



**MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SAÚDE E PRODUÇÃO ANIMAL NA
AMAZÔNIA**

ALUIZIO RAIMUNDO BASTOS DE OLIVEIRA JÚNIOR

**ENRIQUECIMENTO PROTEICO DA CASCA DE MANDIOCA PARA USO NA
ALIMENTAÇÃO ANIMAL**

**BELÉM-PA
2025**

ALUIZIO RAIMUNDO BASTOS DE OLIVEIRA JÚNIOR

**ENRIQUECIMENTO PROTEICO DA CASCA DE MANDIOCA PARA USO NA
ALIMENTAÇÃO ANIMAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saúde e Produção Animal na Amazônia, da Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Cristian Faturi

Coorientador: Dr. Thiago Carvalho da Silva.

**BELÉM – PA
2025**

“O medo é o primeiro de muitos inimigos”
(Garen Stemmaguarda).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre ter me guiado e me dado forças para não desistir; sem Ele jamais teria chegado até aqui.

À minha esposa, Caroline Oliveira, obrigado por ter embarcado comigo nesta jornada que foi o mestrado. Obrigado por me apoiar, por me ouvir, por me inspirar a ser uma pessoa e um profissional melhor. Sem você, este mestrado não seria o mesmo, e eu não seria o mesmo. Obrigado por sempre segurar a minha mão e me ajudar a enxergar a direção certa.

Agradeço ao meu pai, Aluizio Oliveira, e à minha mãe, Edylamar Koury, por todo o amor a mim dedicado, por todos os ensinamentos de vida, por todo o apoio e pelas palavras de encorajamento para que eu continuasse em frente. Muitas vezes vocês não entendiam o que eu estava falando, pensando ou passando, mas sempre estavam ali.

Ao professor Cristian Faturi, meu orientador, agradeço pelos ensinamentos, pela paciência, pelas conversas, por me ajudar a entender e a lidar com a loucura que é um experimento.

Ao professor Thiago Carvalho da Silva, meu coorientador no mestrado e meu orientador durante todo o meu período no GERFAM, obrigado pelas oportunidades, pelos ensinamentos, pela paciência, pela amizade e, mais do que tudo, por ter acreditado em mim.

Ao zootecnista Jorge Cardoso, coordenador do GERFAM, agradeço pelas conversas, por me ouvir quando eu queria desabafar e por me mostrar que alguns desafios, apesar de parecerem assustadores, são necessários.

Aos que fizeram o mestrado ser uma jornada mais leve — Caroline Oliveira, Dennis Medeiros, Francy Freitas, Isadora Matos, João Oliveira, Juliana Pitirini e Marcial Gonzales, dividir o estresse de disciplina e experimento com vocês foi maravilhoso. As fofocas, as raivas em comum, os choros, os surtos... levarei todos esses momentos para sempre. Obrigado por eles.

A todos os membros do Grupo de Estudos em Ruminantes e Forragicultura da Amazônia (GERFAM), os que ainda estão e os que já saíram, em especial a Luis Fernando, Alexandre Pereira, Elton Moreira, Saymon Gavinho, José Estumano, João Gabriel e Julia Chagas, só tenho a agradecer por todos os nossos momentos juntos: no laboratório, na Feiga e na UFRA.

RESUMO

O uso de alimentos não convencionais na produção animal é uma alternativa para redução dos altos custos associados aos alimentos convencionais. Além disso existe um viés mais sustentável por dar destino a derivados agroindustriais que podem se tornar passivos ambientais se descartados de forma inadequada. Nesse contexto a casca de mandioca (*Manihot esculenta*) já vem sendo utilizada como substituto ao milho. Esse derivado vem sendo estudado em outros países visando seu enriquecimento proteico como alternativa a soja. Nesse sentido objetivou-se avaliar o efeito da aeração, pH, uso de levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) e quantidade de ureia, no enriquecimento por fermentação mista da casca de mandioca (CM) e seus impactos sobre a composição química, fracionamento de proteína, custo dos nutrientes e rendimento. Foram conduzidos dois experimentos. Ambos seguiram um delineamento experimental inteiramente casualizados em esquema fatorial 2×2, com 6 repetições, totalizando 24 unidades experimentais. No primeiro experimento, os fatores avaliados foram: (A) aeração (com e sem aeração) e (C) correção de pH (corrigido para 4,5 e sem correção – pH de 5,3). No segundo experimento, os fatores avaliados foram: levedura (L) sem e com (50 g/kg CM) e dose de ureia (U) 120g/kg CM e 60g/kg CM, com base na matéria natural. No Experimento 1, houve interação ($P<0,05$) para as variáveis matéria mineral (MM), extrato etéreo (EE), Fração A, Rendimento em massa recuperada (RMR) e Custo MS. O maior valor de MM foi de 64,62 g/kg de MS e ocorreu na CM tratada com a solução que foi aerada e teve o pH corrigido, entretanto esse valor não diferiu da CM tratada com a solução que não aerada e teve o pH corrigido, as CM tratadas com as soluções que não tiveram o pH corrigido, não diferiram entre si, independente da aeração e foram similares a CM tratada com a solução que não aerada e teve o pH corrigido. Em relação ao EE o maior valor ocorreu na CM tratada com a solução que foi aerada e teve o pH corrigido (14,40 g/kg MS), esse valor não diferiu da CM tratada com a solução que foi aerada e que não teve o pH corrigido (14,32 g/kg MS). Para a Fração A, o maior resultado ocorreu na CM tratada com a solução que foi aerada e teve o pH corrigido (93,90 %PB). Os maiores RMR ocorreram nas CM tratadas com as soluções que não foram aeradas, independente da correção do pH (35,24 e 34,84%). O maior Custo MS ocorreu na CM tratada com a solução que foi aerada e que teve o pH corrigido (R\$ 4,01), diferindo de todas as demais. No experimento 2 houve interação ($P<0,05$) para as variáveis MS, RMR e Custo MS. O maior valor de MS ocorreu na CM tratada com a solução que foi inoculada com levedura e possuía a menor dose de ureia (907,62 g/kg). O menor RMR foi observada na CM tratada com a solução que foi inoculada e possuía a menor dose de ureia (31,03 %), diferindo de todas as demais. O maior Custo MS foi observado na CM tratada com a solução que foi inoculada e possuía maior dose de ureia (R\$4,01) diferindo de todas as demais. Os resultados evidenciam que o processo de fermentação mista é eficaz em elevar a concentração proteica da CM. A aeração causa um maior impacto no teor de proteína e que a correção de pH não afeta a concentração de proteína da CM, nesse sentido é possível fazer a fermentação mista da casca de mandioca sem corrigir o pH. Além disso, observou-se que a dose de ureia impacta mais o teor de proteína do que a presença da levedura no processo de enriquecimento da casca de mandioca sem aeração.

Palavras-chave: alimentos não convencionais, *Manihot esculenta*, *Saccharomyces cerevisiae*, aeração, fermentação.

ABSTRACT

The use of unconventional feeds in animal production is an alternative for reducing the high costs associated with conventional feeds. Furthermore, there is a more sustainable aspect by giving a purpose to agro-industrial by-products that can become environmental liabilities if disposed of improperly. In this context, cassava peel (*Manihot esculenta*) has been used as a substitute for corn. This by-product is being studied in other countries for protein enrichment as an alternative to soy. The objective was to evaluate the effect of aeration, pH, the use of yeast (*Saccharomyces cerevisiae*), and the amount of urea on the enrichment of cassava peel (CPe) by mixed fermentation and their impacts on chemical composition, protein fractionation, nutrient cost, and yield. Two experiments were conducted. Both followed a completely randomized experimental design in a 2×2 factorial scheme, with 6 repetitions, totaling 24 experimental units. In the first experiment, the factors evaluated were: (A) aeration (with and without aeration) and (C) pH correction (corrected to 4.5 and without correction - pH of 5.3). In the second experiment, the factors evaluated were: yeast (Y) without and with (50 g/kg CPe) and urea dose (U) 120g/kg CPe and 60g/kg CPe, based on natural matter. In Experiment 1, there was an interaction ($P<0.05$) for the variables mineral matter (MM), ether extract (EE), Fraction A, Mass Recovery Yield (MRY), and DM cost. The highest MM value was 64.62 g/kg DM and occurred in the CPe treated with the solution that was aerated and had the pH corrected, however, this value did not differ from the CPe treated with the non-aerated and pH-corrected solution. The CPe treated with solutions that did not have the pH corrected did not differ from each other, regardless of aeration, and were similar to the CPe treated with the non-aerated and pH-corrected solution. Regarding EE, the highest value occurred in the CPe treated with the solution that was aerated and had the pH corrected (14.40 g/kg DM), and this value did not differ from the CPe treated with the solution that was aerated and did not have the pH corrected (14.32 g/kg DM). For Fraction A, the highest result occurred in the CPe treated with the solution that was aerated and had the pH corrected (93.90 %CP). The highest MRY occurred in the CPe treated with the solutions that were not aerated, regardless of pH correction (35.24% and 34.84%). The highest DM Cost occurred in the CPe treated with the solution that was aerated and had the pH corrected (R\$ 4.01), differing from all others. In Experiment 2, there was an interaction ($P<0.05$) for the variables DM, MRY, and DM Cost. The highest DM value occurred in the CPe treated with the solution that was inoculated with yeast and had the lower urea dose (907.62 g/kg). The lowest MRY was observed in the CPe treated with the solution that was inoculated and had the lower urea dose (31.03%), differing from all others. The highest DM Cost was observed in the CPe treated with the solution that was inoculated and had the higher urea dose (R\$4.01), differing from all others. The results show that the mixed fermentation process is effective in increasing the protein concentration of CPe. Aeration has a greater impact on the protein content, and pH correction does not affect the protein concentration of CPe. Therefore, it is possible to perform mixed fermentation of cassava peel without correcting the pH. Furthermore, it was observed that the urea dose has a greater impact on protein content than the presence of yeast in the enrichment process of non-aerated cassava peel.

Keywords: non-conventional feedstuff, *Manihot esculenta*, *Saccharomyces cerevisiae*, aeration, fermentation.

SUMÁRIO

CONTEXTUALIZAÇÃO.....	7
REVISÃO DE LITERATURA.....	10
1. Uso de alimentos não convencionais na alimentação de ruminantes	10
2. A cultura da mandioca	11
2.1. Raiz e derivados da indústria	12
2.2. Casca de mandioca na alimentação animal	12
3. Enriquecimento proteico.....	13
3.1. Alimentos enriquecidos.....	15
4. Referência bibliográfica	16
CAPÍTULO I: TÉCNICAS DE FERMENTAÇÃO PARA O ENRIQUECIMENTO PROTEICO DA CASCA DE MANDIOCA	21
1. Introdução	21
2. Material e métodos	22
2.1. Local do experimento.....	22
2.2. Delineamento Experimental.....	23
2.3. Aquisição dos ingredientes	23
2.4. Processo de enriquecimento	23
2.5. Caracterização da Matéria-Prima.....	25
2.6. Análises Laboratoriais	25
2.7. Análise Estatística	26
2.8. Análise de Custo	27
2.9. Análise de Rendimento	28
3. Resultados	28
4. Discussão	34
5. Conclusão	39
6. Referências	39

CONTEXTUALIZAÇÃO

Em sistemas intensivos de produção animal, o custo operacional tende a crescer conforme novas tecnologias são inseridas na atividade, indicando uma grande oscilação nos custos variáveis principalmente do item alimentação animal (Oaigen *et al.*, 2009). Entretanto quando se verifica a atividade pecuária a nível de agricultura familiar percebe-se que a alimentação continua sendo a mais onerosa em relação as despesas operacionais efetivas (79,96%) (Teixeira *et al.*, 2018).

Isso acontece, pois grande parte do setor da pecuária utiliza alimentos convencionais como milho, cana-de-açúcar e farelos de soja, que têm o seu preço atrelado ao mercado internacional e que em alguns momentos reflete de forma desfavorável a margem de lucro do produtor (Da Silva *et al.*, 2024).

Por esse motivo, o uso de alimentos não convencionais têm sido uma ferramenta para diminuir custos, manter a eficiência alimentar e trazer sustentabilidade aos sistemas pecuários, seja pela diminuição do impacto ambiental causado pelo descarte de resíduos agropecuários ou pelo aproveitamento de um recurso que seria perdido (Valentim *et al.*, 2021).

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é nativa da América do Sul, bastante adaptada aos climas tropicais e subtropicais. Em 2022 o Brasil ocupava a sexta posição no ranking de maiores produtores mundiais da cultura com um pouco mais de 17 milhões de toneladas produzidas (FAO, 2023). Em 2024 a produção brasileira totalizou cerca de 19 milhões de toneladas de raiz, sendo a região norte responsável por quase 31% dessa produção e o estado do Pará aparece na liderança com cerca de 21% da produção (CONAB, 2025).

Em um cenário global, a mandiocultura é de extrema importância por compor a base alimentar de populações em diversas regiões, principalmente na África, Ásia e América latina, o que naturalmente, gera um volume considerável de casca de mandioca, derivado com potencial de uso na alimentação animal (Enesi *et al.*, 2022). Esse derivado é composto por casca, entrecasca e pontas de raiz, é gerado nos momentos iniciais do processamento (Rangel *et al.*, 2008).

No entanto, a utilização desse derivado na alimentação animal é restrita por suas características nutricionais, como o baixo teor de proteína bruta (2,1%) e o alto teor de fibra (52,10%) (Gunun *et al.*, 2023). O que limita seu uso como substituto de fontes nobres como o farelo de soja.

Nos últimos anos esse derivado vem sendo estudado como substrato para o cultivo de microrganismos com objetivo de aumentar seu valor nutricional, através de processos de fermentação (Oboh *et al.*, 2006). Para a condução eficaz desses processos, alguns parâmetros são cruciais, como por exemplo o controle de temperatura, substrato, tempo de incubação, volume de incubação, umidade, pH e aeração (Monteiro & Silva, 2009).

Nesse contexto, hipotetizou-se que os diferentes métodos de enriquecimento da casca de mandioca alteram as concentrações de proteína bruta e diferem em relação ao custo. Objetivou-se avaliar o efeito da aeração, correção do pH, inoculação com levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) e dose de ureia, no enriquecimento por fermentação mista da casca de mandioca, de modo a conseguir elevar a sua concentração proteica.

A presente dissertação é composta por uma revisão de literatura e um capítulo. O capítulo aborda dois experimentos referentes ao enriquecimento da casca de mandioca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Análise mensal Mandioca Dezembro de 2024. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2025.

DA SILVA, Jardenia Maria Pereira et al. Utilização de coprodutos e subprodutos de frutas como alternativa na dieta de ruminantes: revisão integrativa. Revista Coopex, v. 15, n. 02, p. 5423-5536, 2024.

ENESI, R. O. *et al.* Understanding changes in cassava root dry matter yield by different planting dates, crop ages at harvest, fertilizer application and varieties. *European Journal of Agronomy*, v. 133, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126448>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). Cassava production – FAO [2023]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, “Production: Crops and livestock products”. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/cassava-production>. Acesso em: 14 fev. 2025.

GUNUN, P.; CHERDTHONG, A.; KHEJORNART, P.; WANAPAT, M.; POLYORACH, S.; KAEWWONGSA, W.; GUNUN, N. (2023). Replacing Concentrate with Yeast-or EM-Fermented Cassava Peel (YFCP or EMFCP): Effects on the Feed Intake, Feed Digestibility, Rumen Fermentation, and Growth Performance of Goats. *Animals*. 13. 551. 10.3390/ani13040551.

MONTEIRO, V.; SILVA, R. Aplicações industriais da biotecnologia enzimática. Revista Processos Químicos, v. 3, p. 9-23, 2009. DOI: <https://doi.org/10.19142/rpq.v3i5.83>.

OAIGEN, R. P. et al. Análise da sensibilidade da metodologia dos centros de custos mediante a introdução de tecnologias em um sistema de produção de cria. Revista Brasileira de Zootecnia, v. 38, n. 6, p. 1155–1162, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000600025>.

OBOH, G. Nutrient enrichment of cassava peels using a mixed culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus* spp solid media fermentation techniques. *Electronic Journal of Biotechnology*, v. 9, p. 46-49, 2006.

POLYORACH, S.; WANAPAT, M.; WANAPAT, S. Enrichment of protein content in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) by supplementing with yeast for use as animal feed. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, v. 25, n. 2, p. 142–149, 2013.

RANGEL, A. H. N. et al. Mandioca na Alimentação de Ruminantes. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 3, p. 1-12, 2008.

TEIXEIRA, J. E. et al. Custo de produção e análise de rentabilidade da pecuária leiteira em agricultura familiar. *Agropecuária Técnica*, v. 39, n. 2, p. 191, 2018. doi:10.25066/agrotec.v39i2.34747.

VALENTIM, J. K. et al. Grãos Secos de Destilaria na Alimentação de Frangos de Corte. *Ensaio e Ciência*, v. 25, n. 1, 2021.

REVISÃO DE LITERATURA

1. Uso de alimentos não convencionais na alimentação de ruminantes

No ano de 2023, o Brasil registrou um abate total de bovinos de 41,96 milhões de cabeças, sendo deste, 83,4% representado por animais terminados a pasto. Ademais, no mesmo ano foi registrado um rebanho de mais de 197 milhões de cabeças, distribuídos uma área de pastagem de 161,45 milhões de hectares (ABIEC, 2024). Isso evidencia que a atividade é baseada no uso de forrageiras, principalmente em regiões tropicais onde as condições edafoclimáticas são ideais para o desenvolvimento das gramíneas. Sua utilização permite reduzir os custos de produção e de alimentação além de contribuir com a sustentabilidade do sistema (Andrade *et al.*, 2023; Bourscheidt *et al.*, 2023).

No entanto a produção a pasto enfrenta um desafio constante, a sazonalidade de produção, o que acarreta um desequilíbrio entre a oferta de forragem e a demanda nutricional dos animais (Pinheiro *et al.*, 2021). No período seco, a oferta de forragem diminui e a massa restante apresenta mudanças na sua morfologia e composição química, como por exemplo, menor proporção de proteína bruta e maior teor de lignina (De Freitas *et al.*, 2019).

Diante dessa condição, para continuar garantindo o desenvolvimento de animais em pastejo, se tornam necessárias as suplementações estratégicas para cada época do ano (Valente, 2012). A suplementação no período de seca tem foco em suprir os nutrientes limitantes para compensar a queda de qualidade das gramíneas, podendo ser feita com o objetivo de prover a manutenção ou o ganho de peso dos animais, enquanto a suplementação no período chuvoso tem como objetivo aumentar o desempenho dos animais, possibilitando reduzir a idade de abate. Entretanto, conforme a atividade vai se intensificando, o implemento de novas tecnologias impacta diretamente nos custos variáveis associados a alimentação animal (Hoffmann *et al.*, 2014; Reis *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2021).

Neste contexto, a utilização de alimentos não convencionais se torna uma alternativa viável visto que estes podem apresentar custos menos elevados e trazem sustentabilidade aos sistemas pecuários, seja pela diminuição do impacto ambiental causado pelo descarte de resíduos agropecuários ou pelo aproveitamento de um recurso que seria perdido (Negesse *et al.*, 2009).

Entre os alimentos não convencionais, destaca-se a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), cultura de extrema importância para a alimentação humana, suas raízes

apresentam grande concentração de amido caracterizando-a como fonte de energia, enquanto a parte aérea é fonte de proteína e fibras (Oliveira Júnior, 2021).

2. A cultura da mandioca

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma cultura de origem sul-americana, é amplamente disseminada em países de clima tropical e subtropical e está presente em todo território brasileiro. Considerada rustica e bem adaptada a oscilações climáticas e regiões com solos de baixa fertilidade (Souza *et al.*, 2014).

A mandioca é uma espécie de planta dicotiledônia, pertencente à família Euphorbiaceae, sua forma de propagação mais disseminada é através do plantio das manivas (porções do caule que possuem gemas apicais). É possível fazer a propagação por sementes, entretanto, essa prática é mais complexa e restrita a programas de melhoramento genético (Tironi *et al.*, 2019).

A mandioca possui seu desenvolvimento fisiológico dividido em 4 fases principais, a primeira chamada de fase de emergência corresponde do surgimento das primeiras raízes adventícias até o surgimento da parte aérea do vegetal e dura em média 15 dias; a segunda fase chamada de vegetativa tem como característica o crescimento em comprimento do sistema radicular e pelo desenvolvimento das folhas, ocorre entre 15 e 180 dias; a terceira fase é chamada de fase reprodutiva, é nesse período que ocorre a translocação dos fotoassimilados das folhas para as raízes e onde ocorre o desenvolvimento das raízes tuberosas onde aumentam seu diâmetro em decorrência da deposição de amido, isso ocorre dos 180 aos 300 dias após o plantio, já a quarta fase ocorre após os 300 dias e recebe o nome de fase de repouso, é nesta fase que a planta passa pelo processo natural de perda das folhas, encerrando a sua atividade vegetativa, permanecendo apenas a migração das substâncias de reserva para as raízes (Tironi *et al.*, 2019).

É importante salientar que a mandioca é considerada tóxica, uma vez que sintetiza e concentra nas raízes e na parte aérea glicosídeos cianogênicos (linamarina e lotaustralina), pois estes compostos são produtos secundários do metabolismo das plantas e provavelmente fazem parte do sistema de defesa do vegetal (Cardoso *et al.*, 2005). Quando o material vegetal é dilacerado por mastigação ou processamento os glicosídeos são hidrolisados por enzimas e convertidos em HCN (ácido cianídrico) (Tokarnia *et al.*, 2000).

De acordo com Borges *et al.* (2002) a concentração de HCN varia de acordo com a variedade da mandioca, parte do vegetal e época de colheita. As cultivares de mandioca podem ser classificadas de acordo com a quantidade de HCN encontrada, Hoppe *et al.* (2009) classificou como brava as cultivares que continham 100 mg ou mais de HCN por kg de raiz fresca e como mansa as cultivares que apresentavam concentrações menores.

A toxicidade desse composto ocorre pois ele bloqueia o transporte de oxigênio, causando quadros de asfixia celular e podendo evoluir a morte. Entretanto, para que isso ocorra, é necessária a ingestão da dose tóxica de HCN que é de 2 a 4 mg de HCN por kg/pv por hora (Tokarnia *et al.*, 2000).

2.1. Raiz e derivados da indústria

No ano de 2023, o estado do Pará era o primeiro do ranking nacional de produção de raiz de mandioca equivalente a 21% do total produzido, a segunda posição está o Paraná, com mais de 3 milhões de toneladas produzidas (IBGE, 2023). Em termos de produtividade (t/ha), o Paraná assume a liderança nacional com 26,44 t/ha, enquanto o Pará desce para a 12ª posição com 14,93 t/ha produzidas (Conab, 2025).

A mandioca está presente no contexto histórico nacional no âmbito alimentar, social, econômico e cultural da população, principalmente ao analisar a cultura de subsistência atrelada a atividades de agricultura familiar das regiões norte e nordeste, onde sua presença é responsável por mitigar a fome das populações mais carentes (Motta, 2013).

2.2. Casca de mandioca na alimentação animal

A casca da mandioca é considerada como uma alternativa a alimentação animal, pois pode conter em sua composição em torno de 56% de amido, apresentando potencial para substituir parcialmente ou integralmente o milho em dietas (Santos *et al.*, 2015). Um ponto a ser considerado é a perecibilidade da casca, pois a elevada umidade a torna susceptível a entrar em processo de deterioração mais rapidamente (Vilhalva *et al.*, 2012).

A casca de mandioca apresenta rendimento variável a depender do método de descascamento aplicado à raiz. Quando este descascamento é feito de forma manual, foi observado rendimento de 22%, enquanto no processo mecanizado, esse valor pode chegar a 35% (Ikujenlola & Opawale, 2007).

O processamento também impacta na composição química do alimento. Santa Rosa (2022) comentou que o grau de limpeza da casca influencia no teor de matéria mineral presente no derivado.

Entretanto, é preciso salientar que independente do processamento, sua composição irá apresentar grande variação por outros fatores como variedade e idade de colheita. Na tabela 1, é possível observar estudos realizados a respeito da composição química desse produto.

Tabela 1. Composição química da casca de mandioca

Referências	MS%	MM%	PB%	FDN%	FDA%	EE%	CNF%	Amido%
Marques <i>et al.</i> (2000)	89,2	2,2	3,7	28,6	20,4	-	-	48
Prado <i>et al.</i> (2000)	88,68	4	3,37	28,63	20,44	-	-	58,1
Menezes <i>et al.</i> (2004)	80,5	24	4,55	42,99	28,7	0,8	-	35,38
Ferreira & Silva (2011)	20,9	0,91	0,99	-	-	0,16	-	-
Faria <i>et al.</i> (2011)	33,93	4,14	3,94	-	-	0,9	-	-
Santana <i>et al.</i> (2014)	30,29	11,1	4,48	29,83	21,69	-	-	-
Souza <i>et al.</i> (2020)	28,23	21,13	4,39	48,2	31,77	1,14	-	30,43
Pitirini <i>et al.</i> (2021)	38,28	2,95	2,32	5,48	-	-	86,74	-
Santa Rosa, (2022)	29,6	16,8	2,1	52,1	30,6	-	-	-

Marques *et al.* (2000), avaliaram o desempenho de novilhas confinadas alimentadas com casca de mandioca em substituição ao milho e concluíram que apesar do consumo da dieta ter diminuído, o ganho de peso e a conversão alimentar não foram afetadas. Entretanto, Menezes *et al.* (2004), avaliaram a substituição do milho por casca de mandioca e seu efeito sobre o consumo, digestibilidade de nutrientes e ganho de peso de caprinos e concluíram que ocorreu a diminuição da ingestão, digestibilidade dos nutrientes e desempenho dos animais.

3. Enriquecimento proteico

A necessidade constante de utilizar alimentos de alto valor nutritivo na produção animal é acompanhada por frequentes aumentos nos preços desses suplementos vegetais. Isso é crucial para garantir o desempenho dos animais, principalmente em épocas de escassez de alimentos. Nesse contexto, desperta-se o interesse em utilizar alimentos não convencionais para compor a dieta animal (Araújo *et al.*, 2008).

Uma alternativa promissora e que se encaixa nesse cenário são as Proteínas de Célula Única (SCP), células secas de fungos, bactérias, leveduras e algas, que possuem

potencial de serem usadas como fonte de proteínas para animais (Anupama & Ravindra, 2000). Esses microrganismos possuem a capacidade de converter matérias-primas convencionais como amido, melão, resíduos de frutas e resíduos agropecuários em uma biomassa com alta concentração proteica (Araújo *et al.*, 2008).

A escolha de se utilizar leveduras para a produção de SCP é baseada no seu alto teor de nutrientes e na sua versatilidade, sendo possível seu cultivo em diversos substratos. Os gêneros mais utilizados são *Candida*, *Pichia* e *Saccharomyces* (Suman *et al.*, 2015).

A produção da biomassa microbiana ocorre, basicamente, através de processos de fermentação, podendo este ser submerso, em estado sólido ou semi-sólido. Após fermentação, a biomassa é submetida a processamentos antes da sua utilização como filtragem, centrifugação e secagem (Anupama & Ravindra, 2000).

Entre os processos de fermentação utilizados para produção SCP, os dois principais são a Fermentação em Estado Sólido (FES) e a Fermentação em Estado Líquido ou Submersa (FEL) (Nadar *et al.*, 2024).

A FES é um processo no qual os microrganismos são cultivados em substratos sólidos. Por ser um processo inerentemente mais lento, permite que o substrato tenha maior durabilidade. Mesmo assim, é possível suplementá-lo com nutrientes adicionais para otimizar o crescimento microbiano (Kumar *et al.*, 2021). Essa técnica se caracteriza por ter pouca água livre, sendo, mais adequada para microrganismos que exigem menor atividade de água. Além disso, a FES requer um fluxo contínuo de ar para sua condução eficaz (Subramaniam & Vimala, 2012).

Por outro lado, a FEL utiliza substratos líquidos que possuem todos os nutrientes necessários para desenvolvimento dos microrganismos. Este processo ocorre de forma mais acelerada em comparação à FES, e se necessário mais nutrientes são adicionados ao meio para sustentar o crescimento microbiano. Para coleta da biomassa, são necessários processos de filtração, centrifugação e secagem (Nasseri *et al.*, 2011; Sharif *et al.*, 2021).

Vários parâmetros precisam ser controlados para que o processo de fermentação ocorra de forma eficaz. Tais parâmetros variam de acordo com o tipo de fermentação utilizada, porém, podem ser agrupados como biológicos, físico-químicos e ambientais, como a temperatura, tempo e volume de incubação, umidade, pH, substrato, aeração e microrganismos (Krishna, 2005).

Fungos e leveduras preferem um ambiente ácido para seu desenvolvimento, e essa condição ajuda a reduzir a contaminação e a competição com bactérias. Na fermentação submersa, o controle do pH é facilitado, já que o meio é homogêneo. Por outro lado, para

a fermentação em estado sólido, o controle do pH é feito pelo uso de substratos com capacidade tampão ou ureia, para atingir a faixa ideal (Gowthaman *et al.*, 2001).

A aeração é responsável por garantir o ambiente aeróbio, condição necessária para alguns microrganismos. Além de participar de processos bioquímicos, ela também dissolve o dióxido de carbono e ajuda a regular a temperatura (Pandey, 2001).

A concentração e disponibilidade de nutrientes presentes no substrato também é um fator que impacta no desenvolvimento das SCP. Os principais nutrientes envolvidos no processo de fermentação são os carboidratos e proteínas, entretanto é necessário levar em consideração as vitaminas e minerais (Krishna, 2005). Desta forma é preciso garantir que o substrato tenha fontes de nutrientes em quantidade que atenda o desenvolvimento dos microrganismos.

Substratos sólidos normalmente apresentam uma estrutura rica em polissacarídeos como amido, celulose, lignocelulose, pectina ou outros. Tais compostos são fonte de carbono e a principal fonte de energia para o crescimento microbiano. A escolha do substrato depende de fatores como custo e disponibilidade. Resíduos agroindustriais tendem a ser uma boa opção de substrato para processos de fermentação pois apresentam uma estrutura rica em carbono, como exemplos de resíduos que podem ser usados como substrato há o bagaço de cana-de-açúcar, trigo, arroz, milho e farelos de grãos, palhas de trigo e arroz, fibra de coco, resíduos de banana, resíduos de chá e café, resíduos de mandioca, resíduos de usina de óleo de palma (Krishna, 2005).

O nitrogênio é um componente essencial para os microrganismos por participar diretamente de reações bioquímicas inerentes ao seu crescimento uma vez que compõe proteínas, aminoácidos, nucleotídeos e enzimas (Chen *et al.*, 2024). As fontes de nitrogênio para microrganismos podem ser classificadas em fontes orgânicas (de origem animal ou vegetal) e inorgânicas (Ye *et al.*, 2025).

As fontes de nitrogênio inorgânico como sulfato de amônia, ureia, hidróxido de amônio são utilizadas com mais frequência por apresentarem menor custo e maior rendimento quando comparados a fontes orgânicas (Jin *et al.*, 2018).

3.1. Alimentos enriquecidos

A literatura já descreve a produção de SCP a partir de diversos derivados agroindustriais. Na tabela 2 é possível observar os substratos utilizados no processo de

fermentação bem como o teor de proteína bruta antes de depois do processo de fermentação.

Apesar de ser possível observar um incremento no teor de proteína bruta em todos os trabalhos, esse incremento não é padronizado, reflexo da variação causada por diferentes substratos, métodos e parâmetros envolvidos no processo.

Entretanto esses resultados deixam evidente que o enriquecimento proteico por processos de fermentação é eficaz.

Tabela 2. Enriquecimento proteico de derivados agroindustriais

Referências	Substrato	%PB antes	PB% depois
Oboh <i>et al.</i> (2006)	Casca de mandioca	8,2	21,5
Hoskin <i>et al.</i> (2006)	Resíduo de abacaxi	6,4	16,1
Araújo <i>et al.</i> (2008)	Palma forrageira	4,4	9,75
Vendruscolo <i>et al.</i> (2008)	Bagaço de maçã	3,88	15,22
Boonnop <i>et al.</i> (2009)	Raiz de mandioca desidratada	3,4	32,5
Boonnop <i>et al.</i> (2009)	Raiz de mandioca fresca	3,2	21,1
Polyorach <i>et al.</i> (2013)	Raiz de mandioca desidratada	-	47,5
Polyorach <i>et al.</i> (2017)	Raiz de mandioca fresca	3,1	28,7
Polyorach <i>et al.</i> (2017)	Raiz de mandioca desidratada	3,5	42,1
Silva <i>et al.</i> (2016)	Resíduo de abacaxi	5,25	20,56
Aruna <i>et al.</i> (2017)	Casca de inhame	6,6	11,08
Aruna <i>et al.</i> (2017)	Casca de inhame	6,6	15,54
Silva <i>et al.</i> (2018)	Resíduo de acerola	0,84	5,21
Sousa <i>et al.</i> (2020)	Casca de jaca	-	17,1

4. Referência bibliográfica

ABIEC. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE. Publicações: BEEF REPORT 2024. ABIEC, 2024. Disponível em: Beef Report 2024 | Perfil da Pecuária no Brasil - ABIEC.

ANDRADE, C. M. S. et al. Sistema Guaxupé: Modelo de Intensificação Sustentável da Pecuária de Corte Baseado em Pastagens Permanentes de Alta Performance, Ricas em Leguminosas. 2023.

ANUPAMA, P.; RAVINDRA, P. Value-added food: Single cell protein. *Biotechnology Advances*, v. 18, n. 6, p. 459-479, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00045-8](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00045-8).

ARAÚJO, L. F. et al. Enriquecimento protéico da palma forrageira com *Saccharomyces cerevisiae* para alimentação de ruminantes. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e*

Zootecnia, v. 60, n. 2, p. 401-407, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-09352008000200019>.

ARUNA, T.E., AWORH, O.C., RAJI, A.O., OLAGUNJU, A.I., 2017. Protein enrichment of yam peels by fermentation with *Saccharomyces cerevisiae* (BY4743). *Ann. Agric. Sci.* 62, 33–37.

BOONNOP, K. et al. Enriching nutritive value of cassava root by yeast fermentation. *Scientia Agricola*, n.5, v.66, p. 629–633, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000500007>

BORGES, M.; FUKUDA, W. M. G.; ROSSETTI, A. G. Avaliação de variedades de mandioca para consumo humano. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 37, p. 1559-1565, 2002.

BOURSCHEIDT, M. et al. Highlighting the benefits of biological nitrogen fixation on agronomic, physiological, and nutritive value traits of brachiariagrass. *European Journal of Agronomy*, v. 143, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126730>.

CARDOSO, A. et al. Processing of cassava roots to remove cyanogens. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 18, n. 5, p. 451-460, 2005.

CHEN, Y., LIN, Y., ZHU, J., ZHOU, J., LIN, H., FU, Y., & ZHOU, Y. (2024). Transcriptomic analysis of nitrogen metabolism pathways in *Klebsiella aerogenes* under nitrogen-rich conditions. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1323160.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Análise mensal Mandioca Dezembro de 2024. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2025.

DE FREITAS, P. V. D. X. et al. Efeitos do pastejo no desenvolvimento e crescimento de plantas forrageiras. *Revista Científica Rural*, v. 21, n. 2, p. 388-405, 2019.

FARIA, P. B. et al. Processamento da casca de mandioca na alimentação de ovinos: desempenho, características de carcaça, morfologia ruminal e eficiência econômica. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 40, n. 12, p. 2929-2937, 2011.

FERREIRA, F. S. et al. Avaliação da composição bromatológica da casca da mandioca: uma alternativa para a alimentação animal no Vale do Juruá-Acre. *Cadernos de Agroecologia*, v. 15, n. 2, 2020.

FERREIRA, M. S.; SILVA, J. R. B. Utilização da casca, entrecasca e raspa da mandioca na alimentação de ruminantes. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, v. 1, n. 2, 2011. DOI: <https://doi.org/10.21206/rbas.v1i2.40>.

GOWTHAMAN, M. K.; KRISHNA, C.; MOO-YOUNG, M. Fungal solid state fermentation—An overview. In: KHACHATOURIANS, G. G.; ARORA, D. K. (Ed.). *Applied Mycology and Biotechnology*, v. 1. Agriculture and Food Productions. p. 305-352. Elsevier Science, The Netherlands, 2001.

HOFFMANN, A. et al. Produção de bovinos de corte no sistema de pasto-suplemento no período da seca. *Nativa*, v. 2, n. 2, p. 119-130, 2014.

HOSKIN, R.; MAGALHÃES, M.; MACEDO, Gorete. (2007). Protein enrichment of pineapple waste with *Saccharomyces cerevisiae* by solid state bioprocessing. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 66.

HOPPE, S. et al. Análise econômico-financeira da implantação de uma destilaria para produção de álcool carburante a partir da mandioca. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 1, n. 2, p. 245-257, 2009.

IKUJENLOLA, A. V.; OPAWALE, B. O. Effects of Processing on the Yield and Physico-Chemical Properties of Cassava Products. In: *Advanced Materials Research*, v. 18-19, p. 165-170, 2007. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.18-19.165>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). SIDRA. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado>.

JIN, D., ZHAO, S., ZHENG, N., BECKERS, Y., & WANG, J. (2018). Urea metabolism and regulation by rumen bacterial urease in ruminants—a review. *Annals of Animal Science*, 18(2), 303-318.

KRISHNA, C. Solid-state fermentation systems—An overview. *Critical Reviews in Biotechnology*, v. 25, n. 1-2, p. 1-30, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/07388550590925383>.

KUMAR, V.; AHLUWALIA, V.; SARAN, S.; KUMAR, J.; PATEL, A. K.; SINGHANIA, R. R. Recent developments on solid-state fermentation for production of microbial secondary metabolites: challenges and solutions. *Bioresource Technology*, v. 323, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124566>.

LIMA, R. F. et al. A produção de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) na agricultura familiar da região Nordeste Paraense: estudo a partir da comunidade de Jacarequara, Capanema, Pará. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 3, n. 3, p. 1284-1296, 2020.

MARQUES, J. A. et al. Avaliação da mandioca e seus resíduos industriais em substituição ao milho no desempenho de novilhas confinadas. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 29, n. 5, p. 1528-1536, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982000000500035>.

MENEZES, M. P. C. et al. Substituição do milho pela casca de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) em rações completas para caprinos: consumo, digestibilidade de nutrientes e ganho de peso. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 33, n. 3, p. 729-737, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982004000300022>.

MOTTA, J. da S. et al. Mandioca, a raiz do Brasil. 2013.

NADAR, C. G.; FLETCHER, A.; MOREIRA, B. R.; HINE, D.; YADAV, S. Waste to protein: a systematic review of a century of advancement in microbial fermentation of agro-industrial byproducts. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 23, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13375>.

NASSERI, A.T. et al. Single Cell Protein: Production and Process. *American Journal of Food Technology*. v. 6, 2011. DOI: [10.3923/ajft.2011.103.116](https://doi.org/10.3923/ajft.2011.103.116).

- NEGESSE, T., MAKKAR, H. P. S., & BECKER, K. (2009). Nutritive value of some non-conventional feed resources of Ethiopia determined by chemical analyses and an in vitro gas method. *Animal Feed Science and Technology*, 154(3-4), 204–217.
- OBOH, G. Nutrient enrichment of cassava peels using a mixed culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus* spp solid media fermentation techniques. *Electronic Journal of Biotechnology*, v. 9, p. 46-49, 2006.
- OLIVEIRA, L. M. et al. Impacto da alimentação de bovinos de corte terminados em confinamento: variáveis médias e marginais. 2021.
- OLIVEIRA JÚNIOR, Aluizio Raimundo Bastos de. Balanço de nutrientes em silagens de parte aérea de mandioca em função da idade de colheita. 2022.
- PANDEY, A. et al. Solid-State Fermentation in Biotechnology—Fundamentals and Applications. Asiatech Publishers, Inc. New Delhi, 2001. p. 100-221.
- PINHEIRO, A. G. et al. Lacunas de produtividades e estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira – Revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 4, p. 2403-2426, 2021.
- PITIRINI, J. S. et al. Fermentation profile and chemical composition of cassava root silage. *Acta Amazonica*, v. 51, n. 3, p. 191-198, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4392202004410>.
- POLYORACH, S.; WANAPAT, M.; POUNGCHOMPU, O.; CHERDTHONG, A.; GUNUN, P.; GUNUN, N.; KANG, S. Effect of fermentation using different microorganisms on nutritive values of fresh and dry cassava root. *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances*, v. 13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3923/ajava.2018.128.135>.
- POLYORACH, S.; WANAPAT, M.; WANAPAT, S. Enrichment of protein content in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) by supplementing with yeast for use as animal feed. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, v. 25, n. 2, p. 142-149, 2013.
- PRADO, I. N. et al. Desempenho de novilhas alimentadas com rações contendo milho ou casca de mandioca como fonte energética e farelo de algodão ou levedura como fonte protéica. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 29, n. 1, p. 278-287, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982000000100036>.
- REIS, R. A. et al. Suplementação da dieta de bovinos de corte como estratégia do manejo das pastagens. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 38, n. spe, p. 147-159, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300016>.
- SANTA ROSA, Caroline Emanuelle do Amaral. Análise econômica da utilização de silagem de casca de mandioca com torta de dendê para uso na alimentação animal. 2022.
- SANTANA, T. P. et al. Caracterização bromatológica de casca de mandioca e da manipueira para utilização na alimentação animal. 2014.
- SANTOS, V. L. F. et al. Rumen parameters of sheep fed cassava peel as a replacement for corn. *Small Ruminant Research*, v. 133, p. 88-92, 2015.

- SHARIF, M.; ZAFAR, M.; AQIB, A.; SAEED, M.; FARAG, M.; ALAGAWANY, M. (2021). Single cell protein: Sources, mechanism of production, nutritional value and its uses in aquaculture nutrition. *Aquaculture*. 531. 735885. 10.1016/j.aquaculture.2020.735885.
- SILVA, A.; MACEDO, A. D. B.; SILVA, R. C. F.; DANTAS, D. L.; CAMPOS, A. R. N. Enriquecimento protéico de resíduos de acerola com *saccharomyces cerevisiae* para alimentação animal. In: CIRNE, Luiza Eugênia da Mota Rocha et al. *Campina Gestão integrada de resíduos: universidade e comunidade*. Grande – PB.
- SILVA, G.; COSTA, J.; FILHA, M.; LIMA, A.; SILVA, O. (2016). Enriquecimento proteico do resíduo de abacaxi mediante fermentação semissólida. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*. 11. 39. 10.18378/rvads.v11i5.4665.
- SOUSA, A.; CAMPOS, A.; GOMES, J.; SANTANA, R.; SILVA, A.; MACEDO, A.; COSTA, J. (2020). Protein enrichment of jackfruit peel waste through solid-state fermentation. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*. 15. 1-6. 10.5039/agraria.v15i1a6406.
- SOUZA, R. F. et al. Análise econômica no cultivo da mandioca. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 9, n. 2, p. 345-354, 2014.
- TIRONI, L. F. et al. *Ecofisiologia da Mandioca Visando Altas Produtividades*. 1. ed. Santa Maria: Ed. GR, 2019. p.136
- TOKARNIA, C. H. et al. *Plantas tóxicas do Brasil*. Rio de Janeiro: Helianthus, 2000. p. 215-221.
- VALENTE, Ériton Egidio Lisboa. Suplementação de bovinos de corte em pastejo com diferentes relações proteína: carboidrato da fase de amamentação ao abate. 2012. 131 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa.
- VENDRUSCOLO, F.; RIBEIRO, C.; ESPOSITO, E.; NINOW, J. (2008). Protein Enrichment of Apple Pomace and Use in Feed for Nile Tilapia. *Applied biochemistry and biotechnology*. 152. 74-87. 10.1007/s12010-008-8259-3.
- VETTER, J. Plant cyanogenic glycosides. *Toxicon*, v. 38, p. 11-36, 2000.
- VILHALVA, Divina Aparecida Anunciação et al. Secagem convencional de casca de mandioca proveniente de resíduos de indústria de amido. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 42, p. 331-339, 2012.
- YE, Y., CAI, Y., WANG, F., HE, Y., YANG, Y., GUO, Z., LIU, M., REN, H., WANG, S., LIU, D., XU, J., & WANG, Z. (2025). Industrial Microbial Technologies for Feed Protein Production from Non-Protein Nitrogen. *Microorganisms*, 13(4), 742. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13040742>

CAPÍTULO I: TÉCNICAS DE FERMENTAÇÃO PARA O ENRIQUECIMENTO PROTEICO DA CASCA DE MANDIOCA

1. Introdução

A casca de mandioca (CM) é um alimento que pode ser utilizado como substituto total ou parcial do milho em sistemas de produção animal, devido a sua concentração de amido (48 a 56,10%; Marques *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2015). Sua utilização tem como objetivo reduzir os custos com alimentação, mas também diminuir a contaminação ambiental gerada com o descarte inadequado (Jumare *et al.*, 2024). Para cada tonelada de raiz processada, são gerados em média 220 kg e 350 kg de cascas, quando o processo é feito de forma manual ou mecanizada, respectivamente (Ikujenlola & Opawale, 2007). Esse derivado é composto pela casca, entrecasca e pontas de raiz e é gerado nos momentos iniciais do processamento (Rangel *et al.*, 2008).

A CM apresenta em média concentrações de matéria seca de 29,60%, matéria mineral de 16,80%, proteína bruta (PB) de 2,1% e fibra em detergente neutro de 52,10% (Gunun *et al.*, 2023). Como esse alimento possui elevada concentração de energia e baixa PB, pesquisadores têm focado na utilização da CM como substrato para o cultivo de microrganismos com objetivo de aumentar seu valor nutricional, principalmente pelo incremento de proteína microbiana, visando substituição parcial de ingredientes convencionais como o farelo de soja (Boonnop *et al.*, 2009; Oboh, 2006; Polyorach *et al.*, 2013).

Essa proteína microbiana, também conhecida como proteína de célula única do inglês (Single Cell Protein; SCP), é definida como células secas de fungos, bactérias, leveduras e algas (Nasseri *et al.*, 2011; Sharif *et al.*, 2021). Tais células podem ser cultivadas em uma variedade de substratos, como bagaço de frutas, cascas de vegetais, farelos, palhas, palma forrageira entre outros (Abedfar *et al.*, 2025; Ruslan *et al.*, 2023).

O enriquecimento de chips de mandioca (raiz desidratada) utilizando uma metodologia combinada de fermentação em estado sólido (FES), e em estado líquido/submersa (FEL; Nadar *et al.*, 2024; Subramaniam & Vimala, 2012) resultou em um incremento de 10x no teor de proteína inicial do substrato (Boonnop *et al.*, 2009). Polyorach *et al.* (2013) encontraram teores de proteína bruta entre 33 e 47,5% na matéria seca utilizando FEL e FES na raiz de mandioca desidratada enriquecida.

Quando avaliada em dietas para caprinos, foi observado que a casca de mandioca enriquecida pode substituir 50% do concentrado em dietas com 14% de PB sem afetar a utilização dos nutrientes e o desempenho produtivo (Gunun *et al.*, 2023). Boonnop *et al.* (2010) observaram que a substituição total do farelo de soja pela raiz de mandioca enriquecida com levedura e ureia (30% PB) em dietas para bezerras leiteiras melhorou a eficiência de fermentação ruminal e a síntese de proteína microbiana, bem como a utilização dos nutrientes.

Apesar do grande potencial da técnica de enriquecimento proteico e da sua utilização, existem poucas informações sobre a composição das frações da proteína ao final do processo. Além disso, a falta de padronização e reprodutibilidade do produto são desafios notórios, visto que os resultados observados na literatura apresentam grande variação. Nesse contexto, o ajuste das proporções dos ingredientes e do método de fermentação podem ser estratégias eficazes para reduzir custos e manter o teor proteico do alimento.

Nesse contexto, hipotetizou-se que os diferentes métodos de enriquecimento da casca de mandioca alteram as concentrações de proteína bruta e diferem em relação ao custo. Objetivou-se avaliar o efeito da aeração, correção do pH, inoculação com levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) e dose de ureia, no enriquecimento por fermentação mista da casca de mandioca, de modo a conseguir elevar a sua concentração proteica.

2. Material e métodos

Foram realizados dois experimentos para avaliar o enriquecimento por fermentação mista com levedura da CM. No experimento 1, foram estudados os efeitos da aeração e correção do pH. O experimento 2 avaliou o impacto da inoculação com levedura e da quantidade de ureia no processo de enriquecimento, que foi conduzido sem aeração e correção de pH.

2.1. Local do experimento

O experimento foi conduzido no setor de Zootecnia da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), localizado em Belém, Pará (1°27'13.8"S 48°26'00.3"W). A área insere-se no bioma Amazônico, apresentando temperatura média anual em torno de 28°C. As condições climáticas gerais (quente e úmido) classificam a região como clima tropical tipo Af de Köppen (Köppen, 1918; Santiago *et al.*, 2011). As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Nutrição Animal (LABNUTAN) da UFRA, campus Belém.

2.2. Delineamento Experimental

Experimento 1

O experimento utilizou um delineamento inteiramente casualizado (DIC) arranjado em esquema fatorial 2×2. O primeiro fator foi (A) aeração (com e sem aeração) e o segundo fator (C), a correção do pH (corrigido para 4,5 e sem correção – pH de 5,3). Foram utilizadas 6 repetições, totalizando 24 unidades experimentais.

Experimento 2

O experimento utilizou um delineamento inteiramente casualizado (DIC) arranjado em esquema fatorial 2×2. O primeiro fator foi (L), inoculação com levedura, com os níveis “sem inoculação” e “inoculado” (50g/kg CM), e o segundo fator (U), a dose de ureia (120g/kg CM e 60 g/kg CM), ambas com base na matéria natural. Foram utilizadas 6 repetições, totalizando 24 unidades experimentais.

2.3. Aquisição dos ingredientes

Para a realização deste experimento, os ingredientes foram adquiridos em diferentes estabelecimentos comerciais. A CM foi obtida em um estabelecimento local no município de Santa Maria do Pará, PA.

Para o enriquecimento proteico do substrato, foram utilizados levedura, ureia, açúcar refinado e melaço. A levedura (Levedura Seca Instantânea, da Angel Yeast (Egypt) Co., Ltd), o açúcar refinado e a ureia foram adquiridos em comércios locais de Belém, PA.

2.4. Processo de enriquecimento

Experimento 1

A preparação da CM enriquecida foi realizada por meio do método descrito por Boonnop *et al.* (2009) e Polyorach *et al.* (2013), que consiste em uma fermentação mista: a primeira etapa em FEL e a segunda em FES.

O processo de enriquecimento necessita da preparação de duas soluções distintas: Solução A e Solução B.

Para o preparo da Solução A, 50g de levedura e 50g de açúcar foram pesados em um béquer, onde se adicionaram 250mL de água destilada. A mistura foi homogeneizada

e incubada à temperatura ambiente por 1 hora, permitindo a ativação das células de levedura.

Em seguida, preparou-se o meio de fermentação (Solução B). Para isso, 60g de melaço foram pesados em um béquer e dissolvidos em 250mL de água destilada. Adicionaram-se 120g de ureia e ajustou-se o pH das repetições dos tratamentos com correção para 4,5, utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4). Após a preparação do meio, a Solução A foi misturada à Solução B na proporção de 1:1 em baldes plásticos de 5L. As repetições referentes ao tratamento com aeração foram então aeradas por 60 horas, utilizando uma bomba de ar para garantir oxigenação adequada.

Após 60 horas de fermentação, a solução final foi aplicada a 1kg de casca de mandioca na proporção de 1:2 com o auxílio de um pulverizador. A CM foi disposta em uma bandeja de papelão revestida com lona, com as dimensões de 50×50 cm. A mistura foi então submetida à secagem, inicialmente à sombra por 72 horas, seguida de secagem ao sol por 48 horas.

Cada bandeja de papelão representou uma unidade experimental, sendo esta composta por 1 kg de CM a qual foi aplicada 500mL de solução final.

Experimento 2

A preparação da CM enriquecida foi realizada por meio do método descrito por Boonnop *et al.* (2009) e Polyorach *et al.* (2013), que consiste em uma fermentação mista: a primeira etapa em FEL e a segunda em FES.

O processo de enriquecimento necessitou da preparação de duas soluções distintas: Solução A e Solução B.

Para os tratamentos que incluíram levedura, o preparo da Solução A envolveu a pesagem de 50g de levedura e 50g de açúcar em um béquer, onde se adicionaram 250mL de água destilada. A mistura foi homogeneizada e incubada à temperatura ambiente por 1 hora, permitindo a ativação das células de levedura.

Em seguida, preparou-se o meio de fermentação (Solução B). Para isso, 60g de melaço foram pesados em um béquer e dissolvidos em 250mL de água destilada. Adicionou-se a ureia nas doses específicas de cada tratamento (120g/kg CM ou 60 g/kg CM), sem ajuste de pH. Após a preparação do meio, a Solução A (conforme os tratamentos com levedura) foi misturada à Solução B na proporção de 1:1 em baldes plásticos de 5L. As misturas foram mantidas em fermentação sem aeração por 60 horas.

Após 60 horas de fermentação, a solução foi aplicada a 1kg de CM na proporção de 1:2 com o auxílio de um pulverizador. A CM foi disposta em uma bandeja de papelão revestida com lona, com as dimensões de 50×50 cm. A mistura foi então submetida à secagem, inicialmente à sombra por 72 horas, seguida de secagem ao sol por 48 horas.

Cada bandeja de papelão representa uma unidade experimental, sendo esta composta por 1 kg de CM a qual foi aplicada 500mL de solução final.

2.5. Caracterização da Matéria-Prima

Antes do processo de enriquecimento, 300g da CM *in natura* foram coletados e armazenados em freezer a -20°C para análise de sua composição química. A caracterização completa dessa matéria-prima é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química e fracionamento de proteínas da casca de mandioca *in natura*.

Variável	Casca de mandioca
Matéria seca (MS), g/kg Matéria natural	309,72
	g/kg MS
Matéria mineral (MM)	71,52
Proteína bruta (PB)	46,89
Extrato etéreo (EE)	5,86
Fibra em detergente neutro (FDN)	178,87
Fibra em detergente ácido (FDA)	124,89
Carboidratos não fibrosos (CNF)	696,8
	Fracionamento da proteína bruta, %PB
A	54,65
B1+B2	20,43
B3	14,66
C	10,26

A: Nitrogênio não proteico (NNP); B1+B2: Proteína solúvel; B3: Proteína ligada ao FDN; C: Proteína ligada ao FDA.

2.6. Análises Laboratoriais

Ao final do processo de secagem todo o material presente nas bandejas foi armazenado em freezer a -20°C. Para análise de sua composição química, as amostras foram descongeladas em temperatura ambiente, pesadas e submetidas à pré-secagem em estufa de circulação forçada de ar por 72 h a 55°C, sendo posteriormente moídas em moinho de faca tipo Willey, com peneira com crivo de 1 mm de diâmetro.

Para a caracterização das cascas enriquecidas, foram determinados os teores de: MS, MM, PB, descritas por Detmann *et al.* (2021) pelos métodos INCT-CA (MS – método

G-003/1; MM – método M-001/2; PB – método N-001/2). Os teores de EE foram determinados pelo método AOCS Am 5-04 (Firestone, 2009).

Os teores FDN e FDA, foram determinadas segundo metodologia de Van Soest *et al.* (1991), descritas por Detmann *et al.* (2021) pelos métodos INCT-CA (FDN – método F-002/2; FDA – método F-004/2). Os CNF das silagens foram calculados conforme a seguinte fórmula:

$$\text{CNF} = 100 - (\text{PB} + \text{EE} + \text{FDN} + \text{MM}).$$

Para o cálculo do fracionamento de proteínas, foram seguidas as recomendações de Licitra *et al.* (1996). A fração A foi obtida através da diferença entre o teor de N-total e o teor de N-insolúvel no TCA (Sniffen *et al.*, 1992).

A fração B1+B2 foi calculada pela fórmula $B1+B2 = \%N\text{-insolúvelTCA} - \%NIDN$ (nitrogênio insolúvel em detergente neutro) (Sniffen *et al.*, 1992). A fração B3 foi calculada pela diferença entre o %NIDN e a %NIDA (nitrogênio insolúvel em detergente ácido) e, a fração C foi considerada como sendo a %NIDA (Sniffen *et al.*, 1992).

2.7. Análise Estatística

Experimento 1

Os dados foram inicialmente testados para verificar a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk. Em seguida, as variáveis foram submetidas à análise de variância, e o modelo estatístico incluiu os efeitos fixos de Aeração, Correção do pH e a interação Aeração×Correção do pH. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, considerando um nível de significância de 0,05 para o erro tipo I. Todas as variáveis foram analisadas utilizando o procedimento GLIMMIX do pacote estatístico Statistical Analysis System (SAS, 2022).

O modelo estatístico utilizado para as análises está descrito na equação (1):

$$(1) \quad Y_{ijk} = \mu + A_i + C_j + (A \times C)_{ij} + \varepsilon_{ijk};$$

Em que:

- Y_{ijk} é o valor observado na parcela experimental que recebeu o nível i do fator A e o nível j do fator C na repetição k ;
- μ é a média geral de cada tratamento;
- A_i é o efeito da aeração no nível i ;
- C_j efeito da correção de pH no nível j ;
- $(A \times C)_{ij}$, efeito da interação entre os fatores aeração e correção de pH;
- ε_{ijk} é o erro aleatório associado a cada observação.

Experimento 2

Os dados foram inicialmente testados para verificar a normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk. Em seguida, as variáveis foram submetidas à análise de variância, e o modelo estatístico incluiu os efeitos fixos de Levedura, Ureia e a interação Levedura×Ureia. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, considerando um nível de significância de 0,05 para o erro tipo I. Todas as variáveis foram analisadas utilizando o procedimento GLIMMIX do pacote estatístico Statistical Analysis System (SAS, 2022).

O modelo estatístico utilizado para as análises está descrito na equação (2):

$$(2) \quad Y_{ijk} = \mu + Li + Uj + (L \times U)_{ij} + \varepsilon_{ijk};$$

Em que:

- Y_{ijk} é o valor observado na parcela experimental que recebeu o nível i do fator L e o nível j do fator U na repetição k ;
- μ é a média geral de cada tratamento;
- Li é o efeito da levedura no nível i ;
- Uj efeito da dose de ureia no nível j ;
- $(L \times U)_{ij}$, efeito da interação entre os fatores levedura e dose de ureia;
- ε_{ijk} é o erro aleatório associado a cada observação.

2.8. Análise de Custo

A análise dos custos foi realizada de forma direta para ambos os experimentos, considerando exclusivamente os preços de aquisição dos ingredientes na região utilizados no processo de fermentação mista. Tal avaliação teve como objetivo a comparação dos custos entre os diferentes tratamentos experimentais, sem incluir despesas com mão de obra ou outros custos operacionais. Para tanto, foram considerados os seguintes valores por quilo: o preço da ureia foi de R\$ 6,00 (seis reais); a casca de mandioca por R\$ 0,20 (vinte centavos), o açúcar R\$ 4,19 (quatro reais e dezenove centavos), o melaço de cana por R\$ 4,00 (quatro reais e a levedura por R\$ 3,10 (Três reais e dez centavos). O custo final de cada unidade experimental foi alcançado pela somatória da multiplicação da quantidade utilizada de cada insumo pelo seu preço por quilo.

2.9. Análise de Rendimento

Para a quantificação da eficiência de recuperação de massa após os processos sequenciais de enriquecimento e secagem, foi determinado o Rendimento em Massa Recuperada. O cálculo consiste na razão entre a massa final do material parcialmente seco (obtida ao final do processo de secagem ao sol) e a massa inicial do material *in natura* após aplicação das soluções no início do processo de enriquecimento.

3. Resultados

Experimento 1

Como é possível observar na tabela 2, houve interação ($P < 0,05$) A×C apenas para as variáveis MM e EE. Quando foi feita a aeração, a CM tratada com a solução que teve o pH corrigido apresentou maior teor de MM em relação a CM tratada com a solução que não teve o pH corrigido. A correção do pH não influenciou no teor de MM quando a CM foi tratada com a solução que não foi aerada. Aerar ou não a solução que será aplicada na CM não altera o teor de MM, mesmo quando essa solução tem seu pH corrigido ou não.

Tabela 2. Composição química da casca de mandioca enriquecida por fermentação mista, sob diferentes níveis de aeração e de correção de pH.

Correção do pH	Aeração		Média	EPM	P-valor		
	Com	Sem			A	C	A×C
	MS g/kg			0,22	<0,01	0,28	0,90
Com	920,02	905,38	912,70				
Sem	916,16	902,35	909,26				
Média	918,09a	903,87b					
	MM g/kg MS			0,10	0,37	<0,01	<0,05
Com	64,62a	60,42ab	62,52				
Sem	55,30b	57,04b	56,17				
Média	59,96	58,73					
	PB g/kg MS			1,35	<0,01	0,80	0,20
Com	601,70	493,32	547,51				
Sem	569,18	515,06	542,12				
Média	585,44a	504,19b					
	FDN g/kg MS			0,45	<0,01	<0,05	0,13
Com	146,98	111,50	129,24a				
Sem	121,94	104,68	113,31b				
Média	134,46a	108,09b					
	FDA g/kg MS			0,38	<0,01	<0,05	0,20
Com	108,70	79,33	94,02a				
Sem	89,22	73,54	81,38b				
Média	98,96a	76,44b					
	EE g/kg MS			0,07	<0,01	<0,01	<0,01
Com	14,40a	11,42b	12,91				
Sem	14,32a	7,27c	10,79				

Média	14,36	9,34				
	CNF g/kg MS		1,69	<0,01	0,31	0,08
Com	177,33	330,20	253,77			
Sem	238,74	313,30	276,02			
Média	208,04b	321,75a				

EPM: erro padrão da média; A: fator aeração; C: fator correção de pH; A×C: interação entre os fatores.

O teor de EE não diferiu quando a CM foi tratada com a solução que foi aerada, independente se essa solução teve seu pH corrigido ou não. Quando as soluções não foram aeradas, a CM tratada com a solução que teve o pH corrigido apresentou maior teor de EE em relação a CM tratada com a solução que não teve o pH corrigido. Independente da correção de pH das soluções, as CM tratadas com as soluções aeradas apresentam maior teor de EE.

A aeração das soluções que foram aplicadas sobre a CM promoveu maiores ($P<0,05$) concentrações de MS, PB, FDN e FDA, enquanto promoveu um menor ($P<0,05$) teor de CNF em relação à CM enriquecida com soluções sem aeração.

A correção do pH das soluções que foram aplicadas sobre a CM, promoveu maiores ($P<0,05$) concentrações de FDN e FDA na CM enriquecida.

A Tabela 3 contém os resultados do fracionamento da proteína bruta da CM enriquecida. Houve interação ($P<0,05$) A×C apenas para a fração A. A correção do pH das soluções não alterou a fração A da CM enriquecida independente se essas soluções foram aeradas ou não. Quando o pH das soluções foi corrigido, a CM tratada com a solução aerada apresentou uma maior fração A em relação a CM tratada com a solução que não foi aerada. Independente se as soluções foram aeradas ou não, quando o pH das soluções não foi corrigido a fração A não diferiu.

Tabela 3. Fracionamento de proteínas da casca de mandioca enriquecida por fermentação mista, sob diferentes níveis de aeração e de correção de pH.

Correção do pH	Aeração			EPM	P-valor		
	Com	Sem	Média		A	C	A×C
	Fração A (%PB)			0,14	0,06	0,98	<0,01
Com	93,90a	92,79b	93,35				
Sem	93,24ab	93,45ab	93,35				
Média	93,57	93,12					
	Fração B1+B2 (%PB)			0,16	<0,05	0,34	0,06
Com	4,27	5,53	4,90				
Sem	5,04	5,27	5,16				
Média	4,66b	5,40a					
	Fração B3 (%PB)			0,04	0,14	0,37	0,18

Com	1,11	1,10	1,11
Sem	1,15	0,90	1,03
Média	1,13	1,00	
Fração C (%PB)			0,04 <0,05 0,39 1,00
Com	0,83	0,63	0,73
Sem	0,76	0,57	0,67
Média	0,79a	0,60b	

EPM: erro padrão da média; A: fator aeração; C: fator correção de pH; A×C: interação entre os fatores. A: Nitrogênio não proteico (NNP); B1+B2: Proteína solúvel; B3: Proteína ligada ao FDN; C: Proteína ligada ao FDA.

A maior ($P<0,05$) média da Fração B1+B2 ocorreu nas CM que foram tratadas com as soluções que não foram aeradas, enquanto a maior ($P<0,05$) média da Fração C foi encontrada nas CM tratadas com as soluções que foram aeradas. A Fração B3, não foi afetada ($P>0,05$) pela correção de pH nem pela aeração.

Com relação ao rendimento e aos custos de produção, na tabela 4 é possível observar que houve interação ($P<0,05$) A×C no rendimento em massa recuperada (RMR) e no custo por quilograma de matéria seca.

A aeração das soluções que foram aplicadas nas CM não alterou o RMR, independente se essas soluções tiveram o pH corrigido ou não. Quando o pH das soluções foi corrigido, a CM tratada com a solução que não foi aerada apresentou um maior RMR em relação a CM tratada com a solução que foi aerada. Independente se a solução foi aerada ou não, quando o pH das soluções não foi corrigido, o RMR não diferiu.

Tabela 4. Rendimento em massa recuperada e custos de produção por quilograma de matéria seca e proteína bruta da casca de mandioca enriquecida por fermentação mista, em função dos níveis de aeração e correção de pH.

Correção do pH	Aeração			P-valor			
	Com	Sem	Média	EPM	A	C	A×C
	RMR (%)			0,34	<0,01	0,14	<0,05
Com	32,56b	35,24a	33,90				
Sem	34,46ab	34,84a	34,65				
Média	33,51	35,04					
	Custo MS (R\$/kg MS)			0,04	<0,05	0,10	<0,01
Com	4,01a	3,71b	3,86				
Sem	3,75b	3,79b	3,77				
Média	3,88	3,75					
	Custo PB (R\$/kg PB)			0,19	<0,05	0,95	0,55
Com	6,43	7,46	6,94				
Sem	6,63	7,22	6,92				
Média	6,53b	7,34a					

EPM: erro padrão da média; A: fator aeração; C: fator correção de pH; A×C: interação entre os fatores.

Quando foi feita a aeração das soluções, a CM tratada com a solução que teve o pH corrigido apresentou maior custo MS em relação a CM tratada com a solução que não teve o pH corrigido. O custo MS não diferiu quando a CM tratada com a solução que não foi aerada, independente se a solução teve o pH corrigido ou não. Quando o pH das soluções foi corrigido a CM tratada com a solução que foi aerada teve um maior custo MS em relação a CM tratada com a solução que não foi aerada. A aeração das soluções não alterou o custo MS quando o pH da solução não foi corrigido.

A maior ($P<0,05$) média de custo PB ocorreu na CM tratada com a solução que não foi aerada apresentou uma média de custo mais elevada.

Experimento 2

Como é possível observar na tabela 5, houve interação ($P<0,05$) L×U apenas para a MS. Quando foi feita a inoculação da solução com levedura, a CM tratada com a solução que possuía menor dose de ureia apresentou um teor de MS maior em relação a CM tratada com a solução que possuía maior dose de ureia.

Tabela 5. Composição química da casca de mandioca enriquecida por fermentação mista, em função do uso de levedura e de doses de ureia.

Dose de ureia	Levedura		Média	EPM	P-valor		
	Com	Sem			L	U	L×U
		MS g/kg		0,27	<0,01	<0,05	<0,01
120 g/kg Casca	895,44b	880,85c	888,15				
60 g/kg Casca	907,62a	879,58c	893,6				
Média	901,53	880,22					
		MM g/kg MS		0,11	<0,01	<0,05	0,6
120 g/kg Casca	53,97	47,08	50,52b				
60 g/kg Casca	58,20	49,90	54,05a				
Média	56,08a	48,49b					
		PB g/kg MS		1,76	<0,05	<0,01	0,38
120 g/kg Casca	488,98	460,43	474,71a				
60 g/kg Casca	355,85	299,45	327,65b				
Média	422,42a	379,94b					
		FDN g/kg MS		0,26	<0,01	0,85	0,72
120 g/kg Casca	137,24	121,97	129,60				
60 g/kg Casca	139,40	121,26	130,03				
Média	138,32a	121,61b					
		FDA g/kg MS		0,18	<0,01	<0,05	0,33
120 g/kg Casca	89,74	84,22	86,98b				
60 g/kg Casca	99,80	85,50	94,18a				

Média	94,77a	86,39b				
	EE g/kg MS		0,04	0,11	<0,01	0,26
120 g/kg Casca	8,42	6,70	7,56b			
60 g/kg Casca	9,58	9,26	9,42a			
Média	9,00	7,98				
	CNF g/kg MS		1,71	<0,01	<0,01	0,18
120 g/kg Casca	316,87	363,08	339,98b			
60 g/kg Casca	432,52	517,80	475,16a			
Média	374,69b	440,44a				

EPM: erro padrão da média; L: fator levedura; U: fator dose de ureia; L×U: interação entre os fatores.

A MS da CM tratada com a solução que não foi inoculada com levedura não diferiu, independente se a solução possuía maior ou menor dose de ureia. Independente da dose de ureia que foi aplicada na CM, a MS foi maior nas CM tratadas com as soluções inoculadas em relação as CM tratadas com as soluções que não foram inoculadas.

Houve efeito ($P<0,05$) da Levedura para a MM, FDN, FDA, CNF e PB. A inclusão da levedura nas soluções que foram aplicadas sobre a CM promoveu maiores concentrações de MM, FDN, FDA e PB e um menor teor de CNF em comparação à CM enriquecida sem a utilização de levedura.

A solução que recebeu 120 g/kg de ureia promoveu uma maior ($P<0,05$) concentração de PB na CM enriquecida e menores teores de MM, FDA, EE e CNF.

Na Tabela 6 é possível observar que nenhum dos resultados do fracionamento da proteína bruta da CM enriquecida apresentou interação ($P>0,05$).

Tabela 6. Fracionamento de proteínas da casca de mandioca enriquecida por fermentação mista, em função do uso de levedura e de doses de ureia.

Dose de ureia	Levedura		Média	EPM	P-valor		
	Com	Sem			L	U	L×U
	Fração A (%PB)			0,43	<0,01	<0,01	0,10
120 g/kg Casca	92,92	95,01	93,99a				
60 g/kg Casca	89,79	92,56	91,18b				
Média	91,35b	93,82a					
	Fração B1+B2 (%PB)			0,32	<0,01	<0,01	0,92
120 g/kg Casca	5,42	3,43	4,42b				
60 g/kg Casca	7,28	5,23	6,26a				
Média	6,35a	4,33b					
	Fração B3 (%PB)			0,12	0,06	<0,05	0,38
120 g/kg Casca	0,91	0,70	0,80b				
60 g/kg Casca	1,64	1,08	1,36a				
Média	1,27	0,89					

	Fração C (%PB)			0,05	0,13	<0,01	0,57
120 g/kg Casca	0,83	0,70	0,76b				
60 g/kg Casca	1,18	1,12	1,15a				
Média	1,00	0,91					

EPM: erro padrão da média; L: fator levedura; U: fator dose de ureia; L×U: interação entre os fatores. A: Nitrogênio não proteico (NNP); B1+B2: Proteína solúvel; B3: Proteína ligada ao FDN; C: Proteína ligada ao FDA.

A maior ($P<0,05$) Fração A ocorreu nas CM tratadas com as soluções que não foram inoculadas com levedura, enquanto a maior ($P<0,05$) Fração B1+B2, foi observada nas CM tratadas com as soluções que foram inoculadas.

A Dose de ureia influenciou ($P<0,05$) as Frações A, B1+B2, B3 e C. Com exceção da fração A, as demais frações foram maiores nas CM que foram tratadas com as soluções que possuíam menor dose de ureia.

Em relação ao rendimento em massa recuperada e aos custos de produção, na tabela 7 é possível observar que houve interação ($P<0,05$) L×U para o rendimento e para o custo do quilograma de matéria seca.

Quando foi feita inoculação da solução com levedura, a CM tratada com a solução que possuía maior dose de ureia apresentou maior RMR em relação a CM tratada com a solução que possuía menor dose de ureia. Independente se a solução possuía maior ou menor dose de ureia utilizada, o RMR não diferiu quando a solução não foi inoculada.

A inoculação da solução com levedura não influenciou o RMR quando a CM foi tratada com a solução que possuía a maior dose de ureia. Quando a CM foi tratada com a solução que possuía a menor dose de ureia o RMR foi maior na CM tratada com a solução que não foi inoculada, em relação a CM tratada com a solução que foi inoculada.

Independente da inoculação das soluções com levedura, os maiores custos MS foram observados nas CM tratadas com a solução que possuía maior dose de ureia em relação as CM tratada com a solução que possuía menor dose de ureia.

Independente da dose de ureia utilizada no preparo das soluções, os maiores custos MS foram observados nas CM tratadas com as soluções que foram inoculadas com levedura em relação as CM tratadas com as soluções que não foram inoculadas.

Tabela 7. Rendimento em massa recuperada e custos de produção por quilograma de matéria seca e proteína bruta da casca de mandioca enriquecida por fermentação mista, em função do uso de levedura e de doses de ureia.

Dose de ureia	Levedura				P-valor		
	Com	Sem	Média	EPM	L	U	L×U

	RMR (%)			0,29	<0,01	<0,01	<0,01
120 g/kg Casca	33,28a	33,79a	33,54				
60 g/kg Casca	31,03b	33,24a	32,14				
Média	32,16	33,52					
	Custo MS (R\$/kg MS)			0,12	<0,01	<0,01	<0,05
120 g/kg Casca	4,01a	3,60b	3,80				
60 g/kg Casca	3,23c	2,72d	2,98				
Média	3,62	3,16					
	Custo PB (R\$/kg PB)			0,18	0,33	<0,01	0,32
120 g/kg Casca	8,26	7,69	7,97b				
60 g/kg Casca	8,94	8,94	8,94a				
Média	8,60	8,31					

EPM: erro padrão da média; L: fator levedura; U: fator dose de ureia; L×U: interação entre os fatores.

Já para o custo PB, houve efeito ($P<0,05$) apenas para a dose de ureia, onde é possível observar que as CM tratadas com as soluções que possuíam menor dose de ureia apresentaram uma média de custo mais elevada.

4. Discussão

Os resultados deste estudo destacam que o processo de enriquecimento por fermentação mista é capaz de aumentar a concentração de proteína bruta da casca de mandioca. No entanto, esse processo acarreta mudanças significativas nos demais nutrientes do material, influenciando sua composição final.

O aumento do teor de MS está diretamente associado ao processo de desidratação ao qual as cascas de mandioca enriquecidas de ambos os experimentos foram submetidas, no entanto, no experimento 1 foi observado que as CM tratadas com a solução que foi aerada apresentaram o maior teor de MS, o mecanismo utilizado para a aeração é chamado de “bubbler”, a saída de ar ficava no fundo do recipiente e passava por um difusor que propiciava a aparição de bolhas e esse processo pode ter influenciado na evaporação de parte da solução final que seria aplicada na casca de mandioca. Abdelrahman & Boyd (2018) fizeram um estudo a respeito do efeito do uso de aeradores mecânicos sobre a taxa de evaporação e relataram um aumento de 92% na evaporação dos tanques aerados. Helfer *et al.* (2012) avaliaram o mecanismo bubbler e observaram uma maior evaporação da água se comparado a não aeração, além disso a evaporação é proporcional a vazão de ar utilizada.

Em relação ao experimento 2, é possível perceber que quando a levedura não é adicionada na solução, a MS é menor, isso pode ser justificado pela menor quantidade de sólidos totais presentes na solução. O mesmo comportamento ocorreu no trabalho de Oboh (2006) que testou a fermentação da casca de mandioca com diferentes microrganismos, as cascas inoculadas com levedura apresentaram uma maior MS (93,6%), enquanto as que foram fermentadas sem nenhuma inoculação apresentaram um teor de 94,3% de MS.

Os teores de MS observados no experimento 2 podem estar associados à ureia, visto que esta possui característica higroscópica, dessa forma é possível que a maior dose de ureia tenha contribuído para reter mais umidade na casca, desacelerando a desidratação ou absorvendo umidade do meio contribuindo para uma MS mais baixa nessas cascas. Werner (1937) demonstrou que a ureia pode adquirir propriedades higroscópicas e absorver mais de 100% do seu próprio peso em água. Polyorach *et al.* (2013) testou diferentes doses de ureia e observou menores concentrações de MS nas cascas enriquecidas que receberam uma maior dose de ureia.

Nenhuma solução do experimento 2 foi aerada e de forma geral apresentaram um teor de MS inferior as do experimento 1, o que também demonstra como a aeração colabora com a evaporação.

A MM foi observada em maior quantidade na CM tratada com a solução que foi aerada e que teve seu pH corrigido. Esse ambiente é mais propício para o crescimento das leveduras, desta forma o incremento na MM pode estar associado ao consumo da matéria orgânica (MO), principalmente os carboidratos não fibrosos, e ao consumo do nitrogênio amoniacal, fontes de carbono e nitrogênio para as leveduras, respectivamente. Entretanto a concentração de MM encontrada nesse estudo é superior a documentada por Polyorach *et al.* (2013).

Em relação ao experimento 2, a MM foi influenciada por ambos os fatores de forma isolada, sendo encontrada em maior quantidade na CM tratada com a solução que foi inoculada com levedura, resultado que também pode ser atribuído pelo consumo da MO, entretanto Polyorach *et al.* (2017) realizaram o enriquecimento da raiz de mandioca sem aeração e observaram o comportamento oposto, a MM reduziu quando casca foi inoculada com microrganismos, entretanto, esse comportamento não foi debatido.

Em relação ao fator Dose de Ureia, as CM tratadas com a solução que possuía maior dose de ureia apresentaram um menor teor de MM, é possível que esse comportamento tenha ocorrido devido à maior umidade nessas cascas que favoreceu a lixiviação dos

minerais. O mesmo comportamento foi observado no trabalho de Polyorach *et al.* (2013), porém não foi discutido.

O incremento na PB pode ser justificado pela adição da ureia e pelo crescimento das leveduras. Em ambos os experimentos, a adição da ureia foi a principal responsável pela elevação do teor de PB da casca de mandioca em relação ao material original.

No experimento 1 à medida que as leveduras consumiram os CNF, ocorreu a multiplicação das células e um maior aporte proteico a partir dessa biomassa. A *Saccharomyces cerevisiae* tem a capacidade de usar como substrato para seu crescimento fontes de carbono como glicose, maltose, frutose, sacarose, galactose e rafinose (Que *et al.*, 2024). O maior teor de FDN e FDA nessas cascas não significam diretamente maior quantidade de fibras, à medida que os CNF são consumidos ocorre um aumento proporcional dos componentes fibrosos.

Nas CM tratadas com a solução que foram aeradas, esses resultados podem ser explicados pelo metabolismo das leveduras, visto que quando essas realizam respiração aeróbica são produzidos 18 ATP a partir de uma molécula de glicose enquanto à fermentação produz 2 ATP por molécula de glicose, o que impulsiona um maior desenvolvimento de biomassa microbiana (Olivares-Marin *et al.*, 2018). Pilajun & Wanapat (2016) observaram o mesmo comportamento ao enriquecer polpa de mandioca com leveduras, melaço e ureia, entretanto, com um menor teor de proteína bruta, apenas 133 g/kg MS, cerca de 4 vezes menos que o resultado obtido no presente estudo.

No experimento 2, a concentração de PB foi afetada por ambos os fatores de forma isolada. Em relação ao fator Levedura, o menor teor ocorreu nas CM tratadas com as soluções que não foram inoculadas com levedura, essa diferença pode ser atribuída ao incremento proteico das 50 gramas de leveduras que são adicionadas em cada casca e a ausência de crescimento da biomassa microbiana. Esse comportamento ocorreu no trabalho de Polyorach *et al.* (2017), que enriqueceu raiz de mandioca sem aeração e registrou um teor de 35 g/kg MS de PB nos chips não inoculados, resultado aproximadamente 11 vezes inferior ao obtido no presente estudo

O maior teor de PB ocorreu nas cascas de mandioca que receberam a maior dose de ureia, esse resultado pode ser explicado pelo maior equivalente proteico relacionado a maior dose de ureia. Entretanto, o resultado nas cascas enriquecidas com a menor dose de ureia foi semelhante ao encontrado por Boonnop *et al.* (2009), que fizeram o enriquecimento com aeração de chips de mandioca com 120g de ureia por quilo de chips de mandioca e relataram um teor 325 g/kg MS de PB. E semelhante ao resultado relatado

por Polyorach *et al.* (2017), que enriqueceu chips de mandioca sem aeração com 215 g de ureia por quilo de chips de mandioca e observaram um resultado de 421 g/kg MS de PB.

A ureia é um composto orgânico com alta concentração de nitrogênio (46%), destaca-se como a fonte mais comum de nitrogênio não proteico (NNP) na alimentação animal, valorizada por seu baixo custo e elevado equivalente proteico (281%) (Castañeda-Serrano *et al.*, 2013).

A maior concentração de EE foi observada nas CM tratada com a solução que foi aerada e teve o seu pH corrigido. De forma similar ao que foi observado para MM, essa maior concentração pode estar relacionada a um aumento proporcional ao consumo dos CNF ou ao próprio aumento da biomassa. A membrana plasmática das leveduras é composta principalmente por lipídios e proteínas (Stewart, 2017). O ergosterol é o principal esterol que compõe a membrana plasmática é essencial para o crescimento e desenvolvimento das leveduras, além de estar associado à sua adaptação aos estresses ambientais (Hu *et al.*, 2017). A produção de ergosterol é um processo dependente de oxigênio (Dupont *et al.*, 2011). Polyorach *et al.* (2013), realizou o enriquecimento de chips de mandioca nas mesmas condições descritas no experimento 1 e observou uma concentração de EE de 73 g/kg MS. Polyorach *et al.* (2017), realizou o enriquecimento de chips de mandioca sem aeração e correção de pH e observou uma concentração de EE de 53 g/kg MS.

No Experimento 2, a menor concentração de EE ocorreu nas CM tratadas com as soluções que possuíam maior dose de ureia, o que pode ser atribuído a um efeito de diluição, causada pelo maior teor de PB nessas cascas, entretanto esse comportamento é diferente do observado no estudo de Polyorach *et al.* (2017), onde o teor de EE aumenta conforme as doses de ureia aumentam.

No experimento 1 a maior Fração A ocorreu na CM tratada com a solução aerada e que teve seu pH corrigido, as condições ambientais mais favoráveis contribuíram para um maior crescimento das leveduras e esse crescimento contribuiu para diminuição das fontes de NNP, mas promoveu o incremento de proteína microbiana que pode ser contabilizada nessa fração. A Fração A, que representa o nitrogênio não proteico (NNP), inclui a ureia residual, as formas amoniacaís (NH_3 e NH_4^+), e pode englobar também aminoácidos livres e pequenos peptídeos (Licitra *et al.*, 1996).

No experimento 2 a menor média de fração A ocorreu nas CM tratadas com a solução inoculada com levedura, essa menor concentração pode refletir o consumo das

fontes de nitrogênio pelas leveduras, entretanto diferente do experimento 1, a falta de um ambiente mais propício, pode ter ocasionado um menor desenvolvimento das leveduras, desta forma não compensando o consumo de NNP.

A menor concentração das frações B1+B2 nas CM tratadas com as soluções que foram aeradas pode ser justificada pela maior fração A nessas mesmas cascas, o que pode ter causado uma diluição nas demais frações.

A maior Fração B1+B2, foi observada nas CM tratadas com as soluções inoculadas com levedura e nas CM tratadas com as soluções que possuíam menor dose de ureia. Esse comportamento também pode ser justificado pelo efeito de diluição, visto que nessas mesmas cascas ocorreu uma menor Fração A.

Em relação às frações B3 e C do experimento 2, as menores médias foram observadas nas CM tratadas com as soluções que possuíam maior dose de ureia. Esses resultados podem estar relacionados pela quebra das ligações entre a lignina e a hemicelulose pela ação da amônia (NH₃).

Pamungkas *et al.* (2024) e Yuan *et al.* (2019) testaram pré-tratamentos com ureia e fermentação em resíduo de citronela e palha de arroz e observaram reduções no FDN, FDN e Lignina. Além da capacidade de romper as ligações do tipo ponte de hidrogênio da celulose aumentando a digestibilidade do material (Xu *et al.*, 2016).

As CM tratadas com a solução que foi aerada e que teve seu pH corrigido, apesar de terem apresentado o maior teor de MS, apresentaram também um maior custo por quilograma de MS, entretanto, essas mesmas cascas apresentaram um menor rendimento em massa recuperada, o que pode estar relacionado ao menor teor de CNF nessas cascas e que causa efeito direto na elevação dos custos desse produto.

No experimento 2, o padrão observado no experimento 1 não ocorreu, o maior custo foi observado nas cascas que apresentam menor teor de CNF, entretanto essas cascas não apresentaram o menor rendimento ou menor teor de MS.

Em relação ao custo por quilograma de PB, em ambos os experimentos foi possível observar relação direta do teor de proteína bruta com o custo, isso pode estar relacionado a eficiência do processo de fermentação mista e o resultado obtido deste processo, em que o menor custo ocorreu nas cascas que apresentaram um maior teor de PB.

Essa observação se torna ainda mais relevante quando consideramos o custo da proteína bruta da soja, que é frequentemente usada como referência. O preço da saca de farelo de soja é bastante variável, podendo custar entre R\$ 120,00 e R\$ 170,00 (ESALQ, 2025). Nesse cenário, o custo por quilograma de PB pode variar de R\$ 5,00 a R\$ 7,50.

Diante dessa flutuação, é possível perceber que em diferentes cenários econômicos é possível obter uma fonte de proteína alternativa a partir do enriquecimento proteico das cascas de mandioca.

5. Conclusão

O processo de enriquecimento é eficaz em elevar a concentração de proteína bruta da casca de mandioca através do equivalente proteico proveniente da ureia e através do crescimento das leveduras.

No processo de enriquecimento, a aeração é um fator mais impactante no crescimento das leveduras do que a correção do pH para 4,5, permitindo um maior incremento proteico. Por outro lado, no enriquecimento sem aeração, a dose de ureia tem maior impacto em relação à presença da levedura. É importante ressaltar que a utilização de leveduras promove um incremento de proteína verdadeira à casca.

Os processos de fermentação com condições mais favoráveis ao crescimento das leveduras foram os que apresentaram a maior produção de proteína e, consequentemente, o menor custo por quilograma de PB final. Entretanto, são necessários estudos mais aprofundados em relação à produção em escala e impactos no consumo e desempenho animal.

6. Referências

ABDELRAHMAN, H. AND BOYD, C. Effects of mechanical aeration on evaporation rate, water temperature. Global Aquaculture Advocate. 2018. [online] Available at: <https://www.aquaculturealliance.org/advocate/effects-mechanical-aeration-evaporation-rate-water-temperature/>

ABEDFAR, A.; ABBASZADEH, F.; MARDIHA, F. A Review on the Importance of Producing Single-Cell Protein (SCP) from Agricultural By-products and Waste. Chemical and Biomolecular Engineering. v. 10, p. 8-15, 2025. DOI: [10.11648/j.cbe.20251001.12](https://doi.org/10.11648/j.cbe.20251001.12).

AOAC. Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis. 16. ed. Washington, D.C., 1990. 1094 p.

ARAÚJO, L. F. *et al.* Enriquecimento proteico da palma forrageira com *Saccharomyces cerevisiae* para alimentação de ruminantes. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 60, n. 2, p. 401-407, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-09352008000200019>.

BOONNOP, K. *et al.* Enriching nutritive value of cassava root by yeast fermentation. *Scientia Agricola*, n.5, v.66, p. 629–633, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000500007>

BOONNOP, K.; WANAPAT, M.; NAVANUKRAW, C. (2010). Replacement of Soybean Meal by Yeast Fermented-Cassava Chip Protein (YEFECAP) in Concentrate Diets Fed on Rumen Fermentation, Microbial Population and Nutrient Digestibilities in Ruminants. *Journal of Animal and Veterinary Advances - J ANIM VET ADV.* 9. 1727-1734. 10.3923/javaa.2010.1727.1734.

BUTOLO, J. E. Leveduras vivas e termolizadas na alimentação animal. In: SIMPÓSIO SOBRE INGREDIENTES ALTERNATIVOS NA ALIMENTAÇÃO ANIMAL, Campinas. *Anais...* Campinas: Colégio Brasileiro de Nutrição Animal, 2001. p. 191-198.

CASTAÑEDA SERRANO, R. *et al.* Slow release urea in beef cattle diets: digestibility, microbial synthesis and rumen kinetic. *Agrociencia*, v. 47, p. 13-24, 2013.

DETMANN, E. *et al.* Métodos para análise de alimentos. 2. ed. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2021. 350 p.

DETMANN, E. *et al.* Métodos para análise de alimentos. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2012. 214 p.

DUPONT, S.; BENEY, L.; FERREIRA, T.; GERVAIS, P. Nature of sterols affects plasma membrane behavior and yeast survival during dehydration. *Biochimica et Biophysica Acta*, v. 1808, p. 1520-1528, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbamem.2010.11.012>.

ESALQ. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Centro de Estudos Avançados em Economia Agrícola. Mercado de trabalho do agronegócio brasileiro. 2023a. Boletim. Disponível em: [Soja - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada - CEPEA-Esalq/USP](#).

FIRESTONE, D. (Ed.). *Official methods and recommended practices of the AOCS*. 6. ed., 3. print. Urbana: AOCS, 2009.

GOMES, D. I. *et al.* Evaluation of lignin contents in tropical forages using different analytical methods and their correlations with degradation of insoluble fiber. *Animal Feed Science and Technology*, v. 168, p. 206-222, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.05.001>.

GUNUN, P.; CHERDTHONG, A.; KHEJORNART, P.; WANAPAT, M.; POLYORACH, S.; KAEWWONGSA, W.; GUNUN, N. (2023). Replacing Concentrate with Yeast-or EM-Fermented Cassava Peel (YFCP or EMFCP): Effects on the Feed Intake, Feed Digestibility, Rumen Fermentation, and Growth Performance of Goats. *Animals*. 13. 551. 10.3390/ani13040551.

HELPER, F.; LEMCKERT, C.; ZHANG, H. Influence of bubble plumes on evaporation from non-stratified waters. *Journal of Hydrology*, v. 438-439, p. 84-96, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.020>.

HU, Z.; HE, B.; MA, L.; SUN, Y.; NIU, Y.; ZENG, B. Recent advances in ergosterol biosynthesis and regulation mechanisms in *Saccharomyces cerevisiae*. *Indian Journal of Microbiology*, v. 57, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12088-017-0657-1>.

- IKUJENLOLA, A. V.; OPAWALE, B. O. Effects of processing on the yield and physico-chemical properties of cassava products. *Advanced Materials Research*, v. 18-19, p. 165-170, 2007. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.18-19.165>.
- JUMARE, F. I.; SALLEH, M.; IHSAN, N.; HUSSIN, H.. (2024). Cassava waste as an animal feed treatment: past and future. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 23. 1-30. 10.1007/s11157-024-09701-7.
- KARABASIL, N.; BOSKOVIC, T.; KILIBARDA, N.; ČOBANOVIĆ, N.; VIĆIĆ, I.; DIMITRIJEVIC, M. Sustainable meat production. *Meat Technology*, v. 64, p. 133-135, 2023. DOI: <https://doi.org/10.18485/meattech.2023.64.2.23>.
- KÖPPEN, W. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. *Petermanns Mitt*, v. 64, p. 193-203, 1918.
- KUMAR, V.; AHLUWALIA, V.; SARAN, S.; KUMAR, J.; PATEL, A. K.; SINGHANIA, R. R. Recent developments on solid-state fermentation for production of microbial secondary metabolites: challenges and solutions. *Bioresource Technology*, v. 323, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124566>.
- LICITRA, G.; HERNANDEZ, T. M.; VAN SOEST, P. J. Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feed. *Animal Feed Science and Technology*, v. 57, n. 4, p. 347-358, 1996.
- MARQUES, J. de A.; PRADO, I. N. do; ZEOULA, L. M.; ALCALDE, C. R.; NASCIMENTO, W. G. do. Avaliação da mandioca e seus resíduos industriais em substituição ao milho no desempenho de novilhas confinadas. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 29, n. 5, p. 1528-1536, 2000. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982000000500035>.
- NADAR, C. G.; FLETCHER, A.; MOREIRA, B. R.; HINE, D.; YADAV, S. Waste to protein: a systematic review of a century of advancement in microbial fermentation of agro-industrial byproducts. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 23, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13375>.
- NASSERI, A.T. et al. Single Cell Protein: Production and Process. *American Journal of Food Technology*. v. 6, 2011. DOI: [10.3923/ajft.2011.103.116](https://doi.org/10.3923/ajft.2011.103.116).
- OBOH, G. Nutrient enrichment of cassava peels using a mixed culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus* spp solid media fermentation techniques. *Electronic Journal of Biotechnology*, v. 9, p. 46-49, 2006.
- OLIVARES-MARIN, I. K.; GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, J. C.; REGALADO-GONZALEZ, C.; MADRIGAL-PEREZ, L. A. *Saccharomyces cerevisiae* cinética de crescimento exponencial em cultura em batelada para análise do metabolismo respiratório e fermentativo. *Journal of Visualized Experiments*, n. 139, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3791/58192>.
- PAMUNGKAS, D. et al. Enhancing the nutritional quality and digestibility of citronella waste (*Cymbopogon nardus*) for ruminant feed through ammoniation and fermentation techniques. *Veterinary World*, v. 17, p. 1603-1610, 2024. DOI: <https://doi.org/10.14202/vetworld.2024.1603-1610>.

- PILAJUN, R.; WANAPAT, M. Chemical composition and in vitro gas production of fermented cassava pulp with different types of supplements. *Journal of Applied Animal Research*, v. 46, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/09712119.2016.1261029>.
- POLYORACH, S.; WANAPAT, M.; POUNGCHOMPU, O.; CHERDTHONG, A.; GUNUN, P.; GUNUN, N.; KANG, S. Effect of fermentation using different microorganisms on nutritive values of fresh and dry cassava root. *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances*, v. 13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3923/ajava.2018.128.135>.
- POLYORACH, S.; WANAPAT, M.; WANAPAT, S. Enrichment of protein content in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) by supplementing with yeast for use as animal feed. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, v. 25, n. 2, p. 142-149, 2013.
- QUE, Z. *et al.* The powerful function of *Saccharomyces cerevisiae* in food science and other fields: a critical review. *Food Innovation and Advances*, v. 3, p. 167-180, 2024. DOI: <https://doi.org/10.48130/fia-0024-0016>.
- RANGEL, A. H. N.; LEONEL, F. P.; BRAGA, A. P.; PINHEIRO, M. J. P.; LIMA JUNIOR, D. M. Utilização da mandioca na alimentação de ruminantes. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 3, n. 2, p. 1-12, 2008.
- RUSLAN, N. F.; AHMAD, N.; ABAS, A.; SANFILIPPO, A.; MAHMOUD, K.; ABDUL M.; SAKINAH, M.; NOUR, A. (2024). Sustainable bioethanol production by solid-state fermentation: a systematic review. *Environmental Science and Pollution Research*. 32. 13140-13158. 10.1007/s11356-024-35406-z.
- SANTIAGO, A. V. *et al.* Variabilidade e intensidade das chuvas em Belém-PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 17., 2011, Guarapari. *Riscos climáticos e cenários agrícolas futuros: anais*. Guarapari: Incaper, 2011.
- SANTOS, V. L. F. *et al.* Rumen parameters of sheep fed cassava peel as a replacement for corn. *Small Ruminant Research*, v. 133, p. 88-92, 2015.
- SHARIF, M.; ZAFAR, M.; AQIB, A.; SAEED, M.; FARAG, M.; ALAGAWANY, M. (2021). Single cell protein: Sources, mechanism of production, nutritional value and its uses in aquaculture nutrition. *Aquaculture*. 531. 735885. 10.1016/j.aquaculture.2020.735885.
- SNIFFEN, C. J.; O'CONNOR, J. D.; VAN SOEST, P. J. *et al.* A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. *Journal of Animal Science*, v. 70, p. 3562-3577, 1992.
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM (SAS). *SAS OnDemand for Academics*. Cary, NC: SAS Institute Inc., 2022. Disponível em: https://www.sas.com/pt_br/software/on-demand-for-academics.html.
- STEWART, G. The structure and function of the yeast cell wall, plasma membrane and periplasm. In: *Yeast Physiology and Biotechnology*. Cham: Springer, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69126-8_5.

SUBRAMANIAM, R.; VIMALA, R. Solid state and submerged fermentation for the production of bioactive substances: a comparative study. *International Journal of Science and Nature*, v. 3, p. 480-486, 2012.

WERNER, E. Urea as a hygroscopic substance. *Nature*, v. 139, 1937. DOI: <https://doi.org/10.1038/139512a0>.

XU, H.; LI, B.; MU, X. Review of alkali-based pretreatment to enhance enzymatic saccharification for lignocellulosic biomass conversion. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 55, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b01907>.

YUAN, H.; GUAN, R.; WACHEMO, A. C.; ZHANG, Y.; ZUO, X.; LI, X. Improving physicochemical characteristics and anaerobic digestion performance of rice straw via ammonia pretreatment at varying concentrations and moisture levels. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 28, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.07.009>.

YUAN, X. *et al.* Recent advances of fermented fruits: a review on strains, fermentation strategies, and functional activities. *Food Chemistry: X*, v. 22, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101482>.

ZHANG, M.; XIE, L.; YIN, Z.; KHANAL, S. K.; ZHOU, Q. Biorefinery approach for cassava-based industrial wastes: current status and opportunities. *Bioresource Technology*, v. 215, p. 50-62, 2016.