyash *et al.* (2018). α -glycosidase inhibitor activity was determined in a UV-vis spectrophotometer SP-2000 UV (Spectrum, Kazuaki, China) at 400 nm. A solution without the sample was used as a control and a solution without the substrate for the enzyme was used as a blank. In order to compare the performance of millet-based bread against hyperglycemia, a commercial hypoglycemic drug (ACARBOSE ©) was used as a positive control. A solution with this drug replaced the sample in calculation of percent inhibition. The percent inhibition (%) was calculated according to the following equation:

$$\% \text{ inhibition} = \left[1 - \frac{Abs_{\text{sample}} - Abs_{\text{control}}}{Abs_{\text{control}}} \right] \times 100$$

Where:

[[Abs]] sample = Enzyme + Sample + Substrate

[[Abs]] control = Enzyme + Substrate

2.6. Antioxidant capacity

2.6.1. Sample preparation

Dried fine milled breads were subjected to ethanol extraction, according to Rufino *et al.* (2010). The 80% ethanolic extracts were used to determine the antioxidant capacity by the methods of 2,2-definil-1-picryl-hydrazine (DPPH) and Ferric Antioxidant Reducer (FRAP).

2.6.2. Free radical sequestration method (DPPH)

The samples prepared in 2.6.1 were determined for antioxidant capacity by capturing DPPH according to Rufino et al. (2010). Samples were analyzed at 517 nm, using a vis spectrophotometer VM5 (Bel, Monza, Italy) after 60 min reaction and results were expressed in scavenging free radical (SFR).

2.6.3. Ferric Reduction Antioxidant Power (FRAP)

The antioxidant capacity by iron reduction was determined according to Rufino et al. (2010). The FRAP solution was formed by acetate buffer, 2,4,6-tris(2-pyridyl)-s-triazine (TPTZ) solution and ferric chloride. Standard solutions and samples were analyzed at 595 nm, using a vis spectrophotometer VM5 (Bel, Monza, Italy). Antioxidant capacity was calculated, in which values were subjected to a standard curve and the results were expressed in μM Trolox 100 g of dried sample.

2.6.4. Determination of total phenolic content (TPC)

Total phenolic content were determined as described by Quettier-Deleu *et al.*, (2000) using Folin-Ciocalteu phenolic reagent in methanolic extracts. Standard acid gallic solutions were prepared and these solutions and samples were analyzed at 685 nm, using – vis spectrophotometer VM5 (Bel, Monza, Italy). Calibration curve was built and results were expressed by Acid Gallic Eq (GAE)/100 g (d.b.).

2.7. Determination of volume and height

Bread volume was measured using millet seeds displacement as described in the approved method 10–05.01 (AACC International, 2000).

2.8. Determination of nutritional composition

The protein content was calculated using standard methods n. 46-13 (AOAC, 1995). The lipid content was calculated by the official method of AOCS Am 5-04, the dietary fiber content was determined by method n. 985.29 (AOAC, 2005) and the carbohydrate content was determined according to Resolution - RDC No. 360 of December 23, 2003.

2.9. Statistical analysis

Results of each evaluated parameter were submitted to analysis of variance (ANOVA) and Tukey test at 95% of confidence level using Excel, version 2008 (Microsoft, Redmond, USA). XLSTAT 2014 (Addinsoft, Paris, France) software was used for data evaluation.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Millet bread preparation

In the present study, the bread with the highest specific volume and height and the greatest formation of uniform aovoli was the bread made with 50:50 RMF + PCMF followed by the bread made with 100% RMF and the bread with the smallest specific volume was the

made with 100% PCMF (Table 2.2). This result is directly related to an analysis of the texture profile, in which the bread made with the 50:50 mixture of flours presents the greatest softness.

Studies report that cereal breads from sorghum and millet are characterized by lower specific volumes in less hardness compared to cereal loaves made of wheat, rye and oats, due to the absence of gluten (Torbica et al., 2019) and their chemical composition, which is shown in Table 2.3.

During the preparation of bread with 100% RMF, an increase in volume could be visually observed (Fig. 2.1A) along olfactory characteristics which were similar to commercial wholegrain bread, with visible development of uniform and small cells. According to Aoki (2020), the higher amylose content promotes greater gas retention properties and volumes in gluten-free breads prepared with rice flour, thus, it is possible to suggest, that samples prepared with 100% RMF presented high volume due to a higher concentration of amylose in the RMF compared to PCMF (Table 2.1). However, despite the high expansion observed in bread dough made with 100% RMF, the presence of fibers (Table 2.3) may have caused discontinuity of the dough matrix associated with the absence of a network capable of retaining the gas produced from the fermentation (AOKI, 2020). 100% RMF bread did not present a dough structure sufficiently stable to maintain the initial volume and presented reduction in size (Fig. 2.1A).

On the other hand, dough with 100% of precooked flour did not grow during the fermentation and presented spongy texture, probably due to the strong interactions between the hydrogen and water during the preparation and lack network formation capable of retaining the gas released during fermentation (Fig. 2.1B).

According to Capriles (2011), modified starch could be used by replacing gluten network in gluten free products such as breads. Extrusion process in specific conditions, as in the present study, may have promoted adequate starch modification that provided the final product characteristics closed to gluten made products (Fig 2.1C).

Among the developed formulations (RMF, PCMF and RMF and PCMF (50: 50) the bread that presented similar characteristics to commercial whole wheat bread was prepared with a mixture of RMF and PCMF (50:50) (Fig. 2.1C). As per these similar characteristics the millet bread RMF and PCMF (50:50) showed high increase volume rate during the fermentation process and maintained these characteristics after cooking. According to Aoki (2020), one of the great challenges of producing gluten-free bread is the deficient gas retention during fermentation, which results in low bread volume.

Patil *et al.* (2016) studied the development of a wheat plain flour with different levels of substitution of raw and extruded finger millet flour (*Eleusine coracana* L.). Breads made with extruded millet flour had better technological properties (volume and height), good texture (low hardness, high resilience) when compared to breads added of raw millet flour, corroborating with results found in this study.

Compared to wheat bread, there is a major challenge in the production of gluten-free breads due to deficient gas retention during fermentation produced in the formation of uneven alveoli and breads with low height and volume (Aoki et al., 2020), which alter the softness of the crumb, where breads with higher specific volumes have greater softness and greater formation of alveoli (Schoenlechner et al., 2018).

Table 2.1. Amylose and amylopectin content and *in vitro* antihyperglycemic activity (α -glycosidase) of millet-based breads

	Amylose (%)	Amylopectin (%)	Antihyperglycemic activity (%)
RMF	31.60 $\pm$ 1.19 ^a	68.48 $\pm$ 1.19 ^c	90.30 $\pm$ 0.00 ^c
PCMF	9.09 $\pm$ 0.02 ^b	90.91 $\pm$ 0.02 ^b	99.20 $\pm$ 0.01 ^a
RF+PCMF	5.36 $\pm$ 0.19 ^c	94.64 $\pm$ 0.019 ^a	96.31 $\pm$ 0.01 ^b
ACARBOSE®	-	-	70.39 $\pm$ 0.01 ^d

Results expressed in percentual of amylose, amylopectin and α -glycosidase inhibitor (%). Values are determined by at least triplicate individual experiments. $\pm$ standard deviation. ^{a-c} Different letters at the same column indicates significant differences between samples ($p < 0.05$).

Table 2.2. Analysis of the texture profile, volume and height of millet-based breads.

Sample	Hardness (N)	Elasticity	Resilience	Gumminess	Chewiness	Cohesiveness	Volume	Height
RMF	922.7 $\pm$ 6.2 ^d	0.82 $\pm$ 0.02 ^d	0.124 $\pm$ 0.02 ^e	217 $\pm$ 1.8 ^d	178 $\pm$ 6.7 ^e	0.178 $\pm$ 0.05 ^e	0.88 $\pm$ 0.03 ^a	3.7 $\pm$ 0.25 ^a
RMF+PCMF	623.6 $\pm$ 3.9 ^b	0.89 $\pm$ 0.01 ^c	0.269 $\pm$ 0.01 ^b	126 $\pm$ 1.12 ^b	900 $\pm$ 1.9 ^b	0.534 $\pm$ 0.02 ^c	0.93 $\pm$ 0.02 ^a	4.0 $\pm$ 0.15 ^a
PCMF	3957 $\pm$ 26 ^a	0.89 $\pm$ 0.03 ^c	0.227 $\pm$ 0.02 ^d	2118 $\pm$ 5.1 ^a	189.2 $\pm$ 46.8 ^a	0.775 $\pm$ 0.04 ^a	0.59 $\pm$ 0.01 ^b	3.6 $\pm$ 0.0 ^a
Control 1	1163 $\pm$ 5.9 ^c	0.91 $\pm$ 0.05 ^b	0.267 $\pm$ 0.07 ^c	563 $\pm$ 2.8 ^c	528 $\pm$ 3.9 ^c	0.496 $\pm$ 0.08 ^d	X	-
Control 2	215.3 $\pm$ 5.3 ^e	2.95 $\pm$ 1.5 ^a	0.404 $\pm$ 0.03 ^a	162 $\pm$ 6.5 ^e	442 $\pm$ 4.3 ^d	0.636 $\pm$ 0.06 ^b	X	-

Control¹: Commercial whole grain gluten free bread; Control²: Commercial whole wheat bread. Values are determined by at least triplicate individual experiments. $\pm$ standard deviation. ^{a-e} Different letters at the same column indicate significant differences between samples ($p < 0.05$).

Table 2.3. Antioxidant capacity by DPPH and FRAP methods, total TCP concentration and nutritional composition of millet-based breads.

Samples	DPPH ¹	FRAP ²	TCP ³	Carbohydrate	Protein	Lipid	Dietary Fiber
RMF ⁴	69.1 $\pm$ 1.04 ^c	177.7 $\pm$ 1.5 ^c	122.4 $\pm$ 2.05 ^b	44.5 $\pm$ 0.4 ^a	10.3 $\pm$ 0.3 ^a	9.1 $\pm$ 0.6 ^a	8.0 $\pm$ 0.4 ^a
PCMF ⁵	80.8 $\pm$ 1.6 ^a	233.7 $\pm$ 0.1 ^a	131.9 $\pm$ 5.0 ^a	40.7 $\pm$ 2.5 ^a	9.34 $\pm$ 0.6 ^a	7.1 $\pm$ 0.8 ^a	7.7 $\pm$ 0.0 ^a
RMF+PCMF ⁶	76.9 $\pm$ 1.02 ^b	215.2 $\pm$ 1.9 ^b	108.26 $\pm$ 0.001 ^c	43.1 $\pm$ 0.4 ^a	10.1 $\pm$ 0.1 ^a	7.6 $\pm$ 0.2 ^a	8.3 $\pm$ 0.1 ^a

Results expressed ¹% SFR; ² μ molFe^{II}/g; ³ μ mol gallic acid equiv./g. Values are determined by at least triplicate individual experiments. $\pm$ standard deviation. ^{a-c} Different letters in the same column indicate significant differences between samples ($p < 0.05$). 1- DPPH: 2,2-definil-1-picryl-hydrazine, 2- FRAP: Ferric Antioxidant Reducer Power, 3- TCP: Determination of total phenolic content, 4- RMF: Raw whole grain millet flour, 5- PCMF: Precooked millet flour, 6- RMF+PCMF: Raw whole grain millet flour and precooked millet flour

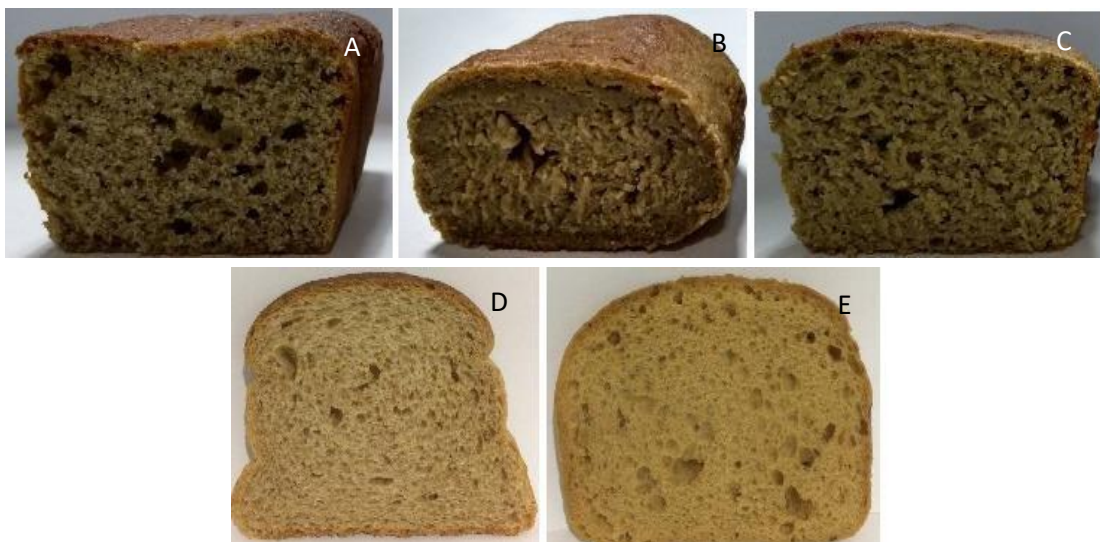


Figure 2.1. Breads developed with 100% row millet flour, pre-cooked flour and 50:50 pre - cooked and raw flour. (A) digital photograph of the integral bread millet with 100% row flour, (B) digital photograph of the integral bread millet with 100% pre-cooked flour, (C) digital photograph of the integral bread millet with 50:50 pre-cooked and raw flour, (D) digital photograph commercial whole wheat bread, (E) digital photograph commercial whole grain gluten free bread.

3.2. Amylose and amylopectin content

Amylose content is shown in Table 2.1. The RMF sample had higher amylose (31.6 %) content than the PCMF sample (5.4%). Probably, the amylose reduction would be an indication of amylose lipid complexes formed by the extrusion process, since the whole grain millet flour has considerable lipid content. It is known that when starch conversion occurs, an increase in resistant starch type III or V is observed. This process can be increased by double helices of amylose chains re-arrangement allowing the formation of partially crystalline structure in the presence of lipids (Panyoo & Emmanbux, 2017).

Thus, lipid-starch complexes influence the starch's susceptibility to degradation enzymes, resulting in slower digestion (Annor, 2017). The main fatty acids present in millets are palmitic, oleic and linoleic, which constitute about 85% of the total fatty acids. Complexation with oleic acid and lauric acid has been reported as very effective in reducing rates of starch hydrolysis, enabling the reduction of rapidly digestible starch (Annor et al., 2015; Annor, 2017; Bora, 2014). In addition to the starch-lipid complexes, the literature suggests that non-covalent interactions between phenolic compounds and starch can also form complexes. It can be assumed that amylose linear chains are more capable of interacting with polyphenols (mainly flavonoids, phenolic acids and tannins), to form inclusion complexes on the outer surface of starch, mainly through hydrogen bonds, hydrophobic interaction and / or electrostatic as well as ionic interactions in the form of single helices called type V amylose (Giuberti et al., 2020), that is corroborate by results found in antioxidant capacities by DHHP and FRAP methods (Table 2.3), in which extrusion process leads to an increase of values in comparison to raw material and a decrease of amylose content (Table 2.1). These complexes can contribute to form a denser starch network, with limited

accessibility to digestive enzymes, contributing to form certain enzyme starch resistant fractions defined as resistant starch type 5 (Giuberti et al., 2020).

3.3. In vitro antihyperglycemic activity of millet bread

The anti-hyperglycemic activity (Table 2.1) of millet-based breads showed a percent of inhibition of 90.3 % to RMF and 99.2 % to PCMF ($p > 0.05$), that representing a 20-30% higher than hypoglycemic drug (positive control). These findings are probably related to the antioxidant capacity and the high fiber content present in raw and extruded flours (8.37 g/100g). It is known that the presence of dietary fibers provides a significant increase in water retention, which increases the viscosity of the medium, reduces the access of digestive enzymes to carbohydrates and the rate of hydrolysis/absorption of glucose in the intestine through the modulation of enzymes such as α -glycosidase (Chandrasekara & Shahidi, 2011; Kam et al., 2016; Taylor, 2016). Regarding the modulation of starch digestibility, two main mechanisms have been proposed, namely, the modulation of glycolytic enzymes and the formation of supramolecular complexes between starch and phenolic compounds and/or lipids. Probably, one mechanism does not exclude the other, and they may play a complementary role in modulating the digestion of starch (Giuberti et al., 2020), and as shown in Table 2.3, there is considerable presence of lipids in the breads. In relation to polyphenols, especially flavonoids have hypoglycemic effects by inhibiting α -glycosidase and pancreatic amylase during the hydrolysis of starch. Flavonoids have a structure similar to the α -glucosidase substrate, therefore, they may compete with the active site by deactivating the enzymes, and the more carbon rings the structure has, the greater is its potential for enzymatic inhibition due to competition with the active site (Derosa & Maffol, 2012; Tandra et al., 2006). Therefore, flavonoids can be compared to commercial drugs, such as acarbose and miglitol (Annor, et al., 2017). Inhibition of α -glucosidase is an important factor in the glycemic response, as it is the main enzyme that breaks the α -1,4 bonds degrading starches and disaccharides into glucose, acting in the last stage of the process of digesting carbohydrates in the brush borders of the intestinal membranes (Williamson, 2013).

Kim *et al.* (2011) investigated the inhibitory effect of 70% EtOH extracts from different sorghum and millet cultivars on α -glucosidase and α -amylase. The sorghum cultivars showed greater inhibitory activities against α -glucosidase than acarbose, while millet extracts (foxtail millet and proso millet) did not show detectable inhibitory effect on α -glucosidase activity. This study may suggest that pearl millet has greater anti-diabetic potential than other botanical species of millet.

Ferulic and p-coumaric acids are the main phenolics found in pearl millet grain extracts and are generally concentrated mainly in the pericarp, therefore, the use of whole grain flour can contribute to reduce the glycemic index (Chandrasekara & Shahidi, 2011; Taylor, 2016). The synergy between phenolics and dietary fiber may play a role in mediating enzyme inhibition, hence it has the potential to contribute to the management of type 2 diabetes (Annor et al., 2017).

3.4. Analysis of the texture profile of bread

Regarding the texture profile, the results are shown in Table 2.2. All gluten-free breads had higher hardness value compared to whole-grain wheat bread. These results corroborate with the findings of Torbica *et al.*, (2019) that developed rye, oat, sorghum and

millet breads and found that all breads made from gluten-free flours were harder, less elastic and more granular mouth feel. The use of whole flours also interferes with texture parameters, since high fiber content (Table 2.3) stiffens the walls surrounding the gas cells from fermentation, making the dough firmer (Patil et al., 2016; Skendi, et al., 2010).

PCMF bread had the highest hardness value, probably due to the lower amylose content (in relation to RMF) and due to the interaction between modified starch molecules that formed a rigid network, limiting the mass expansion during the fermentation process (Bhol & Bosco, 2014). In other words, the thermoplastic extrusion process is an efficient tool that modifies amylose-amylopectin chains forming a structure that could be used in replacement of gluten in gluten-free matrix. A higher content of amylose would lead to greater gas retention properties, thus promoting greater softness of the dough (Aoki, 2020). Bread with 50:50 RMF + PCMF showed hardness values close to commercial whole wheat bread, whereas the RMF showed value close to the gluten-free bread (Table 2.2). Modification of starch by extrusion process also led to an increase in gas retention during the fermentation process. In general, elasticity is an indicator of the dough ability to promote gas retention from fermentation, and low elasticity leads to the loss of the structure formed during fermentation, causing a reduction in the gas retention capacity (Patil et al., 2016). In the present study, the elasticity of bread (whose lower value indicates rapid recovery after deformation) produced from the RMF + PCMF mixture and the bread produced with PCMF were close to commercial gluten-free samples, despite being statistically different. Concerning to resilience, the bread produced with RMF + PCMF mixture (0.269 N) was similar to commercial gluten-free sample (Control 1) (0.267 N), even though showed statistical difference. However, in regard to gumminess and chewiness, RMF+PCMF bread showed values approximately 2-fold higher in comparison to commercial gluten-free bread. This behavior occurs due to the starch conversion and greater fluidity of the sample structures. In the present study, considering same production process, the observed gumminess may have being caused due to the proportion of pre-cooked flour used, which in general presents higher water absorption rate and, as consequence, higher gumminess was observed in 100% PCMF bread (2118 N). Finally, cohesiveness describes the ability of food retains its form between 1st and 2nd chew. As expected, due to the presence of gluten-starch matrix in commercial whole wheat bread (control 2), it showed higher value (0.636 N) compared to commercial gluten-free bread (control 1) (0.496 N), but this result is still so close to the RMF+PCMF bread cohesiveness observed value (0.534 N).

3.5. Antioxidant capacity

The results of antioxidant capacity of DHPP, FRAP and TCP are shown in Table 2.3. All samples showed a significant difference ($p > 0.05$). Bread produced with PCMF had the highest values of antioxidant capacity than bread produced exclusively with RMF, indicating that extrusion may have promoted the release of phenolic compounds from the food matrix (Dias-Martins et al., 2018). Bread based on RMF + PCMF showed intermediate values of antioxidant capacity, DHPP, FRAP and TCP lower than bread based on PCMF. The results demonstrated that the phenolic compounds are stable to the conditions of high temperature extrusion (140 °C) and shear. It has been shown that high temperature and shear during extrusion releases the phenolic compounds from the cereals pericarp, resulting in an increase in free phenolic compounds (Patil et al., 2016; Siroha & Sandhu, 2017). Extrusion processing had no deleterious effect on the antioxidant capacity of whole millet products, corroborating

to the work of Florence & Asna (2011) who studied the effect of different processes on the content of antioxidant compounds in pearl millet flour and on the scavenging capacity of the DPPH free radical. The results showed that fractions rich in bran showed the highest antioxidant activity and high levels of tannin, phytic acid and mainly flavonoids, indicating that the use of whole grain is essential to ensure the presence of antioxidant compounds. Regarding the use of temperature, the flours submitted to thermal treatments exhibited significantly ($P \leq 0.05$) greater antioxidant activity, with 60% of DPPH scavenging percentage, reflecting high content of flavonoids. The current study showed different scavenging values as the highest value was found for PCMF bread, 80.08%, followed by RMF bread, 60%, and 50:50 bread, 76.9%.

4. CONCLUSION

Pearl millet has the potential to be used in baking with the desired characteristics in terms of gluten mimicking substitute and antioxidant compounds. The use of extrusion technology did not reduce the nutritional content of the breads, it also significantly improved their antioxidant capacity and also contributed to a lower hardness and greater specific volume (RMA + PCMF 50:50). In addition, this addition contributes to obtaining a food with antihypoglycemic activity *in vitro* superior to the hypoglycemic agent used, suggesting that it can be used in diets with carbohydrate restriction. The use of thermoplastic extrusion as a modifying tool applied in whole cereal flour has great potential to replace wheat flour in gluten-free bread formulations.

ACKNOWLEDGMENT

The assistance of Mariana Mattos with the extrusion is gratefully acknowledged. The authors also thank the Brazilian Government Agencies: CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) and FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro) for their generous support of this work.

5. REFERENCES

- AACC (2000). *Approved Methods of the AACC* (10 ed.). Minnesota: American Association of Cereal Chemists.
- AACC International, 2000. *Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists*, tenth ed. AACC International, St. Paul, MN, USA. Method10-11,2000.
- Al-Dhaheri, A. S., Al-Hemeiri, R., Kizhakkayil, J., Al-Nabulsi, A., Abushelaibi, A., Shah, N. P., & Ayyash, M. (2017). Health-promoting benefits of low-fat akawi cheese made by exopolysaccharide-producing probiotic *Lactobacillus plantarum* isolated from camel milk. *Journal of Dairy Science*, 100, 7771–7779. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12761>
- Annor, G., Tyl, C., Marcone, M., Ragaei, S., & Marti, A. (2017). Why do millets have slower starch and protein digestibility than other cereals? Trends in *Food Science and Technology*, 66, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.012>
- Annor, G. A., Marcone, M., Corredig, M., Bertoft, E., & Seetharaman, K. (2015). Effects of the amount and type of fatty acids present in millets on their in vitro starch digestibility and expected glycemic index (eGI). *Journal of Cereal Science*, 64, 76 and 81. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.05.004>
- Aoki, N., Kataoka, T., & Nishiba, Y. (2020). Crucial role of amylose in the rising of gluten and additive-free rice bread. *Journal of Cereal Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102905>
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (1995). *Official methods of analysis* (16th ed.). Washington, DC: Author.
- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2005). *Official methods of analysis* (18th ed.). Washington, DC: Author
- Ayyash, M., Al-Nuaimi, A. K., Al-Mahadin, S & Liu, S. (2018). In vitro investigation of anticancer and ACE-inhibiting activity, α -amylase and α -glucosidase inhibition, and antioxidant activity of camel milk fermented with camel milk probiotic: A comparative study with fermented bovine Milk. *Journal of Cereal Science*, 75, 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.06.149>
- Balasubramanian, S., Kaur, J., & Singh, D. (2014). Optimization of weaning mix based on malted and extruded pearl millet and barley. *Journal Food Science and Technology*, 51, 682–690. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0579-6>
- Bhol, S., & Bosco, S. J. D. (2014). Influence of malted finger millet and red kidney bean flour on quality characteristics of developed bread. *LWT - Food Science and Technology*, 55, 294–300. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.08.012>

- Bora, P. (2014). Nutritional properties of different millet types and their selected Products
- Capriles, V. D. & Arêas, J. A. G. (2011). Avanços na produção de pães sem glúten: aspectos tecnológicos e nutricionais. *Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*. V. 29, No 1. ISSN:19839774 doi: <http://dx.doi.org/10.5380/cep.v29i1.22765>
- Chandrasekara, A., & Shahidi, F. (2011). Antiproliferative potential and DNA scission inhibitory activity of phenolics from whole millet grains. *Journal of Functional Foods*, 3, 159– 170. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.03.008>
- Derosa G, Maffoli P. (2012). α -Glucosidase inhibitors and their use in clinical practice. *Arch Med Sci*, 8(5):899-906. 603 38. <https://doi.org/10.5114/aoms.2012.31621>
- Dias-Martins, A. M. (2018). Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food security, processing, health benefits and nutritional products. *Food Research International*, 109, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.023>.
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Statistics) (2015). *2013 data for major commodities*. <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor/> Accessed 13 April 2017.
- Florence, S. P., & Asna, U. (2011). Influence of processing on dietary fiber, tannin and in vitro protein digestibility of pearl millet. *Food and Nutrition Sciences*, 2, 895–900. <https://doi.org/10.4236/fns.2011.28122>
- Giuberti, G., Rocchetti, G., Lucini, L. Interactions between phenolic compounds, amylolytic enzymes and starch: An updated overview. PII: S2214-7993(20)30032-1 <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.04.003>
- Jalgaonkar, K., & Jha, S. K. (2016). Influence of particle size and blend composition on quality of wheat semolina-pearl millet pasta. *Journal of Cereal Science*, 71, 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.09.007>.
- Kam J, Puranik S, Yadav R, Manwaring H. R., Pierre S., Srivastava R. K. & Yadav R. S. (2016) Dietary Interventions for Type 2 Diabetes: How Millet Comes to Help. published: 27 September <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01454>
- Kim, J., Hyun, T. K., & Kim, M. J. (2011) The inhibitory effects of ethanol extracts from sorghum, foxtail millet and proso millet on α -glucosidase and α -amylase activities. *Food Chemistry*, 124, 1647–1651. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.08.020>
- Mondal, A. & Datta A. K. (2008). Bread baking – A review. *Journal of Food Engineering* 86, 465-474. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.11.014>
- Muthamilarasan, M., Dhaka, A., Yadav, R. & Prasad, M, (2016). Exploration of millet models for developing nutrient rich graminaceous crops. *PlantSci*, 242, 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.08.023>
- Panyoo, A.E.; Emmambux, M.N. (2017). Amylose–lipid complex production and potential health benefits: A mini-review. *Starch - Stärke*, v. 69, n. 7-8, p. 1600203-n/a. <https://doi.org/10.1002/star.201600203>

Patil, S. S., Rudra, S. G., Varghese, E., Kaur, C. (2016). Effect of extruded finger millet (*Eleusine coracana* L.) on textural properties and sensory acceptability of composite bread. *Food Bioscience*, 14, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2016.04.001>

Quettier-deleu, C., Gressier, B., Vasseur, J., Dine, T., Brunet, C., Luyckx, M., Cazin, M. Cazin, J., Bailleul, F., & Trotin, F. (2000). Phenolic compounds and antioxidant activities of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) hulls and flour. *Journal of Ethnopharmacology*, 72, 35–42. [https://doi.org/10.1016/S0378-8741\(00\)00196-3](https://doi.org/10.1016/S0378-8741(00)00196-3)

Rai, K. N., Gowda, C. L. L., Reddy, B. V. S., & Sehgal, S. (2008). Adaptation and potential Uses of Sorghum and Pearl Millet in Alternative and Health Foods. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 7, 320–396. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2008.00049.x>.

Rufino, M. S. M., Alves, R. E., Brito, E. S., Pérez-Jiménez, J., Saura-Calixto, F., & ManciniFilho, J. (2010) Bioactive compounds and antioxidant capacities of eighteen non-traditional tropical fruits from Brazil. *Food Chemistry*, 121, 996–1002. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.01.037>

Saleh, A. S. M., Chen, J., & Shen, Q. (2013). Millet Grains: Nutritional Quality, Processing, and Potential Health Benefits. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12, 281–295. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12012>.

Schoenlechner, Szatmari, M., Bagdi, A., & Tom "osk " ozi, " s. (2013). Optimisation of bread quality produced from wheat and proso millet (*Panicum miliaceum* L.) by adding emulsifiers, transglutaminase and xylanase. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie-Food Science and Technology*, 51, 361–366.

Shahidi, F., & Chandrasekara, A. (2013). Millet grain phenolics and their role in disease risk reduction and health promotion: A review. *Journal of Functional Foods*, 5, 570–581. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2013.02.004>.

Siroha, A. K., & Sandhu, K. S. (2017). Effect of heat processing on the antioxidant properties of pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) cultivars. *Food Measure* 11, 872–878. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9458-1>.

Taylor, J. R. N., & Duodu, K. G. (2015). Effects of processing sorghum and millets on their phenolic phytochemicals and the implications of this to the health-enhancing properties of sorghum and millet food and beverage products. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95, 225–27. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6713>.

Taylor, J. R. N. *Millet Pearl: Overview*. In: (Ed.). *Encyclopedia of Food Grains* (Second Edition). Oxford: Academic Press, 2016. p.190-198. ISBN 978-0-12-394786-4.

Torbica, A., Belović, M., Tomić, J. (2019). Novel breads of non-wheat flours. *Food Chemistry* 282 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.113>

Vamadevan, V., & Bertoft, E. (2020) Observations on the impact of amylopectin and amylose structure on the swelling of starch granules. *Food Hydrocolloids*, 103, 105663. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105663>

Williamson, G. (2013) Possible effects of dietary polyphenols on sugar absorption and digestion. *Mol. Nutr. Food Res.* 57, 48–57. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201200511>

Zhang, G., & Hamaker, B. (2012). Nutraceutical and health properties of sorghum and millet, in Cereals and Pulses. *Nutraceutical Properties and Health Benefits* (pp. 165–186.). Ames, IA. <https://doi.org/10.1002/9781118229415.ch12>

CAPÍTULO III
WHOLE MILLET (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br) PASTA-BASED USING
THERMOPLASTIC EXTRUSION: A GLUTEN FREE FOOD
ALTERNATIVE

Manuscrito em preparação para ser submetido a revista LWT

RESUMO

O macarrão sem glúten foi desenvolvido a partir de farinha de milho integral crua (RMF) e pré-cozida (PCMF) por extrusão termoplástica em equipamento dupla rosca. Os macarrões do tipo *fusilli* foram preparados com RMF (100%) e com uma mistura de RMF:PCMF na proporção de 50:50. As formulações foram caracterizadas quanto à textura, ao teste de cozimento, à capacidade antioxidante, à atividade antihiperglicêmica, às características sensoriais e aos parâmetros de cor instrumental. Visualmente, o produto final apresentou características satisfatórias, se comparado as massas alimentícias tradicionais comerciais. O *blend* RMF:PCMF exibiu melhor integridade dos *fusillis* formados, enquanto a pasta obtida a partir do uso de 100% de RMF foi menos consistente e mais quebradiça. O tempo de cozimento ótimo foi de 9 min para RMF:PCMF e de 7 min para as massas de RMF. Quanto aos parâmetros de textura analisados, massas alimentícias com RMF:PCMF apresentaram valores mais elevados do que os com RMF, se aproximando das massas alimentícias comerciais. A capacidade antioxidante (DPPH e FRAP), fenólicos totais e a atividade antihiperglicêmica foi maior para RMF:PCMF do que para macarrões preparados somente com RMF. Em relação à análise instrumental da cor, as massas alimentícias secas (RMF:PCMF) apresentaram índice de amarronzamento (IA) de 58,0. O índice de aceitabilidade (IA) do produto preparado com farinha RMF:PCMF foi de 66%, sendo a textura a característica que mais precisa ser melhorada, de acordo com avaliadores. Dessa forma, a utilização de farinhas de milho pré-cozidas por extrusão termoplástica pode ser uma alternativa na elaboração de produtos isentos de glúten e com melhores propriedades funcionais.

Palavras chave: Processamento de cereais, doença celíaca, alimentos funcionais, extrusão termoplástica

ABSTRACT

Gluten-free pasta was developed from raw whole millet flour (RMF) and pre-cooked (PCMF) by thermoplastic extrusion. The fusilli noodles were prepared with RMF (100%) and RMF:PCMF in a ratio of 50:50 . The formulations were characterized for texture, cooking test, antioxidant capacity, antihyperglycemic activity, sensory and color analysis. The final product presented satisfactory characteristics, compared to traditional pasta. The RMF:PCMF blend exhibited better integrity while the RMF was less consistent and more brittle. The optimal cooking time was 9 min for RMF:PCMF and 7 min for RMF pasta. As for the texture parameters analyzed, noodles with RMF:PCMF presented higher values than those with RMF, approaching commercial pasta. Antioxidant capacity (DPPH and FRAP), total phenolics and antihyperglycemic activity were higher for RMF:PCMF than for pasta prepared with RMF alone. In relation to the instrumental color analysis, dry pasta (RMF:PCMF) showed a browning index (BI) of 58.0. The global evaluation of the product prepared with RMF:PCMF was 66%, with the texture being the most highlighted negative parameter by the evaluators. Thus, the use of millet flours pre-cooked by thermoplastic extrusion can be an alternative in the preparation of gluten-free products with better functional properties.

Keywords: Cereal processing, celiac disease, functional foods, thermoplastic extrusion

1. INTRODUCTION

Pasta is a traditional product of Asian and European cuisines incorporated into Brazilian gastronomy at the end of the 19th century, due to the ease of preparation and the high acceptability. Pasta is a product that are usually made from wheat (*Triticum* spp) and can be added with other ingredients such as eggs, pulse flours, vegetable extracts. In general, since are obtained from refined flour, these products have a high energy value, but a low nutritional content in terms of minerals, vitamins and phytochemicals.

The possibility of producing new pasta category using cereals beyond wheat, which are nutritionally rich and economically competitive has attracted the interest of researchers. Currently, the new food awareness associated with a new lifestyle or even due to some chronic food restriction, has dictated many "rules" in the food industry. Consumers are increasingly looking for foods with high nutritional value in terms of vitamins, phytochemicals, minerals and free of allergens such as gluten.

Obesity is a global public health problem that affects indiscriminately any race, sex or age group. Worldwide, the number of obese people has almost tripled since 1975. In 2016, more than 650 million adults were obese (WHO, 2016). This behavior can be strongly attributed to the reduction in the consumption of basic and traditional ingredients and sedentary lifestyle, impacting the advancement of non-communicable chronic diseases such as diabetes, which affects about 422 million people worldwide (WHO, 2016). The increase in obesity has been attributed to an increase in the intake of energy foods that are rich in fats and sugars; and a decrease in physical activity due to the increasingly sedentary nature of many forms of work, changing modes of transport and increasing urbanization (WHO, 2016; MCMANUS; TEMPLES, 2021). Consistent education on nutrition and physical activity helps to prevent obesity from occurrence (MCMANUS; TEMPLES, 2021).

Pennisetum glaucum, one of the most consumed millet, is a cereal with nutrient content equivalent or even higher than other cereals (BALASUBRAMANIAN; KAUR; SINGH, 2014; ZHANG; HAMAKER, 2012). The grain is rich in dietary fiber and polyphenols that can reduce the occurrence of lipid disorders, cardiovascular diseases, hyperglycemia, delayed gastric emptying (GUPTA; SRIVASTAVA; PANDEY, 2012; SALEH et al., 2013; KRISHNA et al., 2011). However, despite these benefits, millet is still an underutilized cereal in many countries, however, it is widely consumed in India and Nigeria.

Thermoplastic extrusion process is a viable alternative for product development due to lower water and energy footprint, promoting the inactivation of enzymes, reduction of antinutrients and microbial population by the combined effect of the thermal, mechanical and pressure, which result in a low residence time of the products inside the equipment. Thermoplastic extrusion confers physicochemical changes on cereals, which are fundamental for the formation of an uniform matrix in gluten-free products. In this way, combinations between raw and extruded gluten-free flours obtained from non-conventional cereals could provide a final product similar to gluten-based products but with numerous nutritional and functional benefits.

Thus, the objective of this study is the elaboration of a gluten-free fusilli-type pasta using 100% of whole millet flour by thermoplastic extrusion technology that present a low glycemic index.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Materials

BRS 1502 millet cultivar of *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br. was produced in the experimental fields of Embrapa Milho e Sorgo (Sete Lagoas, Latitude S 19°27'57", Longitude W 44°14'49", Southeast Region, Brazil) in 2018, transported and stored in a cold chamber at 16 °C. Eggs and commercial gluten-free pasta (CGFP), used as a control, were purchased in local market of Rio de Janeiro (Brazil).

2.2. Moisture detection

The moisture of the millet flour and the products were determined by the gravimetric method according to method 925.09 (AOAC, 2010). The sample were weighed and placed in an oven at 105 °C until constant weight was obtained.

2.3. Millet pasta preparation

In order to obtain raw whole grain millet flour (RMF), whole millet grains were ground in an LM3100 hammer mill (Perten Instruments AB, Huddingen, Sweden) equipped with a sieve opening of 0.8 mm. The precooked millet flour (PCMF) was obtained by processing RMF in a twin-screw extruder Evolum HT25 (Clextral Inc., Firminy, France) with screws of 25 mm sectional diameter running at 500 rpm, 40:1 length/diameter ratio (L/D), barrel with ten temperature-controlled heating zones (25, 40, 60, 80, 110, 120, 120, 120, 140 and 140 °C), fitted with a circular die of 4 holes of 3.8 mm diameter each. The parameters used to obtain the PCMF were defined based on previous test results (data not shown).

The water content of the RMF was adjusted to 15% water content with help of a water feed piston pump (Zhejiang Ailipu Technology, Co. Ltd., Talzhou Shi, China). After processing, the expanded extrudates were dried in a fan oven (Hauber Macanuda, Joinville, Brazil) at 45 °C overnight and then shredded in the industrial knife blender (Skymssen, Brusque, Brazil) and subsequently packaged in plastic bags and sealed until the later analyzes and elaboration of products.

In order to obtain the pastas, a formulation containing 100% RMF, 100% PCMF and a mixture containing RMF: PCMF (50:50) were used (Pessanha *et al.*, 2021). The pasta was prepared in a non-thermal extruder *Pastaia 2* (Italvisa, Tatuí, Brazil), with *fusilli* type die, adding 60 g of whole eggs for every 100 g of millet flour. (MENEGASSI; LEONEL, 2006). After the obtention, the pastas were dried in an oven with air circulation $\pm$ 35 °C overnight. The pasta with moisture content of 5.98 ($\pm$ 0.02) were packaged in plastic bags and sealed and then it was cooked at their respective optimum temperatures.

2.4. Cooking test

The pasta was subjected to cooking tests according to method 16-50 (AACC, 1995) evaluating the cooking time, weight gain, volume increase and loss of soluble solids into the cooking water.

2.5. Analysis of the texture profile of pasta

The texture profile analyzes (TPA) was performed according to Torbica *et al.*, (2019), with modifications. Texture analysis was conducted on a Texture Analyzer TA XT Plus (Stable Micro Systems, Surrey, UK) interfaced with the computer software Texture Exponent version 6.1.11 (Stable Micro Systems, Surrey, UK) and fitted with a 30 kg load cell using a cylinder probe of 10 mm diameter. The probe penetration distance in the samples was 3 mm and the test velocity was 1 mm/s. A two-cycle compression force versus time program was used for each test. The deformation percentage was set to 50% and the time between each cycle was 30 s. Seven samples of cooked pasta were analyzed and the parameters of hardness, elasticity, chewability and adhesiveness were calculated. Commercial gluten-free brown rice dough was used as a control sample.

2.6. In vitro antihyperglycemic activity of pasta

The antihyperglycemic activity of pasta samples were determined according to AlDhaheri *et al.*, (2017) and Ayyash *et al.*, (2018). α -glucosidase inhibitor activity was determined in a UV-vis spectrophotometer SP-2000 UV (Spectrum, Kazuaki, China) at 400 nm. As blank was used a solution without the substrate for the enzyme and as a control, a solution without the sample was used.

In order to compare the performance of millet-based pasta against hyperglycemia, a commercial hypoglycemic drug (ACARBOSE ©) was used as a positive control. A solution with this drug replaced the sample in calculation of percent inhibition. The percent inhibition (%) was calculated according to the Equation 1:

$$\% \text{ inhibition} = \left[1 - \frac{Abs_{\text{sample}} - Abs_{\text{control}}}{Abs_{\text{control}}} \right] \times 100 \quad (1)$$

Where:

[[Abs]] sample = Enzyme + Sample + Substrate

[[Abs]] control = Enzyme + Substrate

2.7. Antioxidant capacity

2.7.1. Sample preparation

The antioxidant capacity of the pasta was determined using the methodology proposed by Rufino *et al.*, (2010). The dried pasta was subjected to ethanol extraction. The 80% ethanolic extracts were used to determine the antioxidant capacity by the methods of 2,2-definil-1-picrylhydrazine (DPPH) and Ferric Antioxidant Reducer (FRAP).

2.7.2. Free radical scavenger method DPPH

The samples prepared in 2.7.1 were determined for antioxidant capacity by capturing DPPH. Samples were analyzed at 517 nm, using a vis spectrophotometer VM5 (Bel, Monza, Italy) after 60 min reaction and results were expressed in scavenging free radical (SFR).

2.7.3. Ferric Reducing Antioxidant Power method (FRAP)

The antioxidant capacity by iron reduction was determined using the samples prepared in 2.7.1. The FRAP solution was formed by acetate buffer, 2,4,6-tris(2-pyridyl)-s-triazine (TPTZ) solution and ferric chloride. Standard solutions and samples were analyzed at 595 nm, using a vis spectrophotometer VM5 (Bel, Monza, Italy). Antioxidant capacity was calculated, in which values were subjected to a standard curve and the results were expressed in μM Trolox 100 g of dried sample.

2.7.4. Determination of total phenolic content (TPC)

Total phenolic content was determined based on the methodology described by Quettierdeleu *et al.*, (2000) using Folin-Ciocalteu phenolic reagent in methanolic extracts. The standard gallic acid solution was prepared and analyzed together with the samples at 685 nm, using vis spectrophotometer VM5 (Bel, Monza, Italy). Calibration curve was built and results were expressed by Acid Gallic Eq (GAE)/100 g (d.b.).

2.8. Instrumental color analysis

The colour of dried pasta was measured by reflectance with a Hunterlab colorimeter, model Color Quest XE Apparatus (Fabricante, Cidade, País). CIELAB and CIELCh scale, with an opening of 1.0 in diameter, with illuminant D65/10. The parameters L^* = luminosity (0 = black and 100 = white); a^* = (-80 to zero = green, from zero to +100 = red) and b^* = (-100 to zero = blue, from zero to +70 = yellow) were determined by reflectance CIE $L^*a^*b^*$ color coordinates (CIE, 2004; MOJICA; BERHOW; MEJIA, 2017). In addition, the Chroma (C^*), hue angle (h°) and browning index (BI), were calculated by the Equations 2-5 (MARTÍNEZGIRÓN; FIGUEROA-MOLANO; ORDÓÑEZ-SANTOS, 2017):

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2)$$

$$h^\circ = \arctan(b^*/a^*) \quad (3)$$

$$BI = 100(X - 0.31)/0.17 \quad (4)$$

$$X = (a^* + 1.75L^*)/(5.645L^* + a^* - 3.012b^*) \quad (5)$$

2.9. Sensory analysis

The sensory analysis was conducted after receiving the approval by the Brazilian Committee of Ethics in Research (CAAE) 23824619.1.0000.5268. The evaluation of the acceptability of the pasta was conducted under laboratory conditions with the participation of 86 untrained evaluators. The degree of acceptance of the products was determined in terms of taste, texture and appearance. Approximately 3 servings of pasta (15 units of *fusilli* type pasta) were cooked in boiling salted water for 5 min (ideal cooking time). About 20 g of commercial tomato sauce, sauté in garlic, salt and olive oil, was placed over the portions (5 units) and served in white dishes at a temperature of $\pm 60^\circ\text{C}$ (10 seconds in the microwave). The samples were presented in monadic form, encoded in three-digit numbers in individual booths under white light. The tasters evaluated the samples using a structured hedonic scale of nine points, anchored in extremes of "like extremely" (9) and "dislike extremely" (1)

(STONE; SIDEL, 1985). The acceptability index (IA%) of the formulation was calculated according to Equation 6.

$$IA(\%) = A \times 100 / B \quad (6)$$

where A is the average grade obtained for the tested sample and B is the maximum grade given to the sample (DUTCOSKY, 2013).

2.10. Statistical analysis

Results of each evaluated parameter were submitted to analysis of variance (ANOVA) and Tukey test at 95% of confidence level using Excel, version 2008 (Microsoft, Redmond, USA). XLSTAT 2014 (Addinsoft, Paris, France) software was used for data evaluation.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Millet pasta preparation

The *fusilli*-type pasta made from millet flour is shown in Figure 3.1. The doughs were prepared with raw millet flour (RMF) (Figure 3.1A) and pre-cooked millet flour (PCMF) (Figure 3.1B) in the proportion of 50:50 (RMF:PCMF) and 100% PCMF. The dough made with 100% PCMF could not pass through the fusilli type die of the Pastaia (non thermomechanical extruder) due to its high hardness (Figure 3.1G, 3.1H). The breakdown of starch granules and the rearrangement of hydrogen bonds, promoted by the extrusion process, may have made the moisture unavailable, resulting in a hard dough. It is possible that the addition of other ingredients and additives as well as those that constitute the control pasta, would make it possible to prepare the pasta with 100% PCMF.

Visually, the RMF (Figure 3.1C, 3.1E) and RMF:PCMF (Figure 3.1D, 3.1F) pasta presented satisfactory results compared to commercial pasta based on gluten-free whole flours. Among the 2 formulations studied, the mixture containing RMF:PCMF (50:50) showed better integrity while the RMF was more brittle.



Figura 3.1. Flours and pasta developed from Millet grains. (A) raw millet flour (RMF), (B) precooked Millet flour (PCMF). (C) dry pasta produced with RMF, (D) dry pasta produced with RMF:PCMF (50:50), (E) cooked pasta produced with RMF, (F) cooked pasta produced with RMF:PCMF (50:50), (G) mix (PCMF and eggs) to prepare the pasta, (H) cooked pasta produced with PCMF

Similar results were found by Jalgaonkar and Jha (2016) when producing pasta with millet flour. According to the authors, it was not possible to prepare pasta from 100% millet flour with desirable quality and they conclude that a 50:50 mix composition (wheat semolina: millet flour) could be used to make pasta with acceptable quality.

It is possible to produce excellent pasta with suitable technological properties by replacing wheat totally or partially with gluten-free cereal flours. However, it is necessary to add ingredients that can replace the structural functions provided by the gluten (COLLADO et al., 2001; ARAVIND et al., 2012). According to Capriles and Arêas (2011), modified starch can be used as a substitute for the gluten network and can be achieved through extrusion cooking process. Heating the starch under ideal humidity conditions causes the granules to partially swell and by the action of shear it can break into smaller starch fragments that can be binded to each other by the presence of water. The breakage of starch granules and rearrangement of hydrogen bonds can enable the plastification and formation

of desirable textures, as starch starts to behave as a binder, replacing to a certain degree, the function of gluten (SILVA; ASCHERI; ASCHERI, 2016; YE, et al., 2017).

3.2. Cooking test

The moisture content of dry flours and pasta are shown in Table 3.1. The moisture of RMF was $10.4 \% \pm 0.25$ and RMF:PCMF was $8.16 \% \pm 0.15$. These results are in accordance with the established standard for flours, cereal starch and bran, which must be below 15%, not favorable to the growth of microorganisms (BRASIL, 2005).

The moisture content of dry pasta was evaluated in order to verify the efficiency of the drying process and determine the ideal storage conditions. The dry pasta obtained from raw flour (RMF) had a moisture content of $3.55 \% \pm 0.34$ and the pasta from RMF:PCMF $5.98 \% \pm 0.02$. These results are in accordance with the legislation that recommends a moisture content below 13%, considering the microbiological stability of the final product (AACC, 1995).

In addition to moisture content, other constituents of millet grain have been reported in the literature. According to the work of Dias-Martins *et al.* (2019) the average content carbohydrate of millet was 72.2% which is lower than (84.9%), maize (78.1%) and higher than wheat (68.8%). The protein content was 11.8% similar to sorghum (10.7%) and higher than maize (9.2%) and rice (8.6%). Pearl millet grain has high lipid content (6.4%) because the germ represents ~ 21% of the whole grain. Dietary fibers represent 7.8% of the millet grain and the total ash content of pearl millet is 1.8%.

The behavior of the doughs during and after cooking is a quality parameter directly related to the acceptance of a product by the consumer. During cooking, the result is protein denaturation, starch gelatinization, increase in weight and volume of the dough as a result of increased temperature and water absorption (MINGUITA et al., 2015; LARROSA et al., 2016). The cooking test results are shown in Table 3.1.

Cooking times for RMF pasta was 6.5 min and RMF:PCMF, 8.5 min, similar to traditional wheat and rice pastas. Results in the literature have demonstrated that cooking time of RMF:PCMF pasta was similar to pasta made with rice flour (9-13 min) (WU et al., 2018), whereas RMF pasta was similar to those made with durum wheat semolina (7 min) (ELSOHAIFY et al., 2020). For Giménez *et al.*, (2013), the longest cooking times of corn-broad beans (*Vicia faba*) pasta corresponded to the samples with the best sensory attributes.

Unlike to the found results, Dissanayake and Jayawardena, (2016) observed lower cooking times for pasta based on RMF (3 min.) and pasta prepared with rice flour and millet flour (5 min.). According to El-Sohaimy *et al.*, (2020) the reduction of gluten in the production of pasta can change the matrix, allowing a faster transfer of water into the center of the dough, reducing cooking time in samples with a higher proportion of gluten-free flour (EL-SOHAIFY et al., 2020). In addition, pasta with a high fiber content has a shorter cooking time, as fiber allows greater water absorption and consequently a higher water absorption rate (PERESSINI et al., 2019).

The parameters weight gain and increase in volume are related to the water absorption capacity of the pasta and depend on the shape of the pasta. As for weight gain (%), a value above 200% is considered adequate for wheat pasta, that is, twice-fold the original weight (HOGG et al., 2015). For the pasta formulated with RMF and RMF: PCMF the results were 146% and 97.5%, respectively, whereas for wheat semolina-based noodles, the weight increase was 207% (MINGUITA et al., 2015)

The weight gain (%) is affected by the amount of components capable of absorbing water during cooking, such as starch. This behavior can be explained because wheat starch has greater water absorption capacity compared to starch from other cereals (JEONG *et al.*, 2017). Another factor that can contribute to this change is the amount of fibers, proteins and lipids that reduce the amount of gelatinized starch, decreasing water absorption during cooking and, consequently, the weight of the dough (JACOBS *et al.*, 2015)

The volume increase was also greater for RMF (112%) than for RMF:PCMF (60%). Based on the literature, the RMF pasta fit the values established for traditional pasta, considering that wheat-based must present minimum values which is 100% in mass increase (HUMMEL, 1966). The RMF:PCMF pasta presented results that was similar to those verified by Garcia *et al.*, (2016) for rice flour pasta, with 62% increase in volume.

The difference observed between the two formulations studied can be explained by Oliveira *et al.*, (2004). According to the authors, flour moisture can influence the weight gain and increase volume, cooking time and loss of solids. In addition, during the extrusion process, the starch is mechanically broken down and the proteins are denatured, losing their swelling capacity and, consequently, decreasing the weight gain and increase of volume parameters (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Loss of soluble solids is related to solids leaching out and is widely used as an indicator of overall cooking performance. The high content of soluble solids results in a stickier texture and cloudy cooking water, which may be related to the amylose content and absence of gluten (D'EGIDIO *et al.*, 1990; RUBIO *et al.*, 2014). The results of loss of soluble solids for pasta with RMF was 5.8% while for RMF:PCMF pasta was 10.6%. These results could be explained by the longer cooking time required by RMF:PCMF pasta (8.5 min.) when compared to RMF pasta (6.5 min.). In addition, according to Giménez *et al.* (2013) the moisture of the pasta can influence the loss of solids considering the osmotic balance during cooking. Based on the criteria of Hummel, (1966) which classifies the quality of wheat pasta in terms of loss of soluble solids, RMF pasta are considered good quality, while RMF:PCMF pasta have characteristics of low quality. Despite these results, the RMF:PCMF pasta presented more desirable characteristics as discussed in the item 3.1.

Table 3.1. Characterization of millet-based pasta

Samples	Texture						Cooking test			
	Flour Moisture (%)	Dry Pasta Moisture (%)	Hardness (N)	Elasticity (mm)	Chewiness (N.mm)	Adhesiveness	Cooking time	Weight gain (%)	Increase of volume (%)	Loss of soluble solids (%)
RMF	10.4± 0.25 ^a	3.55± 0.35 ^a	0.39±0.13 ^a	0.77±0.20 ^a	0.12±0.05 ^a	0.11±0.05 ^a	6.5±0.70 ^a	146.0±0.1 ^a	112±0.10 ^a	5.8±0.20 ^a
RMF: PCMF (50:50)	8.16± 0.15 ^b	5.98±0.02 ^b	1.36±0.48 ^b	0.88±0.07 ^a	0.52±0.23 ^b	0.33±0.14 ^b	8.5±0.70 ^b	97.5±0.70 ^b	60±0.10 ^b	10.6±0.80 ^b
Control	-	-	2.48±0.58 ^c	1.23±0.35 ^b	2.80±1.05 ^c	-	8.0±0.10 ^b	-	-	-

RMF: Raw whole grain millet flour; RMF:PCMF: Raw whole grain millet flour and precooked millet flour; Control: gluten-free brown rice pasta. Data expressed as means ± standard deviation of at least 3 replicates. a-c Different letters in the same column indicate a significant difference between samples (p <0.05).

3.3. Analysis of the texture profile of pasta

The texture results of the pasta are shown in Table 3.1. According to the data, the pasta prepared with RMF presented the lowest values for all parameters analyzed (hardness, elasticity, chewiness and adhesiveness) while the RMF:PCMF (50:50) presented the highest hardness, elasticity and chewiness, approaching of the commercial sample.

The difference between millet pasta (RMF:PCMF) and commercial whole grain pasta (control) can be explained by the ingredients used. The millet pasta were obtained by the exclusive use of whole millet flour and eggs, while the commercial sample contains other ingredients such as whole grain polished rice flour, starch and emulsifier, components that contribute to the structure of the dough.

Hardness is defined as the peak force attained during the first compression and is a crucial parameter for the quality of cooked pasta. After cooking, the pasta should remain firm and non-sticky. Gluten is the protein responsible for the formation of the structure of wheat pasta, and is important for the quality of cooking and texture of these products (FUADA; PRABHASANKAR, 2010). The results showed that the extruded flour fraction (PCMF) provided the RMF:PCMF pastas with a behavior similar to that of gluten, different from the pasta containing only RMF, which presented a much lower hardness value (0.39). Comparing the hardness results obtained by Rubio *et al.* (2014) for pasta produced with semolina (1.49 N), we found values close to those obtained for RMF: PCMF (1.36).

Adhesiveness is measured as the negative work between the two cycles. The results showed higher adhesiveness with the RMF:PCMF pasta (0.33) than in the RMF pasta (0.11). Adhesiveness is closely related to the loss of soluble solids during cooking. Since a high degree of amylose is lost to the cooking water it means a high degree of amylopectin remaining on the surface of the dough. In this case, the observed results are in agreement with the literature since a greater loss of soluble solids was verified in RMF:PCMF pasta (BUSTOS; PEREZ; LEON, 2015). Regarding control pasta, no adhesiveness results were obtained. It is likely that the values were lower than the device's detection capability. These results can be justified by the composition of the dough that contains, among other ingredients, emulsifiers capable of interfering with this parameter.

The elasticity of the pasta containing RMF and RMF:PCMF was 0.77 and 0.88, respectively. Elasticity is the capacity that a given deformed matrix has to return to its original condition after force removal (ARAVIND *et al.*, 2012). According to Wee *et al.* (2019), glutenin and the protein residue are responsible for the elasticity of the mass. Jalganoankar and Jhan (2016) found an elasticity of 0.59 mm for pasta prepared with 100% millet flour, value lower than to the obtained in this study. For pasta using wheat semolina, the authors found higher elasticity (1.03 mm). Results similar to those obtained for RMF:PCMF (0.88) were obtained by the authors from the mixtures between millet flour and wheat semolina (JALGANOANKAR; JHAN, 2016). The modification of starch by the extrusion cooking process could explain these results, since when modified, starch has the ability to behave as water binder and replace gluten functionality (SILVA; ASCHERI; ASCHERI, 2016).

With regard to the texture component, chewiness ($\text{hardness} \times \text{cohesiveness} \times \text{elasticity}$), the doughs prepared with RMF:PCMF (0.52) presented better results than those with RMF (0.12). However, compared to traditional pasta with wheat semolina (0.98) these

results are still much lower (EL-SOHAIFY *et al.*, 2020). According to Armellini *et al.*, (2018) chewing is directly related to the elastic strength of the protein matrix and defined as the effort needed to chew the pasta until swallowing. Therefore, it can be suggested that the increase in chewiness found in PCMF pasta was due to the extruded starch, which gives the dough elasticity similarly to gluten. These results may indicate that the pre-cooking of whole millet flour favored the formation of a better structure in the final product, presenting results closer to those verified in products obtained from traditional wheat flours.

3.4. Antioxidant capacity

The antioxidant capacity measured by DHPP, FRAP and TCP on the pasta formulations are shown in Table 3.2. According to the data, the highest values of DHPP, FRAP and TCP were observed in pasta containing PCMF (RMF:PCMF). These results may indicate that the extrusion cooking was able to release the phenolic compounds from the cereal pericarp (DIASMARTINS *et al.*, 2018). In addition, the results demonstrate that phenolic compounds are stable to extrusion conditions at high temperatures (140 °C) (PATIL *et al.*, 2016; SIROHA; SANDHU, 2017).

Pessanha *et al.* (2021) produced breads with whole grain raw and extruded millet flours. The authors found high antioxidant activity in breads with raw flour and higher values in breads produced only with extruded flour. Specifically, in relation to DPPH, the study obtained 69% for bread with raw flour and 77% for bread with a 50:50 formulation. As shown in the Table 3.2, the antioxidant content measured by DPPH for pasta prepared with RMF (71%) and RMF:PCMF (79%) were similar to the values found by Pessanha *et al.*, (2021).

According to N'Dri *et al.*, (2013) the cooking process significantly increases the soluble phenolic acids in pearl millet flour. In contrast, Patil *et al.*, (2016) demonstrated that the extrusion process maintained or reduced the antioxidant capacity of processed finger millet. According to the literature, the combined effect of humidity, temperature and screw rotation speed during thermoplastic extrusion process can result in an increase or decrease in antioxidant capacity (SIROHA; SANDHU, 2017; PATIL *et al.*, 2016). It is possible that the differences found in the literature are associated with the botanical species of the studied millet (CHANDRASEKARA; SHAHIDI, 2012).

3.5. In vitro antihyperglycemic activity of millet pasta

The antihyperglycemic activity of whole grain millet flour-based pasta are shown in Table 3.2. The pasta prepared with RMF showed 94.3% of anti-hyperglycemic activity and RMF:PCMF 99.5%. Considering the positive hypoglycemic control, ACARBOSE® (70.39±0.01), the formulations presented more than 24-30%. It was also observed that the enzyme inhibitory percentage has a direct relationship with the content/bioavailability of phenolics, since the pasta produced with PCMF had a higher enzyme inhibition value and greater antioxidant capacity.

Starch digestibility is modulated by two complementary mechanisms, the modulation of glycolytic enzymes and the formation of complexes between starch and phenolic and lipid compounds (GIUBERTI; ROCCHETTI; LUCINI, 2020). The hypoglycemic action performed by flavonoids (polyphenols) is based on the inhibition of α -glucosidase and α -amylase pancreatic enzymes. Flavonoids compete with the active site and deactivate enzymes during starch hydrolysis. α -glucosidase is the main enzyme that breaks α -1,4 bonds,

degrading starches and disaccharides into glucose and, therefore, an important factor in the glycemic response (DEROSA; MAFFOL, 2012; TADERA et al., 2006; WILLIAMSON, 2013).

The main phenolics found in millet grains are ferulic and p-coumaric acids, present in the pericarp of the grain (CHANDRASEKARA; SHAHIDI, 2011). Thus, the use of whole meal flour can contribute to the reduction of the glycemic index (CHANDRASEKARA; SHAHIDI, 2011; TAYLOR, 2016). According to Annor *et al.*, (2017) the synergy between phenolics and dietary fiber can contribute to the control of type II diabetes.

Furthermore, these results may also be related to the fiber content of the flours. According to literature, the dietary fiber content of millet (7.8%) is higher than that of rice (3.5%) (DIAS-MARTINS et al., 2018). Dietary fibers increase water retention and medium viscosity. As a result, digestive enzymes have difficulty in accessing carbohydrates, decreasing the rate of hydrolysis, which will consequently reduce the absorption of glucose in the individual (CHANDRASEKARA; SHAHIDI, 2011, KAM et al., 2016; TAYLOR, 2016).

3.6. Instrumental color analysis

The instrumental color analysis was performed only for dry pasta prepared with RMF: PCMF (1:1) blends, as it presented more adequate characteristics, considering the previous results. The color of the dough is identified as an essential parameter to assess the quality of the dough and affects the perception of consumers (DEBBOUZ et al., 1995). The CIE $L^*a^*b^*$ coordinates, C^* , h° and BI are shown in the Table 3.2. The values of the color parameters L^* , a^* and b^* were 34.23 ± 0.02 , 3.74 ± 0.02 and 13.7 ± 0.04 , respectively. These results are similar to those found by Gull, Prasad and Kumar, (2016) for Millet-pomace based pasta ($L^* = 37$, $a^* = 4$, $b^* = 10$). When comparing the pasta obtained from millet flour with a traditional wheat semolina dough obtained by Rubio *et al.*, (2014), we found differences in all color parameters ($L^* = 66$, $a^* = -2$, $b^* = 30$). These results were already expected considering that traditional wheat pasta in general has a bright yellow color that is very different from pasta produced with whole meal flour (DEBBOUZ et al., 1995; RUBIO et al., 2014). Pearl millet pastas are characterized by a decrease in yellow (as evident by a decrease in b^*) and an increase in red (as evidenced by an increase in a^*). Despite the decrease in b^* , the pasta produced with millet flour still have a color close to pure yellow (90°), in accordance with the result of the h° (hue angle), which identifies the location of the color in a three-dimensional diagram.

The decrease in brightness (L^*) may be related to the higher ash content of the flour as demonstrated by Wood, (2009) and Zhao *et al.*, (2005) in dry pasta fortified with peas, chickpeas and lentil flour. Added to these results, the color intensity (C^*) of the millet pasta was 14.20, superior to those obtained for the conventional cooking of decorticated grains demonstrated by Dias-Martins et al., (2019). It is possible that the color differences observed between the pearl millet pasta and the traditional pasta can also be attributed to the polyphenol content in the pericarp, aleurone layer cells and endosperm regions of the millet grain (MC DONOUGH; ROONEY, 1989). Another way to express the color of the pasta is through color indices. Although the browning index (BI) is generally associated with enzymatic and non-enzymatic browning, in this case it was adopted to characterize the pasta obtained with the millet flour, resulting in a BI of 58.0.

Table 3.2. Antioxidant capacity by DPPH and FRAP methods, total phenolic content (TPC), in vitro antihyperglycemic activity (α -glycosidase) of millet-based pasta and instrumental color analysis.

Samples	Anti-hyperglycemic activity	DPPH	FRAP	TPC	Instrumental color					
					L*	a*	b*	h°	C*	BI
RMF	94.3 $\pm$ 0.50 ^b	71.22 $\pm$ 1.10 ^b	197.3 $\pm$ 0.01 ^b	122.4 $\pm$ 2.01 ^a	-	-	-	-	-	-
RMF:PCMF (50:50)	99.5 $\pm$ 0.42 ^a	78.5 $\pm$ 1.90 ^a	247.5 $\pm$ 0.01 ^a	127.6 $\pm$ 2.05 ^b	34.23 $\pm$ 0.02	3.74 $\pm$ 0.02	13.7 $\pm$ 0.04	74.72 $\pm$ 0.10	14.2 $\pm$ 0.03	58.08 $\pm$ 0.04
Control	83.1 $\pm$ 0.17 ^c	63.8 $\pm$ 1.30 ^c	100.4 $\pm$ 0.90 ^c	-	-	-	-	-	-	-

Data expressed as means $\pm$ standard deviation of at least 3 replicates. a-c Different letters in the same column indicate a significant difference between samples ($p < 0.05$). DPPH: 2,2-diphenyl-1-picryl-hydrazine (% SFR); FRAP: Ferric Antioxidant Reducer Power (μ mol Trolox/g); TPC: Determination of total phenolic content (μ mol gallic acid equiv./g); L* = luminosity (0 = black and 100 = white); a* = (-80 to zero = green, from zero to +100 = red); b* = (-100 to zero = blue, from zero to +70 = yellow); C*: chroma; h°: hue angle; BI: browning index; RMF: Raw whole grain millet flour; RMF:PCMF: Raw whole grain millet flour and precooked millet flour; Control: gluten-free brown rice pasta.

3.7. Sensory analysis

The sensory evaluation of the pastas made from whole grain millet flour based RMF:PCMF (1:1) was carried out based on the parameters of global evaluation, appearance, flavor and texture. Appearance had the highest score (6.1 ± 2.0), along with flavor (6.1 ± 2.3). The global evaluation obtained a score of 5.9 ± 2.1 and the lowest score was for the texture parameter (5.2 ± 2.3). More favorable results were obtained in pasta prepared by Shukla and Srivastava (2011), using wheat flour and millet flour (50:50). Grades given to pastas for overall acceptance, appearance, flavor and texture were 6.7; 6.8; 6.3; 6.4, respectively. Considering the results, it is important to highlight that unlike the pasta prepared by Shukla and Srivastava, (2011) in this study, pasta was produced using only whole grain millet flour. Thus, it is possible that the best results are justified by the presence of gluten in the dough.

One of the fundamental points in the development of a new product is its acceptability, which will predict its behavior in the consumer market (MOSCATTO; PRUDÊNCIO FERREIRA; HAULY, 2004). The acceptability index (AI) for a product to be considered accepted is at least 70% (DUTCOSKY, 1996). Based on the acceptability scores and the AI calculation, the formulation showed average acceptability, given that it presented an AI of 66%, 68%, 68% and 65% for the parameters of global acceptance, appearance, flavor and texture, respectively. It is worth noting that despite 65% of the evaluators are frequent noodle consumers, around 57% stated that they never or rarely consumed whole pasta. It is possible that this factor had some influence on the results, considering that the acceptability of the full commercial sample was not evaluated for this analysis.

Among the evaluated parameters, the texture presented the lowest AI. The tasters highlighted that the pasta had a crumbly and sandy texture whereas others judged it to be very similar to commercial whole grain noodles. The fact that the dough is brittle is due to the absence of a gluten network. Formulations with a higher proportion of pre-cooked flour (PCMF) could minimize this defect and improve the technological quality of the pasta.

As for the flavor, the pasta was judged as pleasant, but some highlighted a bitter taste. The appearance was barely mentioned despite the grayish color attributed to the whole grain millet flour.

4. CONCLUSION

The pasta prepared with RMF:PCMF (50:50) showed satisfactory characteristics compared to traditional pasta. Regarding the technological properties, the addition of pre-cooked millet flour (PCMF) improved the pasta structure and increased the texture parameters evaluated (hardness, elasticity, chewability). The thermoplastic extrusion increased the antioxidant capacity and total phenolics of pearl millet flour, adding functional properties to the pasta. Furthermore, the antihyperglycemic activity showed a significant increase in pasta prepared with RMF:PCMF (50:50). In the global evaluation, the product prepared with RMF:PCMF had an acceptability index (AI) of 66%, mainly affected by the texture parameter. In this sense, it can be concluded that pre-cooked millet flour has favorable properties for the preparation of pasta, and can be used as healthy alternative products to celiac individuals.

ACKNOWLEDGMENT

The assistance of Mariana Mattos and Neuri dos Santos Menezes with the extrusion is gratefully acknowledged. The authors also thank the Brazilian Government Agencies: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) and Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) for their financial support to this work.

5. REFERENCES

AACC - American Association of Cereal Chemists. **Approved methods of the AACC**. 9.ed. Saint Paul, 1995. V.1-2.

AL-DHAHERI, A. S.; AL-HEMEIRI, R.; KIZHAKKAYIL, J.; AL-NABULSI, A.; ABUSHELAIBI, A.; SHAH, N. P.; AYYASH, M. Health-promoting benefits of low-fat akawi cheese made by exopolysaccharide-producing probiotic *Lactobacillus plantarum* isolated from camel milk. **Journal of Dairy Science**, v.100, p. 7771–7779, 2017

ANNOR, G.; TYL, C.; MARCONE, M.; RAGAEI, S.; MARTI, A. Why do millets have slower starch and protein digestibility than other cereals? **Food Science and Technology**, v.66, p. 73–83, 2017.

ARAVIND, N.; SISSONS, M.; EGAN, N.; FELLOWS, C. Effect of insoluble dietary fibre addition on technological, sensory, and structural properties of durum wheat spaghetti. **Food Chemistry**, v. 130, p. 290-309, 2012

ARMELLINI, R.; PEINADO, I.; PITTIA, P.; SCAMPICCHIO, M.; HEREDIA, A.; ANDRES, A. Effect of saffron (*Crocus sativus* L.) enrichment on antioxidant and sensorial properties of wheat flour pasta. **Food Chemistry**, v. 254, p. 55–63, 2018.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY (AOAC). **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemistry**. 18.ed. Arlington: Washington, 2010. 1115p

ARAVIND, N.; SISSONS, M.; EGAN, N.; FELLOWS, C. Effect of insoluble dietary fibre addition on technological, sensory, and structural properties of durum wheat spaghetti. **Food Chemistry**, v. 130, p. 290-309, 2012

AYYASH, M.; AL-NUAIMI, A. K.; AL-MAHADIN, S.; LIU, S. In vitro investigation of anticancer and ACE-inhibiting activity, α -amylase and α -glucosidase inhibition, and antioxidant activity of camel milk fermented with camel milk probiotic: A comparative study with fermented bovine Milk. **Journal of Cereal Science**, v.75, p.158–164, 2018

BALASUBRAMANIAN, S.; KAUR, J.; SINGH, D. Optimization of weaning mix based on malted and extruded pearl millet and barley. **J Food Sci Technol**, v.51, n.4, p. 682–690, 2014

BRASIL – **Obesidade cresce 60% em dez anos no Brasil**. 2017 Disponível em:<<http://www.brasil.gov.br/saude/2017/04/obesidade-cresce-60-em-dez-anos-no-brasil>> Acessado em 06 nov. 2017.

BRASIL. **Resolução nº 263**, de 22 de setembro de 2005. Regulamento técnico para produtos de cereais, amidos, farinhas e farelos. Disponível em: <https://www.saude.rj.gov.br/comum/code/MostrarArquivo.php?C=MjIwMw%2C%2C>. Acessado em: 22 nov. 2017.

BUSTOS, M. C.; PEREZ, G. T.; LEON, A. E. Structure and quality of pasta enriched with functional ingredients. **RSC Advances**, v.5, n.39, p. 30780–30792, 2015.

CAPRILES, V. D.; ARÊAS, J. A. G. Avanços na produção de pães sem glúten: aspectos tecnológicos e nutricionais. **Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v. 29, n.1, 2011

CHANDRASEKARA, A.; SHAHIDI, F. Bioaccessibility and antioxidant potential of millet grain phenolics as affected by simulated in vitro digestion and microbial fermentation. **Journal of Functional Foods**, v.4, n.1, p. 226–237, 2012

CHANDRASEKARA, A.; SHAHIDI, F. Antiproliferative potential and DNA scission inhibitory activity of phenolics from whole millet grains. **Journal of Functional Foods**, v.3, n.3, p. 159-170, 2011

COLLADO, L. S.; MABESA, L. B.; OATES, C. G.; CORKE, H. Bihon-Type Noodles from Heat-Moisture-Treated Sweet Potato Starch. **Journal of Food Science**, v. 66, p.604-609, 2011.

CIE. Commission International de l'Eclairage (CIE).Color Spaces, Color Difference Equations, Psychometric Color Terms, 3^o edition, Publication n^o15.3. 2004. Pages 17 -18. **Central Bureau of the CIE**, Paris, 2004.

D'EGIDIO, M.G.; MARIANI, B.M.; NARDI, S.; NOVARO, P.; CUBADDA, R. Chemical and technological variables and their relationships: a predictive equation for pasta cooking quality. **Cereal Chemistry**, v. 67, n. 3, p. 275-281, 1990.

DEROSA, G.; MAFFOLI, P. α -Glucosidase inhibitors and their use in clinical practice. **Arch Med Sci**, v. 8, n.5, p. 899-906, 2012

DEBBOUZ, A.; PITZ, W. J.; MOORE, W. R.; DAPPOLONIA, B. L. Effect of bleaching on durum-wheat and spaghetti quality. **Cereal Chemistry**, v. 72, n. 1, p. 128–131, 1995

DIAS-MARTINS, A. M.; PESSANHA, K. L. F.; PACHECO, S.; RODRIGUES, J. A. S.; CARVALHO, C. W. P. Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food security, processing, health benefits and nutritional products. **Food Research International**, 109, 175–186, 2018.

DIAS-MARTINS, A. M.; CAPPATO, L. P.; DA COSTA MATTOS, M.; RODRIGUES, F. N.; PACHECO, S.; CARVALHO, C. W. P. Impacts of ohmic heating on decorticated and whole pearl millet grains compared to open-pan cooking. **Journal of Cereal Science**, v.85, p. 120-129, 2019.

DISSANAYAKE, B. D. M. P. B.; JAYAWARDENA, H. S. Development of a method for manufacturing noodles from finger millet. **Procedia Food Science**, v. 6, p. 293–297, 2016
DUTCOSKY, S. D. **Análise sensorial de alimentos**. (4th ed.). Curitiba: DA Champagnat, 531p. 2013

DUTCOSKY, S.D. **Análise sensorial de alimentos**. Curitiba: Editora Universitária Champagnat, 123 p.1996

EL-SOHAIFY, S. A.; BRENNAN, M.; DARWISH, A. M. G.; BRENNAN, C. Physicochemical, texture and sensorial evaluation of pasta enriched with chickpea flour and protein isolate. **Annals of Agricultural Sciences**, v.65, n.1, p. 28–3, 2020.

FUADA, T.; PRABHASANKAR, P. Role of ingredients in pasta product quality: a review on recent developments. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 50, p. 787798, 2010

GARCIA, L. G. C.; SILVA, A. H. S.; CUNHA, P. C.; DAMIANI, C. Preparation of glutenfree noodles incorporated of jabuticaba peel flour. **Journal of Food and Nutrition Research**, v.4, n. 2, p.82-87, 2016

GIMÉNEZ, M. A.; GONZÁLEZ, R. J.; WAGNER, J.; TORRES, R.; LOBO, M. O.;SAMMAN, N. C. Effect of extrusion conditions on physicochemical and sensorial properties of corn-broad beans (*Vicia faba*) spaghetti type pasta. **Food Chemistry**, v. 136, n. 2, p. 538– 545, 2013.

GIUBERTI, G.; ROCCHETTI, G.; LUCINI, L. Interactions between phenolic compounds, amylolytic enzymes and starch: an updated overview. **Current Opinion in Food Science**, v. 31, p. 102-113, 2020.

GULL, A.; PRASAD, K.; KUMAR, P. Nutritional, antioxidant, microstructural and pasting properties of functional pasta. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 17, n. 2, p. 147–153, 2016.

GUPTA, N.; SRIVASTAVA, A. K.; PANDEY, V. N. Biodiversity and nutraceutical quality of some indian millets. **Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sci.**, v. 82, n. 2, p. 265-273 2012

HOGG, A. C.; MARTIN, J. M.; MANTHEY, F. A.; GIROUX, M. J. nutritional and quality traits of pasta made from ssiia null high-amylose durum wheat. **Cereal Chemistry**, v. 92, p. 395-400, 2015.

HUMMEL, C. **Macaroni products: manufacture processing and packing**. 2. ed. London: Food Trade, 287p, 1966.

JACOBS, P. J.; HEMDANE, S.; DORNEZ, E.; DELCOUR, J. A.; COURTIN, C. M. Study of hydration properties of wheat bran as a function of particle size. **Food Chemistry**, v. 17, p. 296-304, 2015.

JALGAONKAR, K.; JHA, S. K. Influence of particle size and blend composition on quality of wheat semolina-pearl millet pasta. **Journal of Cereal Science**, v. 71, p. 239–245, 2016.

JEONG, S.; KIM, M.; YOON, M. R.; LEE, S. Preparation and characterization of glutenfree sheeted doughs and noodles with zein and rice flour containing different amylose contents. **Journal of Cereal Science**, v. 75, p. 138-142, 2017.

KAM, J.; *et al.* Dietary Interventions for Type 2 Diabetes: How Millet Comes to Help. **Frontiers in Plant Science**, v.7, 2016.

KRISHNAN, R.; DHARMARAJ, U.; MANOHAR, R. S.; MALLESHI, N. G. Quality characteristics of biscuits prepared from finger millet seed coat based composite flour. **Food Chemistry**, v. 129, p. 499–506, 2011.

LARROSA, V.; LORENZO, G.; ZARITZKY, N.; CALIFANO, A. Improvement of the texture and quality of cooked gluten-free pasta. **LWT - Food Science and Technology**, v. 70, p. 96-103, 2016.

MARTÍNEZ-GIRÓN, J.; FIGUEROA-MOLANO, A. M.; ORDÓÑEZ-SANTOS, L. E. Effect of the addition of peach palm (*Bactris gasipaes*) peel flour on the color and sensory properties of cakes. **Food Science and Technology**, v. 37, n. 3, p. 418–424, 2017.

MCDONOUGH, C. M.; ROONEY, L.W. Structural characteristics of *Pennisetum americanum* (pearl millet) using scanning electron and florescence microscopy. **Food Microstruct**, v.8, p. 137-149, 1989.

MCMANUS, K.; TEMPLES, H. Obesity in Adolescents: Prevention and Treatment to Change Their Future. **The Journal for Nurse Practitioners**, 2021, DOI: 10.1016/j.nurpra.2021.04.018

MENEGASSI, B.; LEONEL, M. Análises de qualidade de uma massa alimentícia mista de mandioquinha-salsa. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, v. 2, p.27-36, 2006.

MINGUITA, A. P. DA S.; CARVALHO, J. L. V.; OLIVEIRA, E. M. M.; GALDEANO, M. C. Produção e caracterização de massas alimentícias a base de alimentos biofortificados: trigo, arroz polido e feijão carioca com casca. **Ciência Rural**, v. 45, n. 10, p. 1895–1901, 2015

MOJICA, L.; BERHOW, M.; MEJIA, E. G. Black bean anthocyanin-rich extracts as food colorants: Physicochemical stability and antidiabetes potential. **Food Chemistry**, v. 229, p. 628-639, 2017

MOSCATTO, J. A.; PRUDÊNCIO-FERREIRA, S. H.; HAULY, M. C. O. Farinha de yacon e inulina como ingredientes na formulação de bolo de chocolate. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 24, n. 4, p. 634-640, 2004

N'DRI, D.; MAZZEO, T.; ZAUPA, M.; FERRACANE, R.; FOGLIANO, V.; PELLEGRINI, N. Effect of cooking on the total antioxidant capacity and phenolic profile of some wholemeal African cereals. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 93, n. 1, p. 29– 36, 2013.

OLIVEIRA, M.F.; WANG, S.H.; COSTA, P.S.; ASCHERI, J.L.R. Qualidade de cozimento de massas de trigo e soja pré-cozidas por extrusão. **Pesq. Agrop. Bras.**, v. 39, n. 5, p. 501507, 2004.

PATIL, S. S.; RUDRA, S. G.; VARGHESE, E.; KAUR, C. Effect of extruded finger millet (*Eleusine coracana* L.) on textural properties and sensory acceptability of composite bread. **Food Bioscience**, v. 14, p. 62–69, 2016.

PERESSINI, D.; CAVARAPE, A.; BRENNAN, M. A.; GAO, J.; BRENNAN, C. S. Viscoelastic properties of durum wheat doughs enriched with soluble dietary fibres in Relation to pasta-making performance and glycaemic response of spaghetti. **Food Hydrocolloids**, 105613, 2019.

PESSANHA, K. L. P.; MENEZES, J. P.; SILVA, A. A.; FERREIRA, M. V. S.; YOSHIETAKEITI, C. Y.; CARVALHO, C. W. P. Impact of whole millet extruded flour on the physicochemical properties and antihyperglycemic activity of gluten free bread. **LWT – Food Science and Technology**, 147, 111495, 2021.

PATIL, S. S.; VARGHESE, E.; RUDRA, S.; KAUR, C. Effect of extrusion processing on phenolics, flavonoids and antioxidant activity of millets. **Intl. J. Food. Ferment. Technol.**, v., 6, n. 1, p. 177-184, 2016.

QUETTIER-DELEU, C. *et al.*, Phenolic compounds and antioxidant activities of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) hulls and flour. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 72, p. 35-42, 2000.

RUBIO, A. R. I.; BARCA, M. C.; CHÁVEZ, F. C.; GASTÉLUM, A. G. C.; BETA, T. Effect of semolina replacement with a raw:popped amaranth flour blend on cooking quality and texture of pasta. **LWT – Food Science and Technology**, v. 57, p. 217-222, 2014.

RUFINO, M. S. M.; ALVES, R. E.; BRITO, E. S.; PÉREZ-JIMÉNEZ, J. SAURACALIXTO, F.; MANCINI-FILHO, J. Bioactive compounds and antioxidant capacities of eighteen non-traditional tropical fruits from Brazil. **Food Chemistry**, v. 121, p. 996–1002, 2010.

SALEH, A. S. M.; ZHANG, Q.; CHEN, J.; SHEN, Q. Millet grains: Nutritional quality, processing, and potential health benefits. **Compr. Rev. FoodSci. FoodSafet.** v. 12, p. 281295, 2013.

SHUKLA, K.; SRIVASTAVA, S. Evaluation of finger millet incorporated noodles for nutritive value and glycemic index. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 3, p. 527–534, 2011.

SILVA, E. M. M.; ASCHERI, J. L. R.; ASCHERI, D. P. R. Quality assessment of glutenfree pasta prepared with a brown rice and corn meal blend via thermoplastic extrusion. **LWT - Food Science and Technology**, v. 68, p. 698–706, 2016.

SIROHA, A. K.; SANDHU, K. S. Effect of heat processing on the antioxidant properties of pearl millet (*Pennisetum glaucum*L.) cultivars. **Food Measure**, v. 11, p. 872–878, 2017.

STONE, H.; SIDEL, J. L. **Sensory evaluation practices**. London: Academic Press, 338p, 1985.

TADERA, K.; MINAMI, Y.; TAKAMATSU, K.; MATSUOKA, T.; Inhibition of α -glucosidase and α -amylase by flavonoids. **Journal of Nutritional Science and Vitaminology**, v. 52, p. 149-153, 2006.

TAYLOR, J. R. N. Millet Pearl: Overview. In: (Ed.). **Encyclopedia of Food Grains** (Second Edition). Oxford: Academic Press, p. 190-198, 2016.

TORBICA, A.; BELOVIĆ, M.; TOMIĆ, J. Novel breads of non-wheat flours. **Food Chemistry**, 282 134–140, 2019.

WEE, M. S. M.; LOUD, D. E.; TAN, V. W. K.; FORDE, C. G. Physical and sensory characterisation of noodles with added native and denatured pea protein isolate. **Food Chemistry**, v. 294, n. 152-159, 2019.

WHO - World Health Organization. **World health statistics 2016: Monitoring health for the SDGs sustainable development goals**. World Health Organization, 2016.

WILLIAMSON, G. Possible effects of dietary polyphenols on sugar absorption and digestion. **Mol. Nutr. Food Res**, v. 57, p. 48–57, 2013.

WOOD, J. A. Texture, processing and organoleptic properties of chickpea fortified spaghetti with insights to the underlying mechanisms of traditional durum pasta quality. **Journal of Cereal Science**, v. 49, p. 128–133, 2009.

WU, N.-N.; TAN, B.; LI, S.-S.; ZHANG, M.; TIAN, X.-H.; ZHAI, X.-T.; ..., GAO, K. Quality characteristics of extruded brown rice noodles with different amylose contents. **Food Science and Technology Research**, v. 24, n. 2, p. 311–319, 2018.

YE, J.; HU, X.; LUO, S.; LIU, W.; CHEN, J.; ZENG, Z.; LIU, C. Properties of Starch after Extrusion: A Review. **Starch - Stärke**, v. 70, n.11-12, 2017

ZHANG, G.; HAMAKER, B. Nutraceutical and health properties of sorghum and millet, in **Cereals and Pulses: Nutraceutical Properties and Health Benefits**, ed. by Liangli Y, Tsao R and Shahidi F. Wiley, Ames, IA, p. 165–186, 2012.

ZHAO, Y. H.; MANTHEY, F. A.; CHANG, S. K. C.; HOU, H. J.; YUAN, S. H. Quality characteristics of spaghetti as affected by green and yellow pea, lentil, and chickpea flours. **Journal of Food Science**, v.70, n. 6, p. S371–S376, 2005.

CONCLUSÃO GERAL

Neste trabalho concluiu-se que grãos de milho (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) tem grande potencial como alternativa alimentar, tendo em vista seu perfil nutricional, tecnológico e características de cultivo. Além disso, são isentos de glúten, não transgênicos e com custo de produção inferior a cereais como milho e arroz.

Este estudo desenvolveu produtos alimentícios popularmente conhecidos, pães e massas alimentícias, à base de farinha integral de milho crua (FMC) e pré-cozida (FMPC) por extrusão termoplástica. A tecnologia de extrusão como ferramenta modificadora aplicada à farinha integral de milho se mostrou viável, versátil e promissora para substituir a farinha de trigo em formulações de pães e massas alimentícias sem glúten. O processo não reduziu o conteúdo nutricional, melhorou a capacidade antioxidante, as propriedades físicas dos produtos e ainda contribuiu para a obtenção de um alimento com atividade anti-hiperglicêmica.

Os pães de formulação FMC:FMPC (50:50) apresentaram menor dureza e maior volume específico, quando comparados aos pães produzidos unicamente com FMC e FMPC, exibindo características semelhantes aos pães comerciais. Os pães preparados com a mistura FMC:FMPC apresentaram 96 % de atividade anti-hiperglicêmica e 76 % de atividade antioxidante (DPPH). As massas alimentícias preparadas com FMC:FMPC (50:50) exibiram melhor estrutura e aumento dos parâmetros de textura, podendo ser comparado à produtos comerciais. Em contrapartida, massas alimentícias preparadas somente com FMC e FMPC não apresentaram características adequadas. Na avaliação global, o produto preparado com FMC:FMPC teve índice de aceitabilidade (IA) de 66%, afetado principalmente pelo parâmetro de textura.

Nesse sentido, a farinha de milho pré-cozida apresentou propriedades favoráveis para elaboração de produtos de panificação e pastifício, podendo ser utilizado para alimentação de indivíduos saudáveis, celíacos e em dietas com restrição de carboidratos por apresentarem elevada atividade anti-hiperglicêmica, similar aos efeitos promovidos por drogas antiglicemiantes. Outras formulações e diferentes parâmetros do processo de extrusão termoplástica podem ser estudados a fim de obter produtos de melhor aceitabilidade.

A continuidade dos estudos, a respeito do potencial uso da cultura do milho na alimentação brasileira, carece do apoio das instituições de pesquisa. São necessários estudos a respeito da estabilização das farinhas de milho de modo a conferir maior qualidade tecnológica durante armazenamento. Avaliar a aceitabilidade e intenção de compra dos pães através da análise sensorial e o efeito de diferentes concentrações da FMPC na produção dos produtos de pastifício com objetivo de melhorar o perfil de textura das massas. Realizar uma análise de custos para a obtenção dos produtos de panificação e pastifício sem glúten a fim de buscar empresas com interesse nesse mercado.