



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE BIOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOQUÍMICA E FISIOLOGIA

JAMILE MARIA PEREIRA BASTOS LIRA DE VASCONCELOS

RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DO COURO DE CAPRINOS (*Capra aegagrus*) COMO FONTE SUSTENTÁVEL DE COLÁGENO E SUAS POSSÍVEIS APLICAÇÕES BIOTECNOLÓGICAS

RECIFE, 2025

JAMILE MARIA PEREIRA BASTOS LIRA DE VASCONCELOS

RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DO COURO DE CAPRINOS (*Capra aegagrus*) COMO FONTE SUSTENTÁVEL DE COLÁGENO E SUAS POSSÍVEIS APLICAÇÕES BIOTECNOLÓGICAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioquímica e Fisiologia (PPGBqF) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), como requisito parcial para obtenção do título de doutora em Bioquímica e Fisiologia.

Orientador: Profª Drª Maria Betania Melo de Oliveira

Co-orientador: Dr Robson Coelho de Araujo Neri

RECIFE, 2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Vasconcelos, Jamile Maria Pereira Bastos Lira de.
Resíduos do processamento do couro de caprinos (*Capra aegagrus*) como fonte sustentável de colágeno e suas possíveis aplicações biotecnológicas / Jamile Maria Pereira Bastos Lira de Vasconcelos. - Recife, 2025.
141f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco,
Centro de Biociências, Programa de Pós-Graduação em
Bioquímica e Fisiologia, 2025.

Orientação: Maria Betânia Melo de Oliveira.

Coorientação: Robson Coelho de Araújo Neri.

Inclui referências.

1. Resíduos; 2. Curtume; 3. Biomoléculas; 4.
Nordeste. I. Oliveira, Maria Betânia Melo de. II.
Neri, Robson Coelho de Araújo. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

JAMILE MARIA PEREIRA BASTOS LIRA DE VASCONCELOS

RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DO COURO DE CAPRINOS (*Capra aegagrus*) COMO FONTE SUSTENTÁVEL DE COLÁGENO E SUAS POSSÍVEIS APLICAÇÕES BIOTECNOLÓGICAS

Tese apresentada como um dos requisitos para o cumprimento das exigências para obtenção do título de Doutora em Bioquímica e Fisiologia pela Universidade Federal de Pernambuco.

Aprovado em: 22/06/2025.

Banca Examinadora

Prof^a. Dr^a. Maria Betânia Melo de Oliveira - UFPE (Presidente)

Prof^o Dr. Ranilson de Souza Bezerra - UFPE (Membro interno)

Prof^o Dr. Thiago Henrique Napoleão (Membro interno)

Dr^a. Tayane de Cássia Dias Mendes Silva (Membro externo)

Prof^o Dr. Augusto César Vasconcelos de Freitas Júnior (Membro externo)

RECIFE, 2025

Dedico este trabalho à minha mãe, meus filhos e meu esposo cujo amor incondicional me deram forças para continuar, mesmo nos momentos mais desafiadores.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha mãe, Socorro, por ser minha base e fonte inesgotável de amor e força, sempre me incentivando a seguir em frente. Aos meus filhos, Miguel e Bernardo, vocês são minha maior inspiração e razão para continuar lutando pelos meus sonhos. Ao meu esposo, Vinícius, por ser meu porto seguro, companheiro de todas as horas, e por me dar suporte em cada etapa dessa jornada. Aos meus irmãos, meu pai, à minha sogra Eliane e demais familiares que sempre me ofereceram palavras de encorajamento e apoio incondicional.

Sou profundamente grata à minha orientadora, Betânia, uma pessoa iluminada e de bom coração, que me acolheu e cuja sabedoria e paciência foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Ao meu co-orientador, Robson, que me guiou nos momentos mais desafiadores desta caminhada.

Agradeço também aos professores do departamento de Bioquímica, que, inúmeras vezes, abriram as portas de seus laboratórios para a realização dos experimentos que foram cruciais para este projeto. Ao professor Ranilson e ao técnico Bruno do Laboratório de Enzimologia (Labenz) da UFPE, por terem disponibilizado o espaço, os equipamentos e reagentes do laboratório para a condução dos meus experimentos e para armazenar os materiais de estudo. Ao técnico Carlos e aos professores do Laboratório de Bioquímica de Proteínas (BioProt) da UFPE, que também abriram as portas do laboratório para realização de alguns experimentos de caracterização do colágeno. A todos vocês meus sinceros agradecimentos.

Aos amigos que encontrei nesse percurso e que me ajudaram de alguma forma nesse processo; aos amigos do Núcleo de Biossegurança e Meio Ambiente (NuBioma), em especial Amanda Vieira. Por fim, não poderia deixar de mencionar os meus colegas de trabalho, que compartilharam comigo os desafios e as vitórias deste percurso, sempre com apoio mútuo e amizade.

A todos, meu mais sincero agradecimento. Esta conquista é também de vocês.

"Um passo à frente e você já não está mais no mesmo lugar."

– Chico Science

RESUMO

A indústria do processamento de couro gera um grande volume de resíduos sólidos e líquidos, demandando soluções que minimizem seu impacto ambiental e agreguem valor a esses materiais. Avaliar o potencial de reaproveitamento de resíduos da indústria do couro por meio da extração e caracterização do colágeno, com o intuito de promover a sustentabilidade ambiental e agregar valor à cadeia produtiva. A pesquisa resultou na produção de três artigos científicos: o primeiro consiste em uma revisão sobre alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para o aproveitamento de resíduos da indústria do couro como fonte de colágeno. Este artigo destaca a relevância dessa biomolécula para os setores cosmético, farmacêutico e alimentício, reforçando sua importância na agregação de valor aos resíduos e na contribuição para uma cadeia produtiva mais sustentável, em alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente o objetivo 12, que foca em Consumo e Produção Sustentáveis. O segundo artigo, também de revisão, analisa os impactos socioeconômicos da caprinocultura, destacando seu papel estratégico na segurança alimentar, geração de renda e fortalecimento da agricultura familiar no Nordeste brasileiro, ao evidenciar o potencial da caprinocultura para o desenvolvimento sustentável da região semiárida. O terceiro artigo corresponde a um estudo experimental no qual o colágeno foi extraído e caracterizado. A extração resultou em um rendimento de 37% do peso seco, e sua caracterização, de acordo com SDS-PAGE, FTIR e espectroscopia de raios UV, revelou que esta proteína corresponde a um colágeno tipo I. A análise estrutural confirmou a presença de cadeias γ , β e duas α distintas ($\alpha 1$ e $\alpha 2$), além da preservação da conformação helicoidal tripla, essencial para diversas aplicações biomédicas e industriais. Ademais, esta proteína demonstrou estabilidade térmica com temperatura de transição máxima de 56 °C, solubilidade máxima em pH 4,0 e ponto isoelétrico em 6,61. Os resultados deste estudo evidenciam que o reaproveitamento de resíduos da indústria do couro para a extração de colágeno contribui para a mitigação de impactos ambientais, além de agregar valor a um resíduo industrial com elevado potencial de aplicação. Além disso, a pesquisa reforça a importância da caprinocultura como um eixo estratégico para a sustentabilidade econômica e social do semiárido nordestino. Dessa maneira, os resultados obtidos

reforçam o potencial de reaproveitamento dos resíduos da indústria do couro por meio da extração e caracterização do colágeno, contribuindo para a promoção da sustentabilidade ambiental e para a geração de valor na cadeia produtiva.

Palavras- chaves: resíduos; curtume; biomoléculas; nordeste.

ABSTRACT

The leather processing industry generates a large volume of solid and liquid waste, requiring solutions that minimize its environmental impact and add value to these materials. To evaluate the potential for reusing waste from the leather industry through the extraction and characterization of collagen, with the aim of promoting environmental sustainability and adding value to the production chain. The research resulted in the production of three scientific articles: the first consists of a review of sustainable and economically viable alternatives for the use of waste from the leather industry as a source of collagen. This article highlights the relevance of this biomolecule for the cosmetic, pharmaceutical and food sectors, reinforcing its importance in adding value to waste and contributing to a more sustainable production chain, in alignment with the Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations (UN), especially goal 12, which focuses on Sustainable Consumption and Production. The second article, also a review, analyzes the socioeconomic impacts of goat farming, highlighting its strategic role in food security, income generation and strengthening of family farming in the Brazilian Northeast, by highlighting the potential of goat farming for the sustainable development of the semiarid region. The third article corresponds to an experimental study in which collagen was extracted and characterized. The extraction resulted in a yield of 37% of the dry weight, and its characterization, according to SDS-PAGE, FTIR and UV spectroscopy, revealed that this protein corresponds to a type I collagen. The structural analysis confirmed the presence of γ , β and two distinct α chains (α_1 and α_2), in addition to the preservation of the triple helical conformation, essential for several biomedical and industrial applications. Furthermore, this protein demonstrated thermal stability with a maximum transition temperature of 56 °C, maximum solubility at pH 4.0 and isoelectric point at 6.61. The results of this study show that the reuse of leather industry waste for collagen extraction contributes to the mitigation of environmental impacts, in addition to adding value to an industrial waste with high potential for application. In addition, the research reinforces the importance of goat farming as a strategic axis for the economic and social sustainability of the semiarid region of the Northeast. Thus, the results obtained reinforce the potential for reusing leather industry

waste through collagen extraction and characterization, contributing to the promotion of environmental sustainability and the generation of value in the production chain.

Keywords: waste; tannery; biomolecules; northeast.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS DO REFERENCIAL TEÓRICO

Figura 1: Criação de caprinos na região nordeste do Brasil.....	21
Figura 2: Criação de ovinos na região nordeste do Brasil.....	21
Figura 3: Utilização da pele de caprinos na fabricação de couro.....	24
Figura 4: Resíduos sólidos descartados no curtume: aparas de peles (A), peles curtidas(B) e sobras de material de produção (C).....	28
Figura 5: Processamento industrial do couro.....	29
Figura 6: Processo de acabamento do couro.....	30
Figura 7: Efluentes de curtume: 7-A, lodo oriundo de processo de molho das peles; 7-B, efluentes liberados e depositados em lagoa exposta.....	31
Figura 8: Fluxos básicos principais de um curtume (dados em massas brutas).....	32
Figura 9: Processo de formação, organização e estrutura de colágeno.....	36
Figura 10: Estrutura do colágeno.....	37

LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO 1

Figura 1: Processo de busca, seleção e inclusão de artigos.....	58
Figura 2: Diferentes fontes de colágeno.....	64
Figura 3: Etapas e métodos de extração e caracterização de colágeno.....	65

LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO 2

Figura 1: Distribuição do efetivo de rebanhos por região do Brasil em 2023.....	89
---	----

LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO 3

Fig. 1 Untanned leather offcuts at the initial stage of leather processing.....	118
Fig. 2 Treatment for the removal of sodium sulfide and hydrated Lime (2A), test with phenolphthalein to confirm the removal of sodium sulfide and hydrated Lime (2B and 2C), Confirmation of the removal of substances after application of phenolphthalein (2D and 2E).....	119
Fig. 3 Lyophilized Soluble Pepsin Collagen (SPC).....	120
Fig. 4 Distribution of bands for SPC extracted from untanned cowhide waste.....	125
Fig. 5. SPC thermogram rehydrated in 0.5M of acetic acid.....	126
Fig. 6 FTIR spectrum for SPC collagen.....	128
Fig.7 SPC solubility in NaCl.....	130
Fig. 8 SPC solubility in function of pH.....	131
Fig. 9 Lyophilized collagen from goat skin. The image shows the collagen before preparation for scanning electron microscopy.....	132
Fig. 10 Lyophilized collagen visualized through Scanning Microscopy.....	132
Fig. 11 Relationship between the Zeta Potential and the pH.....	133

LISTA DE TABELAS

LISTA DE TABELAS DO REFERENCIAL TEÓRICO

Tabela 1: Evolução do rebanho de caprinos por região do Brasil no período de 2019 a 2023...	26
Tabela 2: Possibilidades de aproveitamento dos materiais sólidos de curtumes.....	33
Tabela 3: Conteúdo de aminoácidos do colágeno tipo 1 na pele de mamíferos e do pescado.....	38
Tabela 4: Principais tipos de colágeno no organismo.....	40

LISTA DE TABELAS DO ARTIGO 1

Tabela 1: Aplicações industriais do colágeno.....	71
---	----

LISTA DE TABELAS DO ARTIGO 2

Tabela 1: Evolução do rebanho de caprinos por região do Brasil no período de 2019 a 2023.....	89
Tabela 2: Evolução do rebanho de caprinos por estados do Brasil no período entre 2019 a 2023.....	90
Tabela 3: Principais municípios produtores de caprinos no Brasil de 2019 a 2023.....	91
Tabela 4: Fatores que impactam a caprinocultura.....	94
Tabela 5: Políticas públicas e incentivos para a caprinocultura.....	101

LISTA DE TABELAS DO ARTIGO 3

Table 1. Wave peaks and groupings observed in the infrared spectrum -FTIR.....	129
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS

ABICALÇADOS	Associação Brasileira das Indústrias de Calçados
BNB	Banco do Nordeste do Brasil
CAS	Colágeno Ácido Solúvel
CICB	Centro da Indústria de Curtumes do Brasil
CPS	Colágeno Pepsino Solúvel
DIPOA	Departamento de Inspeção de Produtos de Origem Animal
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MEC	Matriz Extracelular
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
RIISPOA	Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1 Características Gerais dos Caprinos	21
2.2 Cadeia produtiva de caprinos e ovinos.....	22
2.3 Utilização da pele de caprino na produção de couro.....	23
2.4 Informações gerais sobre a atividade coureira.....	24
2.4.1 Atividade coureira no Brasil.....	26
2.5 Produção de resíduos e impactos ambientais do setor coureiro	28
2.6 Colágeno: características gerais.....	35
3. OBJETIVOS.....	42
3.1 Objetivo Geral	42
3.1 Objetivos Específicos	42
REFERÊNCIAS.....	43
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
ARTIGO 1: Obtenção de colágeno a partir de resíduos industriais: uma alternativa sustentável e economicamente viável.....	54
RESUMO.....	54
ABSTRACT.....	55
1. INTRODUÇÃO.....	56
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
3.1 Problemática dos resíduos gerados nas indústrias.....	58
3.2 Obtenção de biomoléculas com valor agregado a partir de resíduos industriais.....	60
3.3 Colágeno.....	62
3.4 Obtenção de colágeno a partir de resíduos.....	62
3.5 Métodos de extração do colágeno.....	63
3.5.1 Técnicas tradicionais.....	66
3.5.2 Tratamento salino.....	66
3.5.3 Tratamento ácido.....	67
3.5.4 Tratamento enzimático.....	67
3.5.5 Extração com Solvente Eutético Profundos.....	68
3.5.6 Extração por Fluido Supercrítico (SFE).....	68
3.5.7 Extrusão e Extração Assistida por Ultrassom (EAU).....	69
3.6 Aplicações comerciais do colágeno.....	70
4. PERSPECTIVAS FUTURAS.....	73
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
REFERÊNCIAS.....	75
ARTIGO 2.....	84

"Caprinocultura no Nordeste do Brasil: Impactos Socioeconômicos e Sustentabilidade no Semiárido"	84
RESUMO	84
ABSTRACT	85
1. INTRODUÇÃO	85
2. MATERIAIS E MÉTODOS	86
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
3.1 Características Gerais da Prática da Caprinocultura no Brasil.....	87
3.2 Importância socioeconômica da caprinocultura.....	91
3.2.1 Leite.....	92
3.2.2 Carne.....	93
3.2.3 Pele.....	93
3.2.4 Vísceras.....	93
3.2.5 Esterco.....	94
3.3 Impacto Ambiental da Caprinocultura.....	94
3.4 Desafios e perspectivas da caprinocultura no Brasil.....	95
3.4.1 Desafios da caprinocultura no semiárido.....	97
3.4.2 Tecnologia e Inovação na Caprinocultura.....	99
3.5 Políticas públicas e incentivos para a caprinocultura.....	101
CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
ARTIGO 3- Goat Skin (Capra aegragruss Erxleben, 1777): a Promising and Sustainable Source of Collagen	114
ABSTRACT	115
1. INTRODUCTION	116
2. MATERIALS AND METHODS	117
2.1 Collagen extraction from goat skin.....	119
2.2 Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE).....	120
2.3 Thermal transition temperature measurement.....	121
2.4 Ultraviolet Spectrum.....	121
2.5 FTIR spectroscopy.....	121
2.6 NaCl Effect on solubility.....	121
2.7 pH Effect on Solubility.....	122
2.8 Scanning Electron Microscopy (SEM).....	122
2.9 Determination of zeta potential.....	123
2.10 Statistical analysis.....	123
3. RESULTS AND DISCUSSION	123
3.1 SPC collagen extraction yield.....	123
3.2 Polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE).....	124
3.3 Thermal stability.....	125
3.5 FTIR spectroscopy.....	127

3.6 Effect of NaCl concentration on collagen solubility.....	129
3.7 pH effect on solubility.....	130
3.9 Determination of zeta potential.....	133
CONCLUSION.....	134
REFERENCES.....	135
STATEMENTS AND DECLARATIONS.....	140
CONCLUSÕES GERAIS DA TESE.....	141

1. INTRODUÇÃO

O couro é a pele do animal preservada da putrefação por um processo denominado curtimento. A pele curtida se torna flexível e macia, pronta para ser utilizada na confecção de bolsas, calçados, roupas, malas, objetos domésticos e acessórios como, por exemplo, chapéus. Podem ser curtidas as peles de bovinos, ovelhas, cabras, camelos, porcos, cobras, cavalos, búfalos, cangurus, crocodilos, peixes, rãs e aves, como o avestruz, entre outros animais (Mendes Júnior e Ximenes, 2021).

A maioria dos tecidos animais, incluindo a pele, é constituída por colágenos. Esta proteína estrutural representa cerca de 30% do conteúdo proteico total dos vertebrados (Gonçalves et al., 2015). Estruturalmente, o colágeno é caracterizado por três cadeias polipeptídicas ligadas entre si, formando uma tripla hélice com orientação dextrógira e um motivo repetitivo (Glicina-X-Y)_n, no qual as posições X e Y são ocupadas frequentemente pelos aminoácidos prolina e hidroxiprolina (Oliveira et al., 2021; Liu et al., 2019; Silva et al., 2022).

O colágeno tem ampla aplicação nas indústrias de alimentos, cosméticos e farmacêutica devido às suas propriedades de biocompatibilidade, biodegradabilidade e baixa antigenicidade. Suas principais fontes são subprodutos de animais bovinos, suínos e aves (Liu et al., 2019). Além dessas aplicações tradicionais, estudos recentes indicam que o colágeno presente em resíduos da indústria do couro pode ser uma fonte alternativa de Nitrogênio (N) para o crescimento das plantas, funcionando de maneira semelhante à fertilização com nitrogênio mineral (Lima et al., 2022; Ștefan et al., 2022). Essa possibilidade desperta o interesse de diferentes setores devido ao seu valor sustentável e econômico (Lisboa et al., 2018; Bitencourt et al., 2022).

O Brasil, como um dos maiores produtores e exportadores mundiais de couro, possui mais de 700 empresas envolvidas na cadeia produtiva, desde pequenos curtumes familiares até grandes indústrias de processamento. No entanto, a atividade apresenta desafios ambientais, principalmente relacionados à disposição inadequada de resíduos sólidos e efluentes gerados no processo de curtimento (Santos & Araújo, 2020; Meira et al., 2021). Diante disso, o aproveitamento de subprodutos do couro para

obtenção de biomoléculas como o colágeno surge como uma alternativa promissora, tanto para mitigar impactos ambientais quanto para gerar valor agregado aos resíduos industriais.

O mercado global de colágeno está em expansão, impulsionado pelo aumento da demanda nos setores de saúde, nutrição e cosméticos. Em 2023, o mercado mundial de colágeno foi avaliado em aproximadamente 9 bilhões de dólares e tem previsão de crescimento contínuo devido ao envelhecimento da população e ao crescimento da indústria de suplementos alimentares (Kings Research, 2025). O Brasil acompanha essa tendência, sendo um dos principais fornecedores globais de colágeno bovino, os quais são utilizados em suplementos e produtos de beleza. No entanto, ainda há um grande potencial para a diversificação das fontes de colágeno, incluindo o colágeno extraído de resíduos do couro caprino (Exactitude Consultancy, 2025).

A viabilidade econômica do colágeno obtido de resíduos da indústria do couro depende de fatores como eficiência na extração e aceitação do mercado. A utilização desse material como fonte alternativa de colágeno pode representar uma vantagem competitiva ao reduzir desperdícios e oferecer uma opção sustentável para diversos setores industriais. Além disso, o colágeno caprino apresenta características estruturais similares ao colágeno bovino, podendo ser explorado em aplicações biomédicas e farmacêuticas, aumentando seu valor comercial (Lima, 2011; Santos et al. 2007).

Dessa forma, o reaproveitamento de resíduos da indústria do couro para obtenção de colágeno não só contribui para a redução do impacto ambiental da atividade, mas também para gerar oportunidades econômicas, tanto na comercialização do colágeno quanto no fortalecimento da cadeia produtiva da caprinocultura. Portanto, investir em pesquisas e inovações tecnológicas voltadas para a extração e purificação do colágeno caprino pode consolidar essa fonte como um recurso estratégico para a bioeconomia sustentável (Lopes et al. 2018).

Sendo assim, a escolha dos caprinos como fonte de colágeno se justifica pelo expressivo rebanho presente na região nordeste do Brasil, fundamental para a economia local e a agricultura familiar. Além disso, as características estruturais diferenciadas da pele desses animais podem influenciar positivamente na qualidade do

colágeno extraído. O aproveitamento de resíduos do processamento do couro não apenas contribui para a redução dos impactos ambientais da indústria, como também agrega valor à cadeia produtiva, promovendo a bioeconomia regional e fortalecendo alternativas econômicas sustentáveis.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Características Gerais dos Caprinos

A subfamília Caprinae pertencente à família Bovidae é composta por bodes domésticos, cabras, ovelhas, entre outros. Os caprinos, que incluem os bodes e as cabras (*C. aegagrus*), pertencem ao gênero *Capra* (Figura 1).

Figura 1: Criação de caprinos na região nordeste do Brasil.



Fonte: <https://www.itapetingaacontece.com.br/2020/07/bahia-ocupa-o-1-lugar-no-ranking-da.html>

A criação de caprinos e ovinos (*Ovis aries*) (Figura 2) é conhecida como caprinocultura e ovinocultura, respectivamente (Bayona et al., 2016; Monteiro et al., 2021).

Figura 2: Criação de ovinos na região nordeste do Brasil.



Fonte: <https://blog.mfleiloes.com.br/alimentacao-ovinos-nordeste/>

Os caprinos e os ovinos são considerados os primeiros animais a serem domesticados pela humanidade. Estes surgiram no Miocénico, mas sua diversidade se expandiu durante a última Idade do Gelo, quando muitos se adaptaram a *habitats*

extremos como tundras, regiões subárticas e desertos. Estes animais possuem uma constituição robusta e são muito flexíveis em relação à alimentação, podendo se alimentar de diversos tipos de matéria vegetal. Ao longo dos séculos até os tempos atuais são explorados pelo leite, carne e fibra que produzem (Bertolini et al., 2018; Parraguez et al., 2021; Oliveira & Destefani, 2021). A criação de caprinos é uma opção viável para geração de emprego e renda, devido à produção de alimentos nutritivos, como leite, carne e vísceras, além da pele de alta qualidade. (Felisberto et al., 2016; Costa & Pandolfi, 2021).

Quando fala-se na caprinocultura no nordeste do Brasil, observa-se que corresponde a uma atividade fundamental para a economia local e para a estabilidade social, proporcionando renda e contribuindo para o fortalecimento do homem no campo (Felisberto et al., 2016). O nordeste detém 93,3% do rebanho caprino brasileiro (IBGE, 2018) e pesquisas recentes destacam sua importância e relevância para a região (Ribeiro e Alencar, 2018; Souza e Barros, 2017).

2.2 Cadeia produtiva de caprinos e ovinos

A cadeia produtiva de caprinos e ovinos abrange diversas etapas, desde a criação até o abate, gerando subprodutos que podem agregar valor à produção. Essa cadeia inicia-se com a criação dos animais, envolvendo práticas adequadas de manejo nutricional, sanitário e reprodutivo, fundamentais para garantir a saúde e a produtividade do rebanho. Quando os animais atingem o peso e a idade ideais, são encaminhados então para o abate, que pode ocorrer em abatedouros municipais, frigoríficos de variados portes ou, infelizmente, de forma clandestina (Pimentel et al. 2029; Dias et al. 2023; Santos et al. 2023).

No estado de Pernambuco, essa cadeia possui características específicas que influenciam sua dinâmica econômica e social. A criação de caprinos e ovinos em Pernambuco é uma atividade tradicional, especialmente nas regiões do Sertão do São Francisco, onde se concentram os maiores rebanhos do estado. A produção envolve manejo adequado, cuidados sanitários e infraestrutura apropriada para o desenvolvimento dos animais. O abate é realizado em instalações que atendem às

normas sanitárias, garantindo a qualidade dos produtos destinados ao consumo (Pimentel et al. 2029; Dias et al. 2023; Santos et al. 2023).

A destinação dos resíduos gerados em abatedouros pode variar conforme a infraestrutura de cada unidade e as demandas do mercado local. Resíduos como vísceras e outras partes não comestíveis são destinados de diferentes formas: alguns são encaminhados para a produção de ração animal, farinha de carne e ossos, ou ainda utilizados na indústria farmacêutica e cosmética; aqueles que não possuem aproveitamento comercial são descartados em aterros sanitários de maneira controlada, atendendo às normas ambientais; e em algumas instalações, adota-se o processo de compostagem para transformar resíduos orgânicos em adubo, contribuindo para a sustentabilidade ambiental (Conceição et al. 2020; Santos et al. 2023).

2.3 Utilização da pele de caprino na produção de couro

A utilização da pele de caprinos na fabricação de couro (Figura 3) tem despertado interesse tanto na academia quanto na indústria de curtumes. A pele de caprinos, proveniente de animais como cabras e ovelhas, apresenta características únicas que a tornam atraente para a produção de couro de alta qualidade. Esse tipo de pele possui fibras mais finas e uniformes em comparação com a pele de bovinos, o que resulta em um couro mais macio e flexível. Além disso, a pele de caprinos é naturalmente mais resistente à umidade e à abrasão, o que a torna ideal para a fabricação de calçados, bolsas e outros produtos que requerem durabilidade (Castanha, 2019; Schneider et al., 2022).

Figura 3: Utilização da pele de caprinos na fabricação de couro.



Fonte: Autora (2024)

A utilização da pele de caprinos na fabricação de couro também é vantajosa do ponto de vista ambiental. Os caprinos são animais de pequeno porte e apresentam um ciclo de vida curto, o que resulta em menor impacto ambiental na produção de couro. Diante desses aspectos, a utilização da pele de caprinos na fabricação de couro resulta em produtos de alta qualidade (Barbosa & Xavier, 2019; Queiroz et al., 2021; Schneider et al., 2022).

A criação de caprinos é uma atividade tradicional na região nordeste, sendo uma importante fonte de subsistência para muitos agricultores familiares. Além da produção de carne e leite, suas peles também têm sido utilizadas para a produção de couro, sendo uma alternativa viável e rentável para os criadores destes animais na região (Felisberto et al., 2016; Guilherme et al., 2017).

2.4 Informações gerais sobre a atividade coureira

A atividade coureira é uma prática secular de trabalhadores especializados na confecção e reparo de calçados, bolsas e acessórios em couro (Sunderman, 2021). Observa-se que nos últimos anos, o setor de curtumes tem crescido significativamente nos países em desenvolvimento, deslocando-se a produção de couros da Europa e Estados Unidos da América (EUA) para o Extremo Oriente e América do Sul, destacando-se China, Brasil, Índia, Coréia e Argentina como os principais países

atualmente relacionados a essa produção (FAO, 2022). Nos países do Leste Europeu também se verifica o crescimento da produção de couros, especialmente o *wet blue*. Entre as razões, apontam-se a busca de mão-de-obra de menor custo e as restrições mais severas das políticas ambientais dos países produtores tradicionais (Rodriguez, 2023).

Na América do Sul, o Brasil se destaca como um dos principais produtores de couro, apesar de a Argentina ser reconhecida por oferecer couro de melhor qualidade (CICB, 2017). Atualmente, o Brasil possui o segundo maior rebanho do mundo. No entanto, a taxa de aproveitamento do couro ainda é relativamente baixa quando comparada à de países com rebanhos menores, mas com tradição no setor (CICB, 2017).

A produção de couro começa na atividade pecuária, seguida pelo abate dos animais, o descarte (remoção da carne) nos abatedouros e a aplicação de conservantes. A pele, nesse estágio, é tratada no frigorífico ou vendida para os curtumes, onde será submetida a outros processos até que se obtenha o couro (FAO, 2022). Os curtumes podem ser caracterizados de acordo com sua etapa de processamento do couro:

- Curtume de *Wet Blue* – Realiza-se o primeiro processamento do couro logo após o abate, quando o couro, ainda salgado ou em sangue, é despelado. Em seguida, são removidas as graxas e gorduras, e o material passa pelo primeiro banho de cromo, adquirindo, assim, um aspecto azulado e úmido.

- Curtume Integrado – Realiza todas as operações, processando desde o couro cru até o couro acabado.

- Curtume de Semi-Acabado – Utiliza como matéria-prima o couro *wet blue* e o transforma em couro *crust* (semi-acabado).

- Curtume de Acabamento – Transforma o couro *crust* em couro acabado

O setor coureiro tem demonstrado um crescimento constante nos últimos tempos devido a uma série de fatores. Entre eles está a crescente procura por

produtos de couro de alta qualidade, a valorização da moda sustentável e a inovação tecnológica na produção de artigos de couro (Smith & Davies, 2023).

A produção de couro está diretamente relacionada à utilização de animais como fonte da matéria-prima principal, sendo os mais comuns: bois (bovino), cabras (caprinos), ovelhas (ovinos) e porcos (suínos). A obtenção da pele para a produção de couro pode se dar de diversas formas, sendo as mais comuns através do abate de animais destinados especificamente para este fim, da utilização de subprodutos da indústria de alimentos ou do aproveitamento de descartes de outros setores (Nehring & Fabre, 2020; Santos et al., 2023).

2.4.1 Atividade coureira no Brasil

O Brasil é importante líder mundial no setor de couro pois possui o segundo rebanho bovino, sendo o terceiro maior exportador de couro curtido e o primeiro de couro semiacabado (*wet-blue* e *crust*). O país se destaca no setor coureiro por possuir uma importante fonte de matéria-prima que garante o abastecimento essencial das peles (Leandro et al., 2020; Luna & Klein, 2023).

Em 2023, o rebanho caprino no Brasil (Tabela 1) foi estimado em aproximadamente 12,891 milhões de cabeças, registrando um aumento de cerca de 500 mil animais, equivalente a 4,0%, em relação a 2022. Esse avanço foi impulsionado, sobretudo, pela expansão de 4,5% no efetivo da região Nordeste, que concentra 12,37 milhões de cabeças. Além do Nordeste, apenas a região Norte apresentou crescimento, com alta de 2,8% no número de caprinos. Nas demais regiões, destacou-se a queda registrada no Centro-Oeste, que apresentou uma retração de quase 18% no período (EMBRAPA, 2024).

Tabela 1: Evolução do rebanho de caprinos por região do Brasil no período de 2019 a 2023.

Brasil e Grande Região	Ano					
	2019	2020	2021	2022	20223	Variação (%) 2023/2022
Nordeste	11.024.373	11.497.991	11.325.865	11.838.172	12.373.805	4,5%
Sul	206.739	187.679	182.319	173.301	161.671	-6,7%
Sudeste	157.570	154.560	148.706	148.170	140.555	-5,1%
Norte	146.959	161.368	136.863	125.494	129.010	2,8%
Centro-Oeste	101.688	100.088	103.451	105.353	86.452	-17,9%
Brasil	11.637.329	12.101.686	11.897.204	12.390.490	12.891.493	4,04%

Fonte: PPM, IBGE (2024)

No Brasil, a atividade coureira tem tradição e importância, contribuindo não apenas para a economia, mas também para a valorização da cultura e identidade local. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o setor coureiro-calçadista representa um dos segmentos importantes da indústria nacional, gerando empregos e movimentando a economia brasileira. De acordo com a Associação Brasileira das Indústrias de Calçados (ABICALÇADOS), o Brasil é um dos maiores produtores de calçados do mundo, exportando para diversos países.

Mais de 310 curtumes estão atualmente ativos no Brasil, processando cerca de 45 milhões de peles por ano e empregando mais de 40.000 trabalhadores (CICB, 2021). O setor curtidor brasileiro é composto por poucas empresas com enorme capacidade produtiva e muitas outras menores: não mais que 60 curtumes produzem 80% dos curtumes brasileiros (CICB, 2021). Após a modernização dos curtumes e a adoção de medidas em *prol* da sustentabilidade ambiental, o uso do couro brasileiro se destacou nos últimos anos, direcionando sua produção para a exportação. Atualmente, 70% dos curtidos processados no Brasil são destinados ao mercado externo, sendo China, Itália, Hong Kong, Estados Unidos e Vietnã os maiores compradores internacionais (CICB, 2021).

O valor bruto da produção das indústrias de couro e calçados do Brasil alcançou R\$ 39,2 bilhões em 2018, de acordo com a Pesquisa Industrial Anual (IBGE, 2020). Para o Nordeste, este valor superou R\$11 bilhões, equivalente a 28% do total do Brasil, o que demonstra ser esta região especializada neste tipo de produção. Grande parte do couro produzido no mundo é destinado à fabricação de calçados. Sendo assim, o Brasil possui uma indústria calçadista com enorme capacidade de fabricação de pares (é o quinto maior produtor de calçados do mundo) (CICB, 2021).

Quando se trata em região brasileira, as peles nordestinas de caprinos e ovinos são bastante valorizadas no mercado pela maior elasticidade, resistência e textura apresentadas, prestando-se, assim, para um maior número de produtos nas indústrias de vestuário e de calçados. Essa atividade é desenvolvida desde o século XVII e a cada dia vai se fortalecendo. Além de contribuir para a economia, tem grande valor

cultural para a população, pois a utilização de calçados e vestimentas de couro é muito comum (Nascimento et al., 2022).

2.5 Produção de resíduos e impactos ambientais do setor coureiro

Apesar da importância econômica do setor coureiro, a utilização de animais para a produção de couro gera controvérsia. Há crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental da indústria do couro, uma vez que a produção em larga escala pode gerar impactos negativos no meio ambiente, como deposição dos resíduos em locais impróprios causando diversos prejuízos ao ambiente. Dentre esses resíduos sólidos descartados (Figura 4) podemos destacar as aparas de peles (4-A), peles curtidas (4-B) e sobras de material de produção (4-C). Portanto, embora o setor coureiro seja relevante para a economia global, é importante considerar os impactos ambientais. A busca por práticas mais sustentáveis é fundamental para garantir o futuro da indústria do couro de forma responsável e sustentável (Guajala et al., 2016; Santos & Araújo, 2020; Meira et al., 2021).

Figura 4: Resíduos sólidos descartados no curtume: aparas de peles (A), peles curtidas (B) e sobras de material de produção (C).

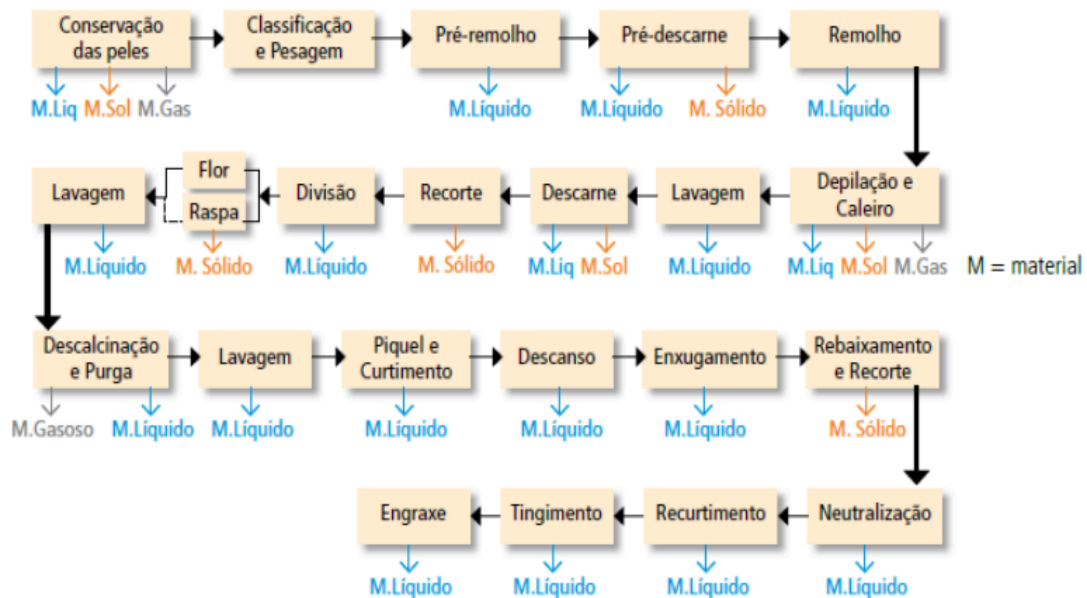


Fonte: Autora, 2024

As operações de processamento industrial do couro passam por uma série de processos de limpeza, a partir do couro cru, as quais podem se dividir em três estágios (Figura 5): ribeiras, curtimento e acabamento. A ribeira consiste em limpar e preparar a pele para o curtimento. O curtimento é a operação onde ocorre a estabilização do colágeno, de forma que a pele possa adquirir resistência à degradação. Já o

acabamento (Figura 6) possibilita ao couro adquirir suas características finais, fazendo cortes de partes indesejáveis do couro. (Pacheco, 2015).

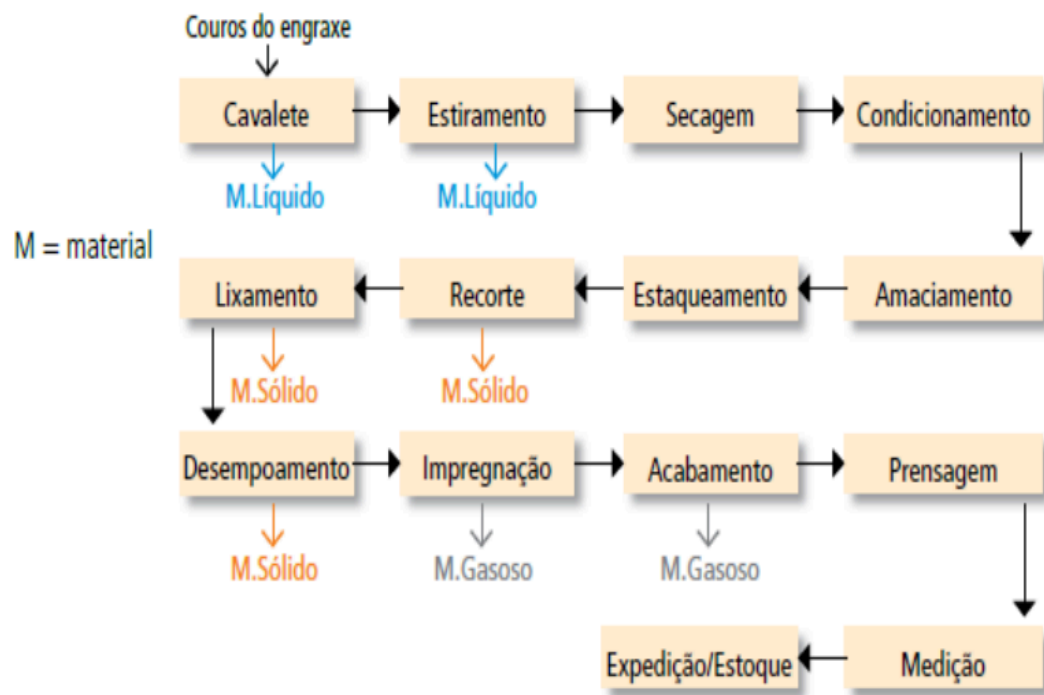
Figura 5: Processamento industrial do couro.



Fonte: Pacheco (2015; adaptado de Claas; Maia, 1994)

De acordo com Reis et Garcia (2012) essas etapas geram grande quantidade de resíduos sólidos e efluentes. Para o tratamento do couro utiliza-se o sulfato de cromo (III) como principal agente curtente, assim, os resíduos gerados após esse processo como aparas, pó de couro e serragem são classificados como Classe I - Perigosos (ABNT - NBR 10004). As sobras das peles, por exemplo, resultam em resíduos que podem ser altamente prejudiciais ao meio ambiente.

Figura 6: Processo de acabamento do couro.



Fonte: Pacheco, 2015.

Segundo Pacheco (2015), os resíduos provenientes dos curtumes representam um desafio ambiental significativo, devido à sua composição complexa e ao potencial impacto negativo que podem causar no meio ambiente, tanto na forma de resíduos sólidos quanto de efluentes líquidos (Figura 7). Estes, podem conter metais pesados, compostos orgânicos tóxicos e agentes patogênicos, que podem contaminar o solo e a água, comprometendo a saúde humana e a biodiversidade.

Figura 7: Efluentes de curtume: 7-A, lodo oriundo de processo de molho das peles; 7-B, efluentes liberados e depositados em lagoa exposta.



Fonte: Autora, 2024

Dois resíduos de curtume, o lodo oriundo do processo de molho das peles e os efluentes depositados em lagoas expostas, possuem características distintas, mas apresentam possibilidades de reaproveitamento, dependendo de seus compostos químicos e físicos.

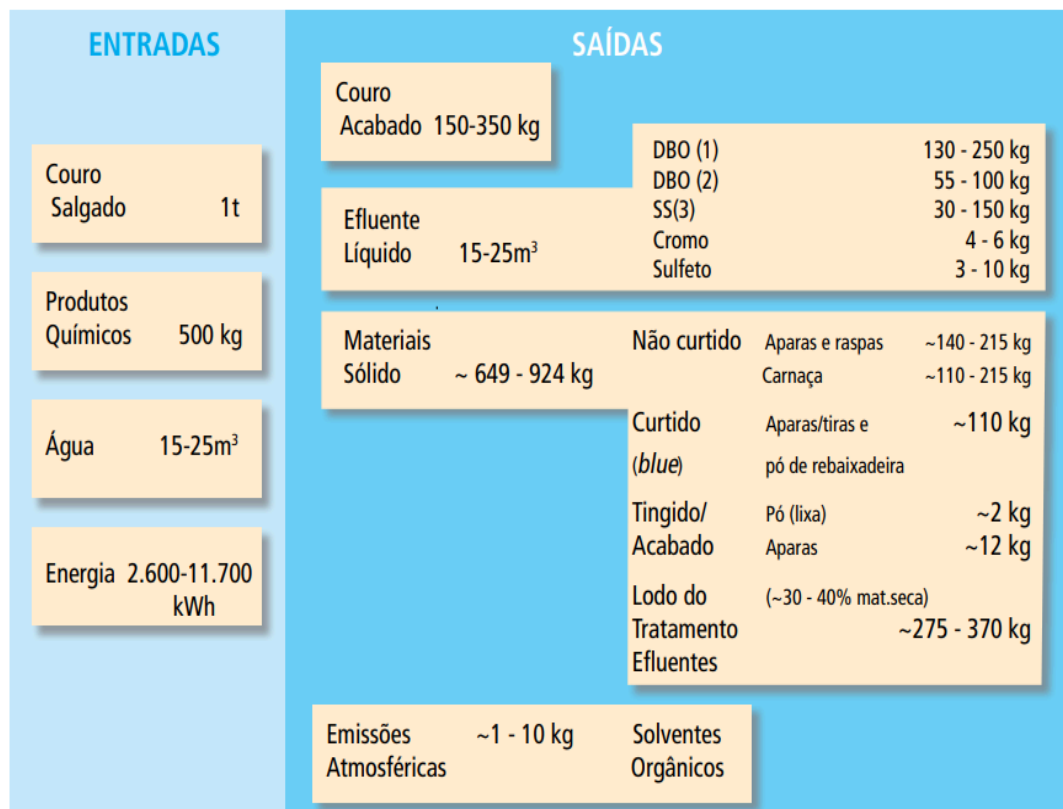
O lodo gerado durante o processo de molho das peles (Figura 7-A) é composto principalmente por matéria orgânica, sais, ácidos graxos, enxofre e metais pesados. Uma possível aplicabilidade desse lodo é sua utilização como matéria-prima na produção de compostos fertilizantes, devido à presença de nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio (Silva et al., 2021). A compostagem do lodo pode contribuir para a diminuição dos impactos ambientais, transformando-o em um produto com valor agregado, como adubo orgânico, que pode ser utilizado na agricultura ou jardinagem, favorecendo o desenvolvimento de culturas vegetais (Gonçalves et al., 2020). Além disso, a adição do lodo ao solo pode melhorar a estrutura e a retenção de água, promovendo a sustentabilidade no uso do solo (Pereira et al., 2022).

Quanto aos efluentes liberados e depositados em lagoas expostas (Figura 7-B), esses resíduos apresentam alta carga orgânica e a presença de compostos tóxicos devido ao uso de produtos químicos no processo de curtimento. Tecnologias de tratamento como a biorremediação têm mostrado eficácia na redução da toxicidade e no aproveitamento de resíduos líquidos para a produção de biogás, utilizando microrganismos especializados para degradação de compostos orgânicos (Rodrigues

et al., 2021). Outro uso possível é o tratamento para produção de água de reuso em sistemas fechados, desde que o processo de purificação seja eficaz (Farias et al., 2023). Além disso, a utilização de efluentes tratados em processos industriais como resfriamento ou irrigação de áreas não destinadas ao consumo direto é uma alternativa para minimizar os impactos ambientais e promover a economia circular (Moura et al., 2020).

A Figura 8 apresenta um esquema dos fluxos principais de um curtume, com faixas de valores e quantidades médias das principais entradas e saídas do processo produtivo convencional para couro bovino salgado, com curtimento ao cromo, até o produto final.

Figura 8: Fluxos básicos principais de um curtume (dados em massas brutas).



Fonte: FERRARI, 2015

O processamento convencional de 1 t ou 1.000 kg de peles salgadas gera 150 a 350 kg de couros acabados, o que dá um rendimento médio do processo de 25%, nessas bases. Assim, verifica-se a quantidade significativa de material que sai do processo, que não é produto e se não for adequadamente gerenciada, pode apresentar

impacto ambiental significativo. Os resíduos são gerados em todos os estágios produtivos dos curtumes e, apesar de existirem opções de recuperação de resíduos como extração de material orgânico para fertilização, a grande maioria é enviada para aterros, nos quais não há possibilidade de qualquer recuperação de material ou energia. A seleção para descarte dos resíduos comumente é dependente do estágio no qual o resíduo foi gerado (Pringle; Barwood; Rahimifard, 2016).

Atividades de gerenciamento de resíduos demonstram alta eficácia na mitigação dos impactos ambientais resultantes da eliminação de matéria orgânica. A reutilização desses resíduos como uma fonte de novos recursos emerge como uma alternativa atrativa e viável para minimizar o descarte de material biológico. A utilização desse resíduo orgânico como uma nova fonte para a produção de biomoléculas como o colágeno é uma proposta atrativa (Cordeiro et al., 2020; Monteiro et al., 2022). A Tabela 2 resume as principais opções disponíveis para a utilização e destinação de materiais provenientes de curtumes, incluindo beneficiamento e utilização por terceiros, com algumas opções mais favoráveis que outras.

Tabela 2: Possibilidades de aproveitamento dos materiais sólidos de curtumes.

Aproveitamento/Destino possível	Materiais Sólidos
Produção de couro de segunda linha	Da ribeira- camada retirada na divisão após o caleiro (raspas)
Gelatina, cola	Da ribeira- aparas frescas, salgadas, não-caleadas ou caleadas camadas retiradas da divisão (raspas)
Produção de sebo ou gordura animal, derivados proteicos, cola e ração animal	Da ribeira- aparas frescas e carnaças
Insumo agrícola- condicionamento e fertilização de solos agrícolas	Do processo de ETE- lodo do caleiro e efluentes da ribeira.

Fonte: Adaptado de CLAAS; MAIA (1994)

A indústria do couro gera resíduos sólidos significativos, apresentando desafios ambientais. Vários métodos de tratamento e reutilização têm sido explorados para reduzir o impacto ambiental. Isso inclui processos físico-químicos e biológicos para remoção e reutilização de cromo em outras indústrias (Alves & Barbosa, 2013; Nogueira et al., 2018).

Estudos têm sido desenvolvidos para a obtenção de colágeno a partir de resíduos sólidos da indústria coureira, assim como também a sua aplicabilidade em

diversos segmentos de Biotecnologia, Farmácia e Biomedicina, devido a propriedades como biodegradabilidade, biocompatibilidade, antigenicidade e plasticidade. O estudo do reaproveitamento de resíduos gerados pela produção coureira tem significativa importância econômica e se faz necessário. Resíduos de peles são ricos em colágeno, fato esse que converte esses dejetos em uma promissora fonte dessa biomolécula (Muthukumar et al., 2018; Silva et al., 2020; Lopes et al., 2023).

As sobras e resíduos, devido à sua alta concentração de colágeno, são preciosas e empregadas como matéria-prima principalmente na produção de gelatinas para uso alimentar ou farmacêutico, além de outros produtos. Portanto, há uma concorrência acirrada para a obtenção desses materiais e um sistema bem estabelecido para sua gestão, visando assegurar sua utilização máxima, com atenção especial para a coleta, armazenamento, conservação e transporte (Silva et al., 2020; Rigueto et al., 2022).

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) auxilia para isso, disciplinando os curtumes e as indústrias de gelatinas para a gestão adequada desses materiais. Por meio do Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal (RIISPOA), legitimado pelo Decreto Federal nº 30.691/1952 e por normas complementares, esse Ministério estabelece requisitos para as fontes animais utilizadas na fabricação de gelatinas próprias para o consumo humano (BRASIL, 1952). Como exemplos dessas normas, podem-se citar:

- Resolução do Departamento de Inspeção de Produtos de Origem Animal (DIPOA) Nº 5, de 23/01/2003, “determina as Instruções Operacionais, constantes dos Anexos a serem utilizados pelos estabelecimentos industriais que transformem peles em couro (curtumes), das diversas espécies animais ou que tenham, entre outros objetivos, a obtenção de matéria prima destinada às indústrias produtoras de gelatina, na obtenção do relacionamento no DIPOA” (BRASIL, 2003)

- Ofício nº 119/GAB/DIPOA/DAS/2011, onde se define que “as peles, para a indústria de gelatina, devem conter o texto: “OBTIDA DE ANIMAIS ABATIDOS SOB INSPEÇÃO VETERINÁRIA OFICIAL E APTA PARA PRODUÇÃO DE GELATINA E OUTROS PRODUTOS COLAGÊNICOS””.

Os curtumes que fornecem raspas e aparas para a produção de gelatinas devem estar em conformidade com os padrões sanitários estabelecidos pelo MAPA, garantindo assim a qualidade e segurança dos materiais que são utilizados como insumos na fabricação de produtos alimentícios e farmacêuticos (BRASIL, 2012).

Uma alternativa de utilização desses materiais é na fabricação de colas e na produção de invólucros de embalagens comestíveis para produtos embutidos. Em países estrangeiros, em menor escala, o colágeno contido também é aproveitado para aplicações médicas e cirúrgicas, como: pomadas, substâncias cicatrizantes, enxertos e pele sintética (Penha et al., 2019; Costa et al., 2020).

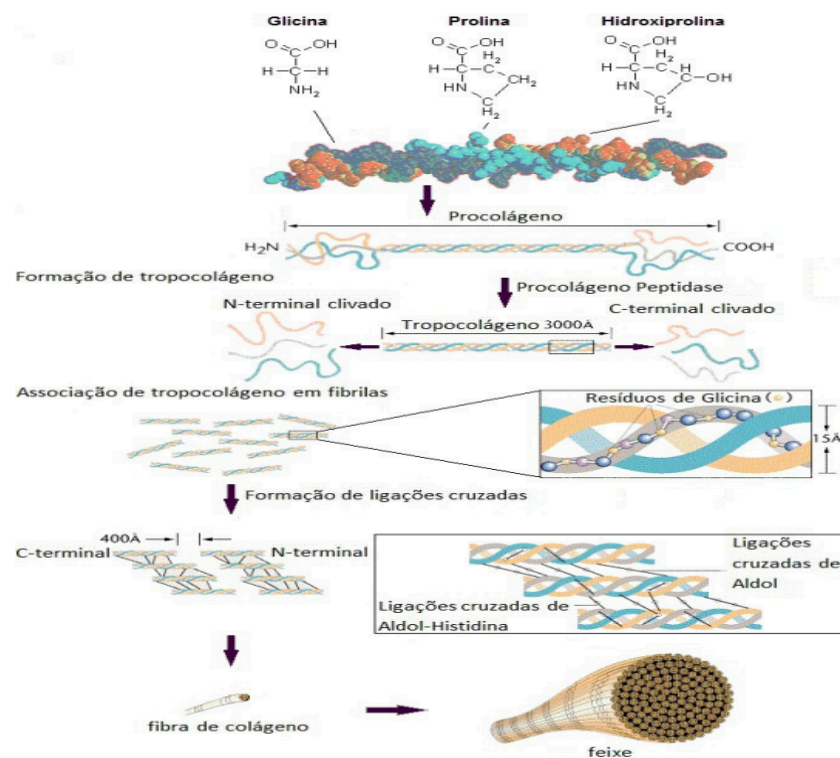
2.6 Colágeno: características gerais

Encontrado em todo o reino animal, o colágeno desempenha várias funções, como: força e elasticidade aos tecidos, cicatrização de feridas e manutenção da integridade estrutural dos órgãos (Oliveira et al., 2021). Já foram identificados 29 tipos distintos de colágeno, subdivididos em fibrilares e não fibrilares, diferenciados em aspectos de estrutura molecular, estabilidade, elasticidade, perfil de antigenicidade e imunogenicidade (Alcaide-Ruggiero et al., 2021).

A formação de colágeno ocorre de forma contínua no organismo, sendo especialmente intensa durante o desenvolvimento embrionário e nos processos de regeneração tecidual. Os fibroblastos secretam moléculas de colágeno na forma de procolágeno solúvel, que apresenta duas estruturas globulares de peptídeos nas extremidades contendo nitrogênio (N-) e carbono (C-). O procolágeno é produzido no aparelho de Golgi, armazenado em vesículas e, em seguida, liberado para a matriz extracelular. Na matriz, as enzimas C- e N-peptidases atuam para remover as estruturas globulares das extremidades do procolágeno, um passo necessário para iniciar a fibrogênese. Após essa clivagem, forma-se o tropocolágeno, que começa a se associar a outras moléculas de tropocolágeno, formando fibrilas. As moléculas de tropocolágeno se organizam em uma conformação helicoidal, unindo-se lado a lado por meio de interações hidrofóbicas e eletrostáticas, o que estabiliza a estrutura (Lehninger, 1995; Damodaran et al. 2000).

As ligações peptídicas participam da formação das ligações cruzadas covalentes intermoleculares entre as cadeias, resultantes da interação entre grupos aldeídos e aminos livres. Essas ligações cruzadas conferem à estrutura supramolecular a estabilidade e a força tensora necessárias (Figura 9). Quatro resíduos-chave estão envolvidos no início das ligações das cadeias do tropocolágeno: dois resíduos de lisina ou hidroxilisina localizados nos peptídeos com N-terminal e dois resíduos de lisina ou hidroxilisina nos peptídeos com C-terminal. O arranjo das moléculas de tropocolágeno em uma configuração cabeça-cauda-torso permite a interação entre os peptídeos de N-terminal e os peptídeos adjacentes de C-terminal (Lehninger, 1995; Damodaran et al. 2000).

Figura 9: Processo de formação, organização e estrutura de colágeno.



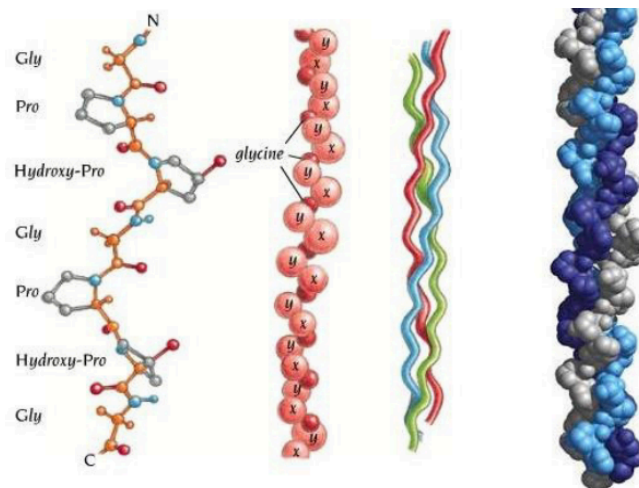
Fonte: adaptado de Damodaran; Parkin; Fenema2 ; Klug e Cumming9 apud Saeidi, 2009

Os aminoácidos hidroxilisina e hidroxiprolina, presentes na estrutura do colágeno, não são sintetizados diretamente, mas formados por hidroxilação da prolina e lisina, respectivamente. Esse processo começa nos ribossomos durante a tradução do mRNA do colágeno e é concluído após a formação da estrutura linear. As fibrilas de

colágeno são constituídas por agregados de moléculas de colágeno alinhadas ao longo de um eixo paralelo, com as extremidades sobrepostas de forma a produzir bandas de 70 nm. Essas fibrilas se agrupam para formar as fibras de colágeno, que se organizam em feixes (Linden et al. 2000).

A molécula de colágeno é composta por três cadeias de polipeptídeos entrelaçadas, conhecidas como cadeias alfa. Essas cadeias são enroladas para formar uma estrutura estável e rígida conhecida como tripla hélice. A estrutura do colágeno (Figura 10), portanto, apresenta uma conformação de tripla hélice, composta por três cadeias α polipeptídicas que se posicionam em torno de um eixo central. Essa conformação da tripla-hélice dá-se pela repetição de domínios glicina (GLY) – “X” – “Y”, onde “X” e “Y” são prolina e hidroxiprolina (Sionkowska *et al* 2020).

Figura 10: Estrutura do colágeno



Fonte: ISIC, 2017.

A unidade básica do colágeno é denominada tropocolágeno, formado por três polipeptídeos separados, chamados de cadeias α , que são super torcidos uns sobre os outros. As cadeias α podem ser idênticas ou podem apresentar diferenças na sequência de aminoácidos, dependendo do tipo de colágeno. A tripla hélice é estabilizada por ligações de hidrogênio intercadeias e sua torção super-helicoidal tem sentido horário, oposto ao das cadeias α (Qi et al., 2022; Hulgán & Hartgerink, 2022).

Cada cadeia alfa do colágeno é composta por uma sequência repetitiva de aminoácidos (Tabela 3). A presença dos aminoácidos glicina, prolina e hidroxiprolina é fundamental para a estabilidade e estrutura do colágeno (Sionkowska, 2020). A glicina é responsável por aproximadamente um terço dos resíduos de aminoácidos de cada cadeia alfa e é necessária devido ao seu tamanho reduzido, o que permite que as cadeias se embalem de maneira compacta (Sionkowska, 2020). A prolina e a hidroxiprolina, por sua vez, são importantes devido aos seus grupos funcionais que formam pontes de hidrogênio intramoleculares, contribuindo para a estabilidade do colágeno (Salo & Myllyharju, 2020). O teor de hidroxiprolina varia de acordo com o tipo de tecido e a espécie animal de origem, refletindo diretamente na quantidade e na qualidade do colágeno extraído. Esse parâmetro é fundamental para determinar o comportamento funcional do colágeno, impactando características como estabilidade térmica, solubilidade e, em alguns casos, propriedades antioxidantes (Akita et al., 2020; Taga et al., 2021).

Tabela 3: Conteúdo de aminoácidos do colágeno tipo 1 na pele de mamíferos e do pescado.

Aminoácido	Abundância na pele de mamíferos (resíduos/1000)	Abundância na pele de peixes (resíduos/1000)
Alanina	11	11.9
Arginina	5	5.8
Asparagina	5	4.2
Glutamina	7	6.9
Glicina	33	35.6
Histidina	0.5	0.6
Isoleucina	1	0.8
Leucina	2	2
Lisina	2	2
Metionina	0.6	0.5
Fenilalanina	1	1.3
Prolina	13	12.8
Serina	4	3.2
Treonina	2	2.2
Triptofano	2	0
Tirosina	0.3	0.3

Valina	2	2
4-hidroxiprolina	8.6	8.2
Total	100	100

Fonte: Adaptado de Serrano (2011)

A estrutura das fibrilas de colágeno é caracterizada por agregados de moléculas de colágeno alinhadas ao longo de um eixo paralelo (McCluskey et al., 2020). Essas moléculas se sobrepõem de forma regular, resultando em bandas distintas com um espaçamento de aproximadamente 70 nanômetros entre elas. Essas fibrilas, por sua vez, se agrupam para formar as fibras de colágeno, que se organizam em feixes mais amplos. Essa organização altamente ordenada é essencial para conferir resistência e integridade estrutural aos tecidos onde o colágeno está presente (Mienaltowski et al., 2021; Hafner et al., 2020).

O colágeno, como elemento fundamental da Matriz Extracelular (MEC), forma a maior parte do microambiente celular natural. A MEC pode ser descrito como um hidrogel composto por múltiplos componentes que atuam essencialmente para conectar as células, exemplificando sua função de adesão e suporte (Hayrapetyan & Sarvazyan, 2020)

Na formação da MEC, que exhibe propriedades distintivas tais como elevadas flexibilidades, elasticidade, resistência, tração, biodegradabilidade e biocompatibilidade, o colágeno se destaca como um dos principais componentes. Este é responsável pelas características mencionadas anteriormente e pela constituição do tecido conjuntivo nos vertebrados (Jiménez-Gastélum et al., 2019; Nuñez et al., 2020).

As proteínas colagenosas podem ser classificadas em duas categorias principais: colágenos formadores de fibrilas (fibrilares) e colágenos não fibrilares. Os colágenos fibrilares, que incluem os tipos I, II, III, V e XI, são responsáveis por conferir resistência (tensão) aos tendões, ligamentos e pele (Tabela 4). Por outro lado, os colágenos não fibrilares, ou formadores de rede, desempenham um papel crucial na estrutura das membranas basais, sendo componentes essenciais dessas estruturas (Mienaltowski et al., 2021; Halper, 2021; Oliveira et al., 2021).

Tabela 4: Principais tipos de colágeno no organismo.

Tipo	Classe	Distribuição
I	Fibrilar	Amplamente distribuído, incluindo pele, tendões, ossos e coração
II	Fibrilar	Cartilagem, córnea em desenvolvimento e humor vítreo
III	Fibrilar	Tecido conjuntivo extensível, p. ex., pele, pulmão e sistema vascular
IV	Rede	Membranas basais, rim e parede vascular
V	Fibrilar	Fígado, córnea e mucosa
VI	Filamentos com domínios globulares	Maioria dos tecidos conjuntivos
IX	*Facit	Cartilagem, humor vítreo
XI	Formador de fibrila	Cartilagem, osso, placenta
XII	*Facit	Tendão embrionário, pele
XIII	Com domínio trans membrana	Amplamente distribuído
XIV	*Facit	Pele fetal e tendões

*FACIT, colágenos associados à fibrila com triplas hélices interrompidas.

Fonte: Adaptado de Baynes *et al.* (2015).

O colágeno dispõe de uma variedade estrutural supramolecular, fazendo parte de andaimes mecânicos e suporte natural das células, sendo este abundante em animais. De acordo com Wlodarczyk-Biegun e Del-Campo (2017), o colágeno...

...“constitui aproximadamente 25% do peso seco do corpo humano. Existem mais de 20 diferentes tipos de colágeno, todos eles com a hélice tripla como motivo de estrutura quaternária. Os colágenos formam diferentes montagens supramoleculares, mas principalmente o colágeno formador de fibrilas tipo I é aplicado no campo dos biomateriais. As fontes mais comuns de colágeno são cauda de rato, pele bovina, tendões e pele de porco. Recentemente, o colágeno (humano) é produzido de forma recombinante ganhou interesse no campo da pesquisa”

A estrutura do colágeno é semelhante a um bastão, medindo aproximadamente de 280 a 300 nanômetros de comprimento e 1,5 nanômetros de diâmetro. Sua massa molecular é de 300 kDa e é mantida estável por meio de pontes de hidrogênio e ligações entre moléculas. Portanto, a sequência dos aminoácidos que estão no colágeno é na sua grande maioria unidades por tripeptídicas, Glicina - X - prolina, hidroxiprolina - X - glicina, podendo ser X qualquer um dos 20 tipos de aminoácidos padrões. Cada molécula de colágeno poderá ter até três cadeias diferentes que se juntam para compor o procolágeno (FIGUEIREDO, 2015; GAUZA-WŁODARCZYK; KUBISZ; WŁODARCZYK, 2017).

A constituição e formação de cada tipo de colágeno será diferenciado mediante a sequência de aminoácido, estrutura e função que desempenha, com um papel fundamental para estruturação, formação, estabilidade, integralidade e manutenção dos sistemas e órgãos do corpo humano (Pati et al., 2012; Liu et al., 2015).

As cadeias, conhecidas como "cadeias α ", se assemelham a uma corda em forma de tripla hélice. A conformação e tipo específico dessas cadeias, chamadas de "alfa e beta", são determinadas pela fórmula estrutural do colágeno e pela função que desempenham em cada órgão ou estrutura do organismo. Essa conformação única do colágeno é fundamental para a integridade e resistência dos tecidos em diversos seres vivos (Ferreira, 2020).

O colágeno é uma biomolécula sensível ao calor e a meios ácidos, sendo, portanto, uma proteína termoinstável. Essa sensibilidade está relacionada à sua estrutura química, especialmente ao conteúdo de hidroxiprolina, que influencia diretamente sua estabilidade térmica — quanto maior a quantidade desse aminoácido, maior a estabilidade. Isso se deve à formação de pontes de hidrogênio entre cadeias, estabilizando a tripla hélice da proteína.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de reaproveitamento de resíduos da indústria do couro por meio da extração e caracterização do colágeno, com o intuito de promover a sustentabilidade ambiental e agregar valor à cadeia produtiva.

3.1 Objetivos Específicos

- Analisar o papel da caprinocultura como atividade estratégica para o desenvolvimento econômico regional, considerando geração de renda, inclusão social e redução da vulnerabilidade socioambiental no semiárido;
- Identificar as formas de obtenção de colágeno proveniente dos resíduos industriais e suas aplicações sustentáveis;
- Extrair colágeno a partir dos resíduos de pele de caprinos proveniente de curtumes;
- Caracterizar o colágeno extraído, utilizando técnicas como SDS-PAGE, FTIR, espectroscopia UV-vis, análise térmica (DSC/TGA) e microscopia, para avaliar pureza, integridade e propriedades funcionais;

REFERÊNCIAS

- ABICALÇADOS. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE CALÇADOS. Relatório setorial: Indústria de calçados do Brasil, 2022. Disponível em: <http://abicalcados.com.br/publicacoes/relatorio-setorial>. Acesso em: 11 jan. 2023.
- AGUIAR, G. P.; LIMBERGER, Guilherme Martins; DA SILVEIRA, Éderson Luís. Alternativas tecnológicas para o aproveitamento de resíduos provenientes da industrialização de pescados. 2014.
- ALCAIDE-RUGGIERO, Lourdes; MOLINA-HERNÁNDEZ, V.; GRANADOS, M.; DOMÍNGUEZ, J. M. Principais e menores tipos de colágenos na cartilagem articular: o papel dos colágenos na avaliação do reparo tecidual em defeitos condrais. Revista Internacional de Ciências Moleculares. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms222413329>. Acesso em: 12/09/2024
- ALVES, V.; BARBOSA, Agnaldo de Sousa. Práticas de gestão ambiental das indústrias coureiras de Franca-SP. Revista de Administração da Universidade de São Paulo, v. 48, n. 3, p. 570-582, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2013005000006>.
- BARBOSA, R. F.; XAVIER, R. Diagnóstico da caprinovinocultura no Cariri Ocidental da Paraíba (PB): estudo de caso de 2005 a 2015. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 13, n. 8, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2018.008.0017>. Acesso em: 18/09/2024.
- BAYONA, Javier Enrique Vargas; MARTÍNEZ, L. Z.; BERMEJO, J. V. D.; GALVÁN, G. *Biodiversidad caprina iberoamericana*. 2016. DOI: <https://doi.org/10.16925/9789587600674>.
- BERTOLINI, F.; SERVIN, B.; TALENTI, A.; ROCHAT, E.; KIM, Eui-soo; OGET, Claire; PALHIÈRE, I.; CRISÀ, A.; CATILLO, G.; STERI, R.; AMILLS, M.; COLLI, L.; MARRAS, G.; MILANESI, M.; NICOLAZZI, E.; ROSEN, B.; VAN TASSELL, C. V.; GULDBRANDTSEN, B.; SONSTEGARD, T.; TOSSER-KLOPP, G.; STELLA, A.; ROTHSCCHILD, M.; JOOST, S.; CREPALDI, P. Assinaturas de seleção e adaptação ambiental ao longo do genoma de caprinos pós-domesticação. Evolução da Seleção Genética, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12711-018-0421-y>. Acesso em: 19/09/2024.
- BITENCOURT, G. D. A.; DEKNES, Luzia Barcelos; LAURA, Valdemir Antônio. Crescimento de mudas de eucalipto em solo com aplicação do lodo de curtume. Scientia Plena, v. 18, n. 3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2022.034901>. Acesso em: 19/09/2024.

BNB/Etene – Banco do Nordeste do Brasil. *Estudo Setorial: Indústria do Couro e Calçados*. Dados do Ministério da Economia. Fortaleza: Etene, 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto Federal n. 30.691, de 29 de março de 1952 (e suas atualizações). Aprova o novo Regulamento da Inspeção Industrial e Sanitária de Produtos de Origem Animal. Sislegis: Módulo da Legislação Agropecuária, DOU 07 de julho de 1952. Disponível em: . Acesso em: 25 set. 2023.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. DIPOA. Resolução n. 5, de 23 de janeiro de 2003. Determina as Instruções Operacionais, constantes dos Anexos a serem utilizados 124 pelos estabelecimentos industriais que transformem peles em couro (curtumes), das diversas espécies animais ou que tenham, entre outros objetivos, a obtenção de matéria prima destinada às indústrias produtoras de gelatina, na obtenção do relacionamento no DIPOA. Sislegis: Módulo da Legislação Agropecuária, DOU 24 de janeiro de 2003. Disponível em: . Acesso em: 11 ago. 2024.

_____. Ministério do Meio Ambiente. IBAMA. Instrução Normativa n. 13, de 18 de dezembro de 2012. Publica a Lista Brasileira de Resíduos Sólidos. Diário Oficial [da] União: República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, n. 245, 20 dezembro 2012. Seção 1, p. 200. Disponível em: . Acesso em: 26 jul. 2024.

CASTANHA, Ana Amélia Albuquerque de Oliveira. *Indústria do Couro na "Roliúde Nordestina"*. Labor e Engenho, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20396/labore.v13i0.8656100>.

CICB – Centro das Indústrias de Curtumes do Brasil. *Relatório Setorial do Couro Brasileiro 2017*. Brasília: CICB, 2017.

CICB – Centro das Indústrias de Curtumes do Brasil. *Relatório Setorial do Couro Brasileiro 2021*. Brasília: CICB, 2021.

CLAAS, I. C.; MAIA, R. A. M. Manual básico de resíduos industriais de curtume. Porto Alegre, SENAI, 1994.

CONCEIÇÃO, M.; BICALHO JÚNIOR, George Cesar Rocha; SANTOS, C.; SANTOS, Washington Aleksander Savaris dos; SILVA, John Enzo Vera Cruz da; COSTA, Ricardo Sousa; TAVARES, Luan Silva; DIAS, Samille Conceição; GUEDES, Fagner Lopes; SILVA, Nathália de Sousa; STEFANELLI, Wilson Fernando Rodrigues; BARROSO, Larissa Lopes; SILVA, Marília Palheta da. Diagnóstico dos resíduos sólidos de um abatedouro frigorífico. Revista Brasileira de Desenvolvimento, [S.l.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-324>. Acesso em: 8 mar. 2025.

CORDEIRO, Noéle Khristinne; CARDOSO, Kerolém Prícila Sousa; MATA, Tatiane Calandrino da; BARBOSA, Jaqueline de Araújo; GONÇALVES, A. C. Gestão de resíduos agrícolas como forma de redução dos impactos ambientais. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18316/rca.v14i2.5593>. Acesso em: 25 set. 2023.

COSTA, W.; PANDOLFI, M. Análise de viabilidade de produção de leite de cabra por meio da ferramenta SWOT. *Revista Interface Tecnológica*, v. 18, n. 2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.31510/infa.v18i2.1249>. Acesso em: 19/09/2024.

DAMODARAN S, PARKIN KL, FENNEMA OR. *Química de alimentos de Fennema*. 4. ed. Porto Alegre (RS): Artmed; 2010.

DIAS, Weslla da Silva; CABRAL, Ana Maria Duarte; ALBURQUERQUE, Héldon José Oliveira; NASCIMENTO, Thiago Lucas Freire; ALBURQUERQUE, Hildelberg Oliveira; SANTOS, Marcos Vinícios Vieira dos. Comercialização e consumo de produtos da caprinovinocultura na cidade de Belém do São Francisco – PE. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar*, [S.l.], v. 4, n. 3, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i3.2905>. Acesso em: 8 mar. 2025.

EXACTITUDE CONSULTANCY. Mercado de colágeno: tamanho, participação, oportunidades, tendências e previsão. Disponível em: <https://exactitudeconsultancy.com/pt/reports/36672/collagen-market/>. Acesso em: 8 mar. 2025.

FARIAS, F. J.; SOUZA, A. P.; GOMES, E. R. Tratamento de efluentes de curtume para uso agrícola. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 27, n. 3, p. 274-282, 2023.

FELISBERTO, N. R. D. O.; OLIVEIRA, L. S.; CORDEIRO, A. Sistemas de produção de leiteiros caprinos. In: *WORKSHOP SOBRE PRODUÇÃO DE CAPRINOS NA REGIÃO DA MATA ATLÂNTICA*, 13., 2016, Coronel Pacheco. *Anais....* Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos; Coronel Pacheco: Embrapa Gado de Leite, 2016. p. 11-35.

FERRARI, Walter Alves, 1947-2012. Guia técnico ambiental de curtumes [recurso eletrônico] / Walter Alves Ferrari (in memoriam), José Wagner Faria Pacheco ; grupo de trabalho Hellen Cecília de Julli Ravacci ... [et al.] ; contribuições Alexandre Martin Martines ... [et al.]. – 2. ed. rev. atual. a partir da 1ª ed. publ. em 2005. – São Paulo : CETESB, 2015.

FERREIRA, M. F. Extração e caracterização de gelatina proveniente de subprodutos do frango: PÉS. p. 48, 2013.

FERREIRA, C. et al. Potencial de produção de colágeno a partir de escamas de tilápia no Oeste do Paraná. *Revista Brasileira de Pesca*, v. 14, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.37885/200400081>. Acesso em: 15 set. 2024.

FIGUEIREDO, G. I. Universidade Federal Do Ceará Centro de Ciências Departamento De Química Orgânica e Inorgânica Programa De Pós-Graduação em Química. Fortaleza - CE, 2015.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Leather Industry Dynamics: A Global Perspective*. Rome: FAO, 2022.

GAUZA-WŁODARCZYK, M.; KUBISZ, L.; WŁODARCZYK, D. Amino acid composition in determination of collagen origin and assessment of physical factors effects. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 104, n. Pt A, p. 987– 991, nov. 2017.

GONÇALVES, G. R.; OLIVEIRA, Maria Auxiliadora Silva; MOREIRA, Raulzito Fernandes; BRITO, Daniel Barbosa de. Benefícios da ingestão de colágeno para o organismo humano. 2015.

GONÇALVES, L. R.; PEREIRA, R. M.; ALMEIDA, S. T. A compostagem de lodo de curtume como alternativa para a fertilização do solo. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 41, n. 4, p. 1125-1133, 2020.

GUILHERME, R.; LIMA, A.; ROMERO, José; ALVES, Alexandre; COSTA, D. F.; PINHEIRO, R. R.; ALVES, F.; AZEVEDO, S. S.; ALVES, C. J. Caracterização e tipologia de sistemas de produção de ovinos e caprinos no Estado da Paraíba, região semiárida do nordeste do Brasil. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017V38N4P2163>. Acesso em: 18/09/2024.

GUILHERME, R.; LIMA, A.; ROMERO, José; ALVES, Alexandre; COSTA, D. F.; PINHEIRO, R. R.; ALVES, F.; AZEVEDO, S. S.; ALVES, C. J. Caracterização e tipologia de sistemas de produção de ovinos e caprinos no Estado da Paraíba, região semiárida do nordeste do Brasil. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017V38N4P2163>. Acesso em: 18/09/2024.

HAFNER, Anne E. et al. Modelagem da fibrilogênese de moléculas miméticas de colágeno. *bioRxiv*, 2020.

HAYRAPETYAN, L.; SARVAZYAN, N. Matriz extracelular e moléculas de adesão. In: *Avanços em Medicina Experimental e Biologia*. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39698-5_3. Acesso em: 12 set. 2024.

HULGAN, S. A.; HARTGERINK, J. Avanços recentes na estrutura e design do peptídeo mimético de colágeno. *Biomacromoléculas*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.2c00028>. Acesso em: 12 set. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Pesquisa Industrial Anual: Produto – 2019*. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

IBGE– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2017. 2018. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 02 set. 2024.

JIMÉNEZ-GASTÉLUM, G.; AGUILAR-MEDINA, E. M.; SOTO-SÁINZ, Eduardo; RAMOS-PAYÁN, R.; SILVA-BENÍTEZ, E. Propriedades antimicrobianas de andaimes de matriz extracelular para engenharia de tecidos. *Pesquisa BioMed Internacional*. (2019). Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/9641456>. Acesso em: 12/09/2024.

KINGS RESEARCH. Tamanho, participação e crescimento do mercado de colágeno. Disponível em: <https://www.kingsresearch.com/pt/collagen-market-713>. Acesso em: 8 mar. 2025.

JÚNIOR, J. M. Geração de produtos biotecnológicos de interesse utilizando resíduos agroindustriais: uma revisão. 2020.

LEANDRO, Leonardo Milanez de Lima; SOARES, M. L.; BATISTA, Pérciles Delmondes. Jornais como fonte para o estudo da economia de couros e peles na Amazônia. 2020.

LEHNINGER AL. Princípios de bioquímica. 2. ed. São Paulo (SP): Sarvier; 1995.

LIMA, Douglas Costa; ANDREAZZI, M.; GONÇALVES, J.; BELLO, José Roberto; MARDIGAN, Laura Paulino; LIZAMA, M.; TOMA, A.; SOUZA, Hellen Valéria de. Estudo sobre a hidrólise da α -queratina presente no pelo de cachorro. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 13, n. 2, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2022.002.0015>. Acesso em: 19/09/2024.

LIMA, R. C. et al. Utilização de resíduos da indústria de couro como fonte de nutrientes para as plantas cultivadas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 4, p. 1057-1065, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/tqRkZSSr5Bd476y8ZKJ8dpH/>. Acesso em: 8 mar. 2025.

LINDEN G, Lorient D. *New ingredients in food processing: biochemistry and agriculture*. Boca Raton (FL): CRC Press; 2000.

LISBOA, C.; LIMA, Francielle Roberta Dias de; REIS, Rayner Hugo Louzado dos; SILVA, C.; MARQUES, J. J. Taxa de mineralização do nitrogênio de resíduos orgânicos. *Cultura Agronômica*, v. 27, n. 2, p. 341-355, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.32929/2446-8355.2018V27N2P341-355>. Acesso em: 19/09/2024.

LIU, D., et al. (2015). "Extraction and characterization of acid-soluble collagens from the skins of four different freshwater fish species." *Food Hydrocolloids*, 46, 48-55.

LIU, Xinhua; ZHENG, Manhui; WANG, Xuechuan; LUO, Xiaomin; HOU, Mengdi; YUE, Ouyang. Biofabrication and characterization of collagens with different hierarchical architectures. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, v. 5, n. 12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.9b01252>. Acesso em: 19/09/2024.

LOPES, J. V. F.; SILVA, F. L.; LIMA, L. D. Aproveitamento de resíduos da indústria do couro para a produção de colágeno: uma revisão. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 5, p. 353-358, 2018. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/de826448-c85f-4c33-8638-b0357702f35c/download>. Acesso em: 8 mar. 2025.

LOPES, Roslen Mara; RODRIGUES, Vanessa Carvalho; AMARAL, Kassia Ayumi Segawa do; ALMEIDA, Edson Araujo de; GONZALEZ, Regiane da Silva. Aproveitamento de resíduos industrial de frango de corte para extração e aplicação do colágeno em iogurte. *Anais do II Congresso Euroamericano de Procesos y Productos Alimentarios*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/1334782.2-7>. Acesso em: 25 set. 2023.

LUNA, Francisco Vidal; KLEIN, Herbert S. A evolução da pecuária bovina no Brasil. *História Econômica & História de Empresas*, v. 26, n. 3, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.29182/hehe.v26i3.914>. Acesso em: 19/09/2024.

MAJEE, S.; HALDER, G.; MANDAL, Dalia Dasgupta; TIWARI, O.; MANDAL, T. Transformando couro azul úmido e casca de batata em um fertilizante NPK bio-orgânico ecológico para intensificar a produtividade das culturas e recuperar sais de cromo recicláveis de valor agregado. *Jornal de Materiais Perigosos*, v. 417, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125046>. Acesso em: 19/09/2024.

MEIRA, Ana Clara Gonçalves Alves de; ALMEIDA, Romário de Sousa; BARBOSA, Rubens Barrichello Gomes; SILVA, Débora Rafaelly Soares; LIMA, Kaique Muniz Alvares de; MOURA, Luzia Batista. Impactos socioambientais gerados no curtimento do couro no Semiárido Paraibano. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 10, n. 10, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18894>. Acesso em: 19/09/2024.

MENDES JUNIOR, B.O., XIMENES, L.F. (2021). Produção e perspectiva do setor de couro e calçados do Brasil, Nordeste, Ceará, Bahia. *Caderno Setorial ETENE*, ano5, nº 148, 2021. https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/647/1/2021_CDS_148.pdf.

MENDES JUNIOR, Biagio de Oliveira; XIMENES, Luciano F. Produção e perspectiva do setor de couro e calçados do Brasil, Nordeste, Ceará e Bahia. *Fortaleza: Caderno Setorial ETENE*, 2021.

MIENALTOWSKI, M. et al. Estrutura Básica, Fisiologia e Bioquímica de Tecidos Conjuntivos e Colágenos de Matriz Extracelular. In: *Avanços em Medicina Experimental e Biologia*, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-80614-9_2. Acesso em: 12 set. 2024.

MONTEIRO, Antônio Oliveira; FIGUEIREDO, Caio Franklin Vieira de; SOUSA, Glaucio de Meneses; FORMIGA, Aliane Cristiane de Sousa; OLIVEIRA, Francisco Fabrício Damião de; OLIVEIRA, P.; NASCIMENTO, R.; LEITE, Ana Carolina Nóbrega; LEITE, José Cleidimário Araújo. Avaliação do impacto ambiental de um curtume. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 11, n. 8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.28584>. Acesso em: 25 set. 2023.

MONTEIRO, Maicon Gonçalves; BRISOLA, M.; FILHO, J. V. *TD 2660 - Diagnóstico da Cadeia Produtiva de Caprinos e Ovinos no Brasil*. Texto para Discussão, 2021. DOI: <https://doi.org/10.38116/td2660>.

MOURA, S. G.; COSTA, M. A.; LIMA, C. M. Reuso de efluentes de curtume em processos industriais: análise de viabilidade econômica. *Revista de Engenharia Ambiental*, v. 35, n. 1, p. 95-104, 2020.

MUTHUKUMAR, T.; SREEKUMAR, G.; SASTRY, T.; CHAMUNDEESWARI, M. Colágeno como um biomaterial potencial em aplicações biomédicas. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/rams-2018-0002>. Acesso em: 25 set. 2023.

NAGAI, T., Tanoue, Y., Kai, N., Suzuki, N., 2015. Caracterização do colágeno de peles de ema (*Dromaius novaehollandiae*). *J. Food Sci. Technol.* 52, 2344-2351. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4375231/>.

NASCIMENTO, Maria Izabel de Souza Sá; FERREIRA, F.; ALBUQUERQUE, H. J. O.; NASCIMENTO, Thiago Lucas Freire; ALBUQUERQUE, H.; CABRAL, Ana Maria Duarte; SILVA, Lucas Florencia da; SANTOS, Maria Josilaine Matos dos; BARRETO, Lígia Maria Gomes; LIMA, Viviana Rivieri da Silva; SANTOS, Girlene Cordeiro de Lima. Insights dos principais produtos oriundos da caprinovinocultura no Nordeste brasileiro. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 11, n. 5, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28264>.

NEHRING, Cláudio; FABRE, Valquíria Vieira. Modelagem da cadeia produtiva do couro onde a bovinocultura é leiteira. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, v. 14, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3895/RBTA.V14N1.10115>. Acesso em: 19/09/2024.

NOGUEIRA, Gabriella Elisa Silva; SILVA, K.; SACZK, A. A.; RIBEIRO, André Geraldo Cornélio. A geração de resíduos sólidos por curtumes e alternativas de tratamento e reúso. *Gestão & Tecnologia*, v. 6, n. 1, p. [página inicial]-[página final], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.9771/GESTA.V6I1.22077>.

OLIVEIRA, Aparecida de Fátima Medella de; DESTEFANI, Jéssica Delesposte. Recursos genéticos de caprinos: cenário e sustentabilidade. Revista Ifes Ciência, v. 7, n. 3, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36524/ric.v7i3.1515>. Acesso em: 19/09/2024.

OLIVEIRA, Nayara Rosa; SILVA, Ivanilde Almeida Da; PINTO, R. R. Colágeno: uma breve revisão / Collagen: a brief review. Revista Brasileira de Desenvolvimento, v. 7, n. 11, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n11-112>. Acesso em: 19/09/2024

PACHECO, J. W. F. Curtumes. São Paulo, CETESB, 2005. (Série P+L). Disponível em: . Acesso em: 12/04/2024.

PARRAGUEZ, V. H.; PERALTA, O.; SALES, Francisco. Reprodução de pequenos ruminantes em ambientes extremos. Revista Brasileira de Reprodução Animal, v. 45, n. 4, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21451/1809-3000.rbra2021.062>. Acesso em: 19/09/2024.

PATI, F.; ADHIKARI, B.; DHARA, S. Isolation and characterization of fish scale collagen of higher thermal stability. Bioresource Technology, v. 101, n. 10, p. 3737–3742, 2010.

PENHA, R. S.; MOREIRA, Lucy Rose de Maria Oliveira; CARDOSO, J. F.; BEZERRA, C. Preparação de novos materiais à base de colágeno pisce e quitosan. Revista Gestão Inovação e Tecnologias, v. 9, n. 3, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.7198/GEINTEC.V9I3.1080>. Acesso em: 20/10/2023.

PEREIRA, J. T.; LIMA, C. A.; MARTINS, L. L. O uso de lodo de curtume como fertilizante no cultivo de hortaliças. Agricultural Waste Management Journal, v. 38, p. 155-162, 2022.

PIMENTEL NETO, José Geraldo; OLIVEIRA, Heitor Salvador de; SILVEIRA, Keilha Correia da. Desenvolvimento local-regional no Nordeste Brasileiro: um estudo situacional do arranjo produtivo local de caprinovinocultura de Pernambuco. Revista Contexto Geográfico, [S.l.], v. 3, n. 6, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.28998/CONTEGEO.V3I6.6719>. Acesso em: 8 mar. 2025.

PRESTES, R.C. Colágeno e seus derivados: características e aplicações em produtos cárneos. Revista Unopar Científica Biológicas e da Saúde, v.15, n.1, p.65-74, 2013.

PRINGLE, Tegan; BARWOOD, Michael J.; RAHIMIFARD, Shahin. The challenges in achieving a circular economy within leather recycling. Procedia CIRP, Leicester, v.48, p.544-549, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116303006>. Acesso em: 25 set. 2023.

QUEIROZ, Verônica Freire; OLIVEIRA, A.; ALMEIDA, Ana Paula Ferreira de; MOURA, Kerliana Paula Amorim de; MIRANDA, K. W.; MENDES, Luana Guabiraba; MONTE, Antônia Lucivânia de Sousa. Carne caprina e sua utilização na elaboração de produtos cárneos: uma revisão. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 10, n. 9, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/RSD-V10I9.17648>. Acesso em: 18/09/2024.

REIS, N. P. dos; e Garcia, R. L. (2012), Sistema de gerenciamento dos resíduos industriais e o controle ambiental, em Philippi JR., A. (coord.), Política nacional, gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, Manole, São Paulo.

RIBEIRO, K. A.; ALENCAR, C. M. M. Desenvolvimento territorial e a cadeia produtiva da caprinovinocultura no semiárido baiano: o caso do município de Juazeiro-BA. *Revista Baru-Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos*, v. 4, n. 1, p. 144-179, jan.-jun. 2018.

RIGUETO, Cesar Vinicius Toniciolli; ROSSETO, M.; ALESSANDRETTI, Ingridy; DE OLIVEIRA, R. D.; WOHLMUTH, Daniela Alexia Raber; MENEZES, Juliana Ferreira; LOSS, R. A.; DETTMER, A.; PIZZUTTI, I. Filmes de gelatina de resíduos: uma revisão das tendências de produção, caracterização e aplicação na preservação de alimentos e agricultura. *Pesquisa Alimentar Internacional*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112114>. Acesso em: 25 set. 2023.

RODRIGUES, P. R.; SILVA, M. R.; COSTA, E. B. Bioremediação de efluentes de curtume para produção de biogás: avaliação de desempenho. *Journal of Environmental Technology*, v. 54, n. 2, p. 87-94, 2021.

RODRIGUEZ, M.; Silva, J. *Environmental Policies and Labor Costs in the Global Leather Industry. Sustainability and Industry*, v. 12, n. 4, p. 201-215, 2023.

RUIZ GUAJALA, Mery Esperanza; MAYORGA ABRIL, César Medardo; MANTILLA FALCÓN, Luis Marcelo; LÓPEZ CHALÁN, Patricia Alexandra. Gestión económica ambiental del sector curtiembre de Ambato. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.22287/AG.V11I7.330>. Acesso em: 12/04/2024.

SALO, A. M.; MYLLYHARJU, J. Prolil e lisil hidroxilases na síntese de colágeno. *Dermatologia Experimental*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/exd.14197>. Acesso em: 12 set. 2024.

SANTOS, V. A. C.; SILVA, S. R.; AZEVEDO, J. M. T. Carcass and meat quality attributes of equally mature kids and lambs. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 36, n. 3, p. 743-749, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbz/a/pBn63PM6rgv6fmdtyjB4DVF/>. Acesso em: 8 mar. 2025.

SANTOS, Pedro Vieira Souza; ARAÚJO, Maurílio Arruda de. A metodologia de produção mais limpa (P+L): um estudo de caso em uma indústria de curtume. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e12020524-547>. Acesso em: 12/04/2024.

SANTOS, Anderson Lima dos; MORAIS, Leandro Cardoso de. Gestão de resíduos sólidos em matadouro regional situado em Juazeiro do Norte – CE. *Contribuciones a las ciencias sociales*, [S.l.], 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.11-025>. Acesso em: 8 mar. 2025.

SANTOS, Willyane de Souza; ALBUQUERQUE, H. J. O.; ALBUQUERQUE, H.; CABRAL, Ana Maria Duarte; FERREIRA, Fernando da Costa; SÁ SANTOS, Edja Sabrina; Nascimento, Maria Izabel de Souza Sá; SANTOS, Girlene Cordeiro de Lima. Diagnóstico da cadeia produtiva de caprinos e ovinos no Brasil e na região Nordeste. *Revista Brasileira de Desenvolvimento*, v. 9, n. 7, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv9n7-006>. Acesso em: 19/09/2024.

SCHNEIDER, Thaissa; FERNANDES, Karolyne Mylena Behling; PEREIRA, Laura Pedri. O couro e suas alternativas: uma análise do seu uso no mercado da moda. *Revista E-Tech Tecnologias para Competitividade Industrial*, v. 15, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.18624/etech.v15i1.1192>. Acesso em: 18/09/2024.

SERRANO, Gaona JC. Estandarización de un proceso de extracción de colágeno a partir de los residuos de fileteo de tilapia (*Oreochromis* sp) y cachama (*Piaractus brachypomus*) / Standardization of a process for extracting collagen from filleting waste from tilapia (*Oreochromis*); 2011.

SILVA, A. F.; GOMES, P. L.; FERREIRA, V. M. Utilização de lodo de curtume na compostagem para recuperação de solo. *Revista de Pesquisa Ambiental*, v. 52, n. 1, p. 131-139, 2021.

SILVA, Alencar Viviane Do Nascimento E; SILVA, B.; PAJEÚ, Nascimento Thiago; DA CUNHA, Marcia Nieves Carneiro; LEITE, Ana Cristina Lima. Resíduos agroindustriais: uma alternativa promissora e sustentável na produção de enzimas por microrganismos. In: *CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO: DO CAMPO À MESA*. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.31692/iciagro.2020.0478>. Acesso em: 25 set. 2023.

SILVA, Jéssica Costa da; COSTA, Beatriz de Aquino Marques da; LINO, Luiz Henrique Svintistkas; OLIVEIRA, Vagne de Melo; PORTO, Ana Lúcia Figueiredo. Colágeno, gelatina e suas aplicações na indústria alimentícia: uma visão geral focando na matéria-prima da piscicultura. In: *CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO: DO CAMPO À MESA*. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.31692/iciagro.2020.0343>. Acesso em: 20/10/2023.

SILVA, Larissa Alencar da; CARNEIRO, Jorgina Skarlet Silva; CARNEIRO, Vinicius Mendes Souza. Disfunções estruturais associadas ao decaimento do colágeno em mulheres a partir dos 30 anos. *RECISATEC - Revista Científica Saúde e Tecnologia*, v. 2, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.53612/recisatec.v2i1.233>. Acesso em: 19/09/2024.

Sionkowska A, Adamiak K, Musiał K, Gadomska M. Materiais à base de colágeno em aplicações cosméticas: uma revisão. *Materiais (Basileia)*. 23 de setembro de 2020; 13(19):4217. DOI: 10.3390/ma13194217. PMID: 32977407; PMCID: PMC7578929.

SMITH, J.; Davies, L. *Global Leather Market Insights and Trends*. Market Research Publishing, 2023.

ȘTEFAN, D.; BOȘOMOIU, M.; DĂNCILĂ, A. M.; ȘTEFAN, M. Review of soil quality improvement using biopolymers from leather waste. *Polymers*, v. 14, n. 9, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14091928>. Acesso em: 19/09/2024.

SUNDERMAN, A. *Leathercraft Through the Ages: The Evolution of Artisanship*. New York: HarperCraft, 2021.

WŁODARCZYK-BIEGUN, M. K.; DEL CAMPO, A. 3D bioprinting of structural proteins. *Biomaterials*, v. 134, p. 180–201, 1 jul. 2017.

XU, Songcheng; GU, M.; WU, Kun; LI, Guoying. Desvendando o papel da hidroxiprolina na manutenção da estabilidade térmica da estrutura da tripla hélice do colágeno usando simulação. *Jornal de Físico-Química B*, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b05006>. Acesso em: 20/03/2024.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ARTIGO 1: Obtenção de colágeno a partir de resíduos industriais: uma alternativa sustentável e economicamente viável.

Jamile Maria Pereira Bastos Lira de Vasconcelos
Robson Coelho de Araújo Neri
Amanda Vieira de Barros
Maria Cecília Ferreira Galindo
Karolayne Silva Souza
Wesllen David Silva Vila
Maria Betânia Melo de Oliveira

RESUMO

O colágeno é uma proteína essencial, presente em animais, que dá sustentação, resistência e elasticidade a tecidos como pele, ossos e cartilagens. Por conta de suas propriedades, ele tem grande importância para as indústrias cosmética, alimentícia, farmacêutica e biomédica. No entanto, a produção convencional dessa biomolécula ainda depende, em grande parte, do uso de matérias-primas que geram impactos ambientais, além de desperdiçar subprodutos valiosos da indústria. Diante disso, cresce a preocupação com o excesso de resíduos, especialmente da indústria do couro, que além de gerar problemas ambientais, representa uma perda de recursos que poderiam ser melhor aproveitados. O presente estudo aborda como os resíduos industriais podem ser uma alternativa viável e sustentável para a produção de colágeno. Apresenta os principais métodos de extração e evidencia como esse reaproveitamento contribui para a redução dos impactos ambientais, além de agregar valor a materiais que frequentemente são descartados. Também destaca o potencial do colágeno obtido a partir desses resíduos, com aplicações promissoras nos setores alimentício, cosmético e farmacêutico. Mais do que uma solução técnica, essa proposta dialoga diretamente com os princípios da economia circular e da sustentabilidade, mostrando que é possível transformar problemas ambientais em oportunidades econômicas. Assim, reaproveitar resíduos na produção de colágeno não só contribui para um futuro mais sustentável, mas também fortalece cadeias produtivas comprometidas com o meio ambiente e com o desenvolvimento social.

Palavras-chave: resíduos; reaproveitamento; biomoléculas; sustentabilidade.

ABSTRACT

Collagen is an essential protein found in animals that provides support, strength and elasticity to tissues such as skin, bones and cartilage. Due to its properties, it is of great importance to the cosmetic, food, pharmaceutical and biomedical industries. However, the conventional production of this biomolecule still depends largely on the use of raw materials that generate environmental impacts, in addition to wasting valuable byproducts from the industry. In view of this, there is growing concern about the excess waste, especially from the leather industry, which in addition to generating environmental problems, represents a waste of resources that could be better used. This study addresses how industrial waste can be a viable and sustainable alternative for the production of collagen. It presents the main extraction methods and shows how this reuse contributes to the reduction of environmental impacts, in addition to adding value to materials that are often discarded. It also highlights the potential of collagen obtained from this waste, with promising applications in the food, cosmetic and pharmaceutical sectors. More than just a technical solution, this proposal directly addresses the principles of the circular economy and sustainability, showing that it is possible to transform environmental problems into economic opportunities. Thus, reusing waste in collagen production not only contributes to a more sustainable future, but also strengthens production chains committed to the environment and social development.

Keywords: waste; reuse; biomolecules; sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes alternativas e sustentáveis de colágeno tem despertado interesse na comunidade científica e industrial. O colágeno é uma proteína estrutural que desempenha um papel fundamental na integridade e função de estruturas em organismos multicelulares incluindo: pele, ossos, cartilagens e tecido conjuntivo (Oliveira et al. 2021). Tradicionalmente, esta biomolécula é obtida de fontes animais, como peles de bovinos, caprinos e suínos. No entanto, a necessidade de práticas mais sustentáveis impulsiona a exploração de novas fontes (León-Lopez et al. 2019; Martinez et al. 2023).

O colágeno é uma proteína estrutural fundamental para os vertebrados, correspondendo a 30% da proteína total presente no organismo humano, utilizado em diferentes áreas: agricultura, alimentícia, cosmética e farmacêutica, podendo atuar como emulsificante, dentre outros (Rahman et al. 2021; Barzkar et al. 2023; Matos et al. 2023).

Os subprodutos das indústrias alimentícias (peles, ossos e cartilagens de animais), bem como resíduos da indústria de processamento de pescado e de abatedouros, têm sido explorados como potenciais fontes de colágeno devido à sua abundância e disponibilidade. A valorização desses resíduos não apenas reduz o desperdício e o impacto ambiental associado à sua disposição inadequada, mas também oferece uma fonte alternativa e sustentável desta biomolécula com potencial aplicação nas áreas de medicina regenerativa, cosmética e alimentícia (Tang et al. 2022; Ahmad et al. 2023; Rajabimashhadi et al. 2023; Xu et al. 2023).

O presente artigo tem como objetivo explorar as estratégias para a obtenção sustentável de colágeno, a partir de resíduos industriais, destacando suas aplicações nas indústrias cosmética, farmacêutica e alimentícia, e seu potencial para impulsionar a economia circular, por meio da Bioeconomia e as práticas ambientalmente responsáveis.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo realizou uma revisão integrativa da literatura com o objetivo de explorar as práticas e técnicas de extração de colágeno a partir de resíduos industriais. A questão norteadora deste estudo foi: "Quais são as técnicas e os avanços mais recentes na obtenção de colágeno a partir de resíduos industriais, e como essas práticas se alinham com as estratégias de sustentabilidade?".

O levantamento bibliográfico foi realizado nas seguintes bases de dados: *PubMed/MEDLINE*, *SciELO (Scientific Electronic Library Online)*, *LILACS (Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde)*, *Science Direct*, *Cochrane Library* e *Web of Science*. A pesquisa foi conduzida utilizando uma combinação estruturada de palavras-chave e operadores booleanos, a fim de maximizar a recuperação de artigos relevantes. As seguintes palavras-chave foram empregadas: "collagen" AND "industrial waste" AND "biomolecules" AND "extraction" AND "sustainability".

Desse modo, para garantir a relevância e a atualidade dos dados, os critérios de inclusão definidos, foram: artigos publicados entre janeiro de 2019 e julho de 2024; textos completos disponíveis em inglês, espanhol ou português; estudos que abordassem diretamente a extração de colágeno de resíduos industriais ou de subprodutos agroindustriais, com foco em métodos e técnicas de extração; e revisões sistemáticas, estudos experimentais, revisões bibliográficas e relatórios técnicos. E com isso, foram excluídos estudos que não apresentassem uma descrição metodológica clara sobre a extração de colágeno, tratassem de resíduos que não fossem derivados de processos industriais ou apresentassem revisões ou experimentos incompletos ou que não fossem acessíveis na íntegra.

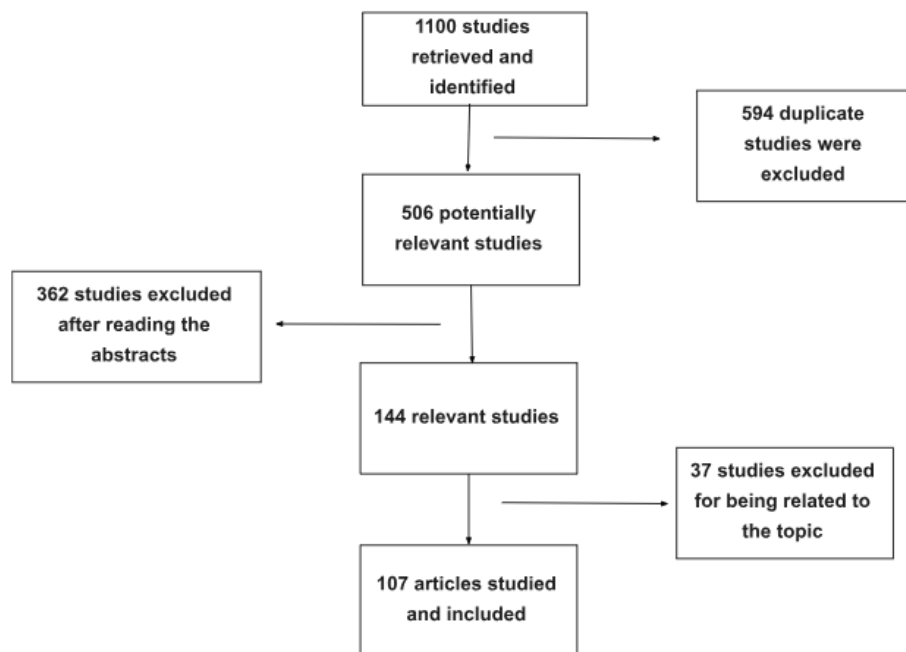
Logo, os artigos foram avaliados criticamente, levando em consideração as metodologias de extração de colágeno, os tipos de resíduos industriais utilizados e os resultados obtidos. Após a aplicação dos critérios de seleção, os estudos selecionados foram analisados e categorizados conforme as metodologias utilizadas, os tipos de resíduos abordados e os resultados obtidos. Sendo assim, essa abordagem permitiu compilar um panorama abrangente sobre as diferentes estratégias de obtenção de

colágeno, evidenciando tanto os desafios quanto às oportunidades relacionadas à sua produção a partir de resíduos industriais

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na revisão de literatura foram encontradas 1100 publicações, das quais 506 tiveram seus títulos analisados, levando à exclusão de 594 estudos por duplicidade e fora do recorte temporal. Após a leitura dos resumos, 362 artigos foram excluídos, restando 144 relevantes, sendo 107 artigos incluídos para compor esta revisão de literatura (Figura 1).

Figura 1: Processo de busca, seleção e inclusão de artigos.



Fonte: Autora (2024)

Fonte: Autora (2025)

3.1 Problemática dos resíduos gerados nas indústrias

As indústrias envolvem processos que utilizam componentes transformados em produtos. Nessa transformação é comum a geração de resíduos. Com o avanço do consumo em escala global, impulsionado pela economia, observa-se um aumento no fluxo de mercadorias. Sendo assim, torna-se importante priorizar a reciclagem e o descarte adequado de resíduos, especialmente para empresas cuja produção está

associada a um impacto ambiental. Desta maneira, além de promover a sustentabilidade ambiental, essas ações contribuem para criação de uma economia circular, na qual os recursos são utilizados de forma mais eficiente e responsável (Assunção 2019; Campi and Sousa 2023; Souza, 2024).

O gerenciamento de resíduos sólidos é importante para promover a sustentabilidade global (Ferronato et al. 2020). Esta prática está alinhada com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) promovidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente o objetivo 12, que foca em Consumo e Produção Sustentáveis, destacando o subitem 12.5, que visa a redução significativa da produção de resíduos através de estratégias de prevenção, redução, reciclagem e reuso até 2030 (ONU 2023).

Os resíduos industriais são um dos maiores responsáveis pelas agressões ao ambiente. Tem-se observado que os sólidos são enterrados, os gases lançados no ar e os líquidos despejados em rios e mares. Dessa forma, o meio ambiente e a saúde humana tornam-se ameaçados, podendo levar a perdas irreparáveis (Oliveira et al. 2024; Mota 2019).

Pesquisas têm apontado para a crescente preocupação relacionada aos resíduos produzidos durante os processos industriais, os quais podem causar graves impactos negativos à saúde humana, ao bem-estar, à qualidade de vida e ao meio ambiente, incluindo o solo, o ar, a água, a vegetação e a paisagem (Mainardi and Bidoia 2020). Essas consequências ocorrem principalmente quando não há um comprometimento efetivo com a conservação ambiental e a reciclagem apropriada desses materiais, resultantes das atividades de consumo e produção adotadas pela sociedade (Carvalho 2020; Varjão et al. 2023).

É urgente estratégias que desenvolvam atividades para controlar e minimizar impactos e geração de resíduos, aperfeiçoar a utilização dos recursos naturais, através da melhoria contínua de novos métodos, sistemas e processos de produção. As indústrias precisam tratar esses resíduos e dar destino de forma a não causar prejuízos ambientais (Souza et al. 2019; Santos 2019; Dalmora et al. 2023).

Atualmente, o desperdício de alimentos é visto como uma fonte rica de nutracêuticos valiosos. A recuperação eficiente, reciclagem e utilização sustentável de

componentes de alto valor presentes nos grandes volumes de desperdício alimentar global são importantes tanto do ponto de vista econômico quanto nutricional, especialmente para atender às necessidades dietéticas da crescente população mundial (Matinong 2020).

Nesse sentido, tem-se a produção mais limpa como um conceito que se refere a um conjunto de práticas e técnicas adotadas pelas empresas com o objetivo de reduzir ou eliminar o impacto ambiental de suas atividades produtivas. A produção mais limpa busca, de forma integrada, a prevenção da poluição, a redução do consumo de recursos naturais, a minimização da geração de resíduos e a promoção do uso eficiente de energia e água. Para isso, são utilizadas técnicas e práticas como a otimização de processos, a melhoria da eficiência energética, o planejamento do ciclo de vida do produto, a reciclagem e o reaproveitamento de materiais (Souza et al. 2019; Moraes et al. 2024). É nessa perspectiva de desenvolvimento sustentável que as indústrias podem buscar alternativas para agregar valor aos resíduos gerados (Oliveira et al. 2024).

3.2 Obtenção de biomoléculas com valor agregado a partir de resíduos industriais

A obtenção de biomoléculas com valor agregado a partir de resíduos da indústria tem recebido crescente atenção nos últimos anos (Fu et al. 2019). Diversos resíduos industriais e subprodutos da indústria têm sido explorados como fontes potenciais de biomoléculas de interesse (Florêncio et al. 2022).

Esses resíduos podem ser submetidos a processos de extração e purificação para obter biomoléculas como polifenóis, antioxidantes, proteínas e fibras dietéticas, que podem ser utilizadas em diversas aplicações na indústria de alimentos, farmacêutica e cosmética (Gullón et al. 2021). Além de fornecer uma fonte alternativa de biomoléculas, a valorização de resíduos industriais contribui para reduzir o impacto ambiental associado à sua disposição inadequada (Amandio, 2022). Essa forma de valorização de resíduos busca maximizar o aproveitamento de componentes presentes, gerando produtos de maior valor agregado e minimizando o desperdício (Fernández-Ochoa et al. 2021).

As proteínas são biomoléculas e algumas delas podem ser obtidas através da valorização de resíduos industriais. Estas biomoléculas podem possuir diversas

aplicações na indústria de alimentos, farmacêutica e cosmética (Jôgi & Bath, 2020). Uma importante biomolécula é o colágeno que é uma proteína com um investimento, propondo alternativas viáveis (León-Lopez et al. 2019; Oliveira et al. 2021).

Resíduos de indústria alimentícia, incluindo fontes bovinas (como vacas, bois, búfalos etc.), suínas e aquáticas (como chocos, águas-vivas, anêmonas do mar, polvos, etc.) são excelentes fontes de colágeno (Fernández-Ochoa et al. 2021). Devido à crescente demanda dos consumidores por alternativas ecologicamente corretas e livres de produtos químicos tóxicos, extensas investigações têm sido conduzidas na indústria de alimentos em relação às aplicações de novas tecnologias de extração de colágeno (Wen et al. 2020; Justino et al. 2022).

Os principais resíduos usados na extração de colágeno são peles e ossos bovinos, peles de suínos e escamas de peixes (Tang et al. 2022; Ahmad et al. 2023). Estes materiais são notáveis pela sua vasta disponibilidade e alto conteúdo de colágeno, atributos que favorecem seu uso industrial. O uso de resíduos não aproveitados não só auxilia na diminuição do desperdício, como também fomenta uma estratégia mais sustentável na fabricação de biomoléculas.

Peles e ossos de bovinos são resíduos amplamente utilizados na extração de colágeno, devido à sua alta disponibilidade e ao fato de possuírem um alto conteúdo de colágeno tipo I. A utilização de peles bovinas é comum na indústria de gelatina e colágeno hidrolisado (Noorzai and Verbeek 2020). As peles de suínos são outra fonte rica de colágeno tipo I e III, frequentemente utilizada na produção de gelatina. Este material é valorizado pela sua disponibilidade e pelo custo relativamente baixo (Tang et al. 2022; Ahmad et al. 2023).

Com a crescente demanda por colágeno de origem não bovina, as escamas de peixes têm se tornado uma fonte popular de colágeno tipo I. Este material é particularmente apreciado na indústria cosmética e de suplementos alimentares devido às suas propriedades benéficas para a pele (Prajaputra et al. 2023). Vale salientar que a indústria de couros gera grande quantidade de resíduos de origem animal, como pele, pó de couro e aparas. Estes resíduos são ricos em colágeno e podem ser aproveitados na produção de colágeno hidrolisado, gelatinas e outros produtos derivados (Parisi et al. 2021).

3.3 Colágeno

Estudos recentes têm se concentrado na compreensão das características moleculares do colágeno e como elas influenciam suas propriedades físicas e biológicas. Por exemplo, pesquisas têm investigado o papel das modificações pós-traducionais na estrutura e função do colágeno, incluindo a glicosilação e a hidroxilação dos aminoácidos. Acredita-se que essas modificações possam desempenhar um papel importante na formação e remodelação dos tecidos onde o colágeno está presente (Tu 2019; De Giorgi et al. 2021; Tvaroška 2024).

Outros estudos têm explorado as interações do colágeno com outras proteínas e componentes da matriz extracelular, como os proteoglicanos, e como essas interações afetam a organização e as propriedades mecânicas dos tecidos (Jôgi & Bath, 2020). Essas pesquisas têm contribuído para uma compreensão mais aprofundada da estrutura complexa do colágeno e da sua função nos tecidos biológicos (Ricard-Blum, 2020).

Além disso, avanços tecnológicos, como a Microscopia Eletrônica de Alta Resolução (MEAR) e a Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear (ERMN), têm permitido a visualização e análise detalhada da estrutura molecular do colágeno em diferentes níveis, desde o colágeno isolado até a sua organização nos tecidos (Van Huizen 2020).

3.4 Obtenção de colágeno a partir de resíduos

A obtenção de colágeno a partir de resíduos é uma área de pesquisa em expansão, com várias fontes potenciais de material de partida sendo exploradas. Esses resíduos podem ser transformados em colágeno por meio de processos de extração e purificação que incluem etapas de: limpeza, desengorduramento, tratamento enzimático e purificação para obter um produto de alta qualidade (Pérez et al. 2019). É fundamental garantir que a extração desta biomolécula a partir desses resíduos seja realizada de maneira sustentável e em conformidade com regulamentações sanitárias e ambientais (Ferreira et al. 2020).

Atualmente, existe um crescente interesse pelos processos de extração do colágeno e seus derivados devido à tendência de utilização desta proteína em substituição aos agentes sintéticos nos mais diversos processos industriais e por

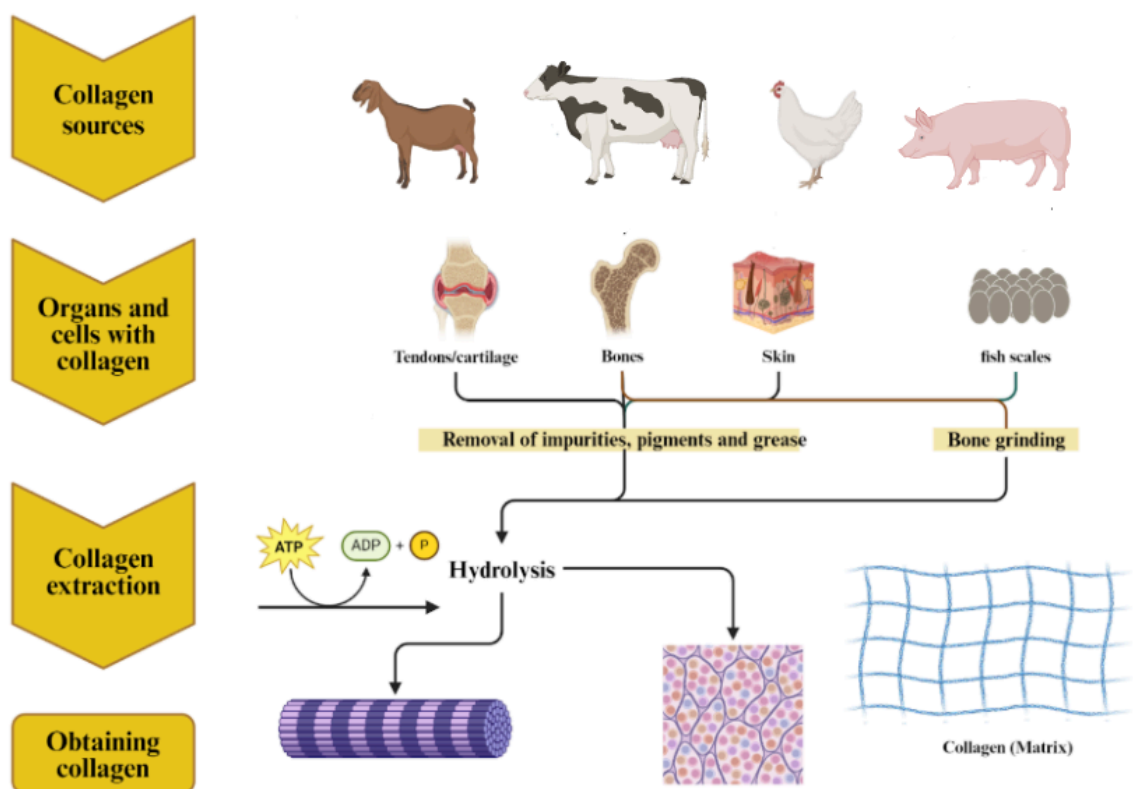
permitir uma maior valorização dos subprodutos do abate dos animais (Noorzai and Verbeek 2020). Algumas pesquisas abordam a obtenção de colágenos de diferentes fontes animais como alternativa ao colágeno bovino em virtude de doenças bovinas que possam ser transmitidas e como alternativa para os países de religião muçulmana em substituição ao colágeno suíno (León-Lopez et al. 2019; Prajaputra et al. 2023).

A demanda por colágeno de fontes alternativas, especialmente subprodutos de peixe, tem crescido nos últimos anos. No entanto, o colágeno de peixes apresenta menor estabilidade térmica em comparação com o colágeno de mamíferos (León-Lopez et al. 2019; Hayashi 2020).

O colágeno de caprino e ovino tem se destacado recentemente como uma alternativa promissora devido à sua maior estabilidade térmica em relação ao colágeno de peixe. Além disso, não apresenta barreiras religiosas nem está associado a preocupações com doenças, como ocorre com o colágeno de outros mamíferos (Zain and Hamdan 2021; Furtado et al. 2022).

3.5 Métodos de extração do colágeno

Na extração do colágeno numerosas ligações cruzadas covalentes intra e intermoleculares são removidas, principalmente envolvendo resíduos de lisina e hidroxilisina, ligações éster e outras ligações com sacarídeos, o que torna o processo bastante complexo (Santos et al. 2023). As etapas de extração mais comuns são mostradas na Figura 2.

Figura 2: Diferentes fontes de colágeno

Fonte: Autora (2025) criado com Biorender

Os processos de extração desta molécula são baseados na solubilidade da proteína em soluções salinas neutras, ácidas ou na utilização de enzimas. Estudos têm investigado extrações repetidas, unindo sal, ácidos e enzimas, com a finalidade de melhorar a produtividade e a qualidade do colágeno obtido. A dificuldade reside em determinar a combinação perfeita que aumente a eficiência e minimize a perda das características estruturais da biomolécula. Existem diferentes métodos de extração de colágeno de resíduos e a escolha do método depende do tipo de resíduo utilizado e das características desejadas para o colágeno extraído (Figura 3) (Blidi et al. 2021; Matinong et al. 2022).

Figura 3: Etapas e métodos de extração e caracterização de colágeno.



Fonte: Autora (2025)

Para garantir o máximo desempenho e as melhores características do colágeno, é essencial determinar o método de extração mais adequado para cada tipo de matéria-prima. Diversas técnicas, como extração com sal neutro, ácido, enzimática e métodos combinados, têm sido utilizadas para isolar o colágeno de forma eficiente (Rajabimashhadi et al. 2023).

Os métodos tradicionais de extração de colágeno frequentemente utilizam produtos químicos agressivos e altas temperaturas, o que leva a baixos rendimentos e à sua desnaturação. Contudo, a utilização de enzimas tem emergido como alternativas promissoras para extração. Essas enzimas oferecem vantagens significativas, incluindo alta especificidade, maior rendimento de colágeno intacto e menor impacto ambiental, devido à sua biodegradabilidade e origem renovável (Ahmed et al. 2020). Pesquisas também indicam que enzimas vegetais, como papaína e bromelina, funcionam sob condições de reação mais amenas, incluindo temperaturas e valores de pH mais baixos, em comparação com os métodos tradicionais. Isso resulta em menor

desnaturação do colágeno e obtenção de um produto final de qualidade superior (Senadheera et al. 2020).

3.5.1 *Técnicas tradicionais*

A extração de colágeno envolve duas etapas básicas: pré-tratamento e extração. A seleção do pré-tratamento é crucial para eliminar impurezas e melhorar a qualidade da molécula (Ahmed et al. 2020). Fontes de resíduos alimentares contêm proteínas não colágenas, lipídios, pigmentos e minerais juntamente com o colágeno, e os pré-tratamentos são necessários para remover esses componentes, exceto o colágeno (Coppola 2020). Os pré-tratamentos podem ser ácidos, alcalinos ou específicos. O objetivo do pré-tratamento é dissociar as ligações cruzadas intermoleculares covalentes que unem as moléculas de colágeno. O pré-tratamento ácido quebra as ligações entre as moléculas não covalentes. O pré-tratamento alcalino com NaOH facilita a extração, melhorando a transferência de massa na matriz do tecido (Jafari 2020).

Os métodos tradicionais de extração de colágeno incluem tratamento ácido, tratamento enzimático, tratamento salino e a combinação desses métodos. Estes, dependem da hidrólise química por meio de solubilização ácida, alcalina ou salina. O tipo de técnica de extração utilizada determina o rendimento e as características físico-químicas dos colágenos extraídos, tais como: solubilidade, cadeias polipeptídicas, viscosidade da solução, capacidade emulsificante, retenção de água e estabilidade térmica (León-Lopez et al. 2019; Blidi et al. 2021).

3.5.2 *Tratamento salino*

Soluções salinas (como fosfatos, citratos, cloreto de sódio e Tris-HCl) podem dissolver o colágeno. A solução de Cloreto de Sódio (NaCl) pode ser utilizada para extrair colágeno de fontes marinhas, resultando em colágeno conhecido como Colágeno Solúvel em Sal (SSC). No entanto, o SSC é menos solúvel em sais. Para o colágeno tipo I dissolver-se é necessária determinada concentração de sal ($<1,0 \text{ kmol/m}^3$), embora concentrações mais altas causem sua precipitação, sendo necessário, portanto, um controle rigoroso (Fassini et al. 2020; Skaik 2023; Martins et al. 2022).

3.5.3 Tratamento ácido

A extração de colágeno geralmente é realizada por hidrólise com o uso de uma solução ácida. Ácidos orgânicos, como: acético, cítrico ou láctico, além de inorgânicos, como: clorídrico e nítrico, são empregados para romper as ligações no colágeno e facilitar a extração das fibrilas (AME, 2022). No entanto, os ácidos orgânicos são mais eficazes na quebra das ligações cruzadas desta biomolécula, resultando em rendimentos de extração superiores. O colágeno obtido por esse método é conhecido como Colágeno Solúvel em Ácido (ACS) (Ahmed 2020; Coppola 2020).

Comparado à extração com ácido clorídrico, a extração com ácido acético proporciona maior rendimento e viscoelasticidade. Normalmente, a presença de soluções ácidas confere uma carga líquida positiva ao colágeno, o que pode aumentar a repulsão entre as moléculas de tropocolágeno. Isso facilita a separação molecular, levando à solubilização das moléculas de colágeno. A quantidade de colágeno extraído pode variar conforme a idade e o tipo de animal. Além disso, os parâmetros de extração, como tempo de tratamento, temperatura, concentração dos ácidos e a proporção entre materiais alimentares e soluções ácidas, afetam a qualidade do colágeno (Jafari 2020; Ahmed 2020; Coppola 2020).

3.5.4 Tratamento enzimático

Colágenos provenientes de diferentes fontes não se dissolveram completamente em solução ácida, o que leva a um baixo rendimento. Para aumentar o rendimento, podem ser empregadas diversas enzimas, como: pepsina, papaína, tripsina e diferentes collagenases, sob condições e pHs específicos (Chen 2023; Shaik 2023). O tratamento enzimático oferece um melhor controle sobre o grau de hidrólise, consome menos energia, gera menos desperdício e é menos prejudicial aos equipamentos de processamento. A pepsina é particularmente eficaz na extração de colágeno, proporcionando maior pureza ao colágeno solúvel em pepsina, podendo ser utilizada sozinha ou em combinação com diferentes concentrações de ácido acético (Blidi et al. 2021; Duan and Cheng 2022).

A extração enzimática é considerada um método eficiente para obter colágeno por várias razões. Primeiro, as enzimas promovem uma maior solubilização do colágeno em solução de ácido acético, o que melhora a eficácia da extração. Em

segundo lugar, a digestão enzimática pode reduzir a antigenicidade do colágeno. Além disso, a estrutura helicoidal tripla do colágeno não é alterada pela extração enzimática, que age apenas nas extremidades da cadeia peptídica. Por essas razões, a utilização de colágeno extraído por enzimas é valorizada nas indústrias alimentícia e farmacêutica (Coppola 2020; Ahmed 2020).

Recentemente, as proteases aspárticas têm surgido como uma alternativa à pepsina. Estas proteases ácidas funcionam eficazmente a baixas temperaturas e são capazes de hidrolisar seletivamente as ligações peptídicas em resíduos com cadeias laterais longas e hidrofóbicas. Elas demonstram atividade significativa em ambientes ácidos. Proteases aspárticas são encontradas em diversos organismos, como: plantas, fungos, vírus, insetos e vertebrados (Guo 2021). Além disso, a papaína oferece uma maior ação sobre o grau de hidrólise do substrato protéico (Chen 2023).

3.5.5 Extração com Solvente Eutético Profundos

Solventes eutéticos profundos (DES) emergiram como uma alternativa sustentável e ambientalmente amigável aos solventes orgânicos convencionais para a extração de diversos compostos de fontes naturais. Os DES são líquidos iônicos formados pela combinação de um aceitador de ligações de hidrogênio, como um sal de amônio quaternário e um doador de ligações de hidrogênio, como um ácido carboxílico ou uma amina. Devido à sua baixa toxicidade, biodegradabilidade e eficácia, esses solventes têm sido amplamente utilizados na extração de uma variedade de compostos bioativos de fontes naturais (Socas-Rodríguez et al. 2021; Dheyab et al. 2021; Serna-Vázquez et al. 2021).

O uso de DES para a extração de colágeno a partir de resíduos alimentares apresenta uma abordagem promissora para a gestão sustentável de resíduos e a produção de biomateriais valiosos. Assim, a utilização de DES para a extração de colágeno oferece uma alternativa mais ecológica e sustentável (Kalhor and Ghandi 2019; Bowen et al. 2022; Hanafi et al. 2024).

3.5.6 Extração por Fluido Supercrítico (SFE)

A SFE surgiu como um método amplamente adotado para a extração de compostos químicos. Esse método utiliza fluidos supercríticos como solventes para

separar os componentes desejados. Fluidos supercríticos são substâncias mantidas a temperaturas e pressões acima do seu ponto crítico, proporcionando-lhes propriedades solventes únicas. Devido à sua eficiência na extração de compostos e ao seu impacto ambiental reduzido, esses fluidos têm sido utilizados em diversas indústrias, como: alimentícia, farmacêutica e ambiental. A SFE oferece várias vantagens em comparação com métodos tradicionais, incluindo maior seletividade, melhor rendimento de extração, capacidades superiores de fracionamento e menor impacto ambiental (Jafari 2020; Li et al. 2022; Vardanega et al. 2022).

O CO₂ é frequentemente utilizado como o principal fluido supercrítico na técnica SFE devido às suas características vantajosas, como custo acessível, ampla disponibilidade, estabilidade, não inflamabilidade, aceitabilidade ambiental e capacidade de operação em condições moderadas de pressão e temperatura. Além disso, o CO₂ pode ser liberado após o processo de extração de soluções aquosas, resultando na obtenção de um componente purificado (Kadri et al. 2021; Arumugham et al. 2021). Na indústria alimentícia, o SFE é utilizado para extrair óleos essenciais, gorduras e compostos bioativos de várias fontes naturais (Lira et al. 2021).

A extração de colágeno de resíduos alimentares por meio de SFE tem atraído interesse devido ao valor potencial do colágeno como biomaterial. A utilização de SFE para extrair colágeno de resíduos alimentares, como subprodutos de peixes, está sendo investigada como uma solução sustentável para aproveitar materiais residuais e obter compostos bioativos valiosos (Mazzutti et al. 2021; Vardanega et al. 2022). A técnica SFE oferece benefícios como alta seletividade e rendimento, uso reduzido de solventes e capacidade de produzir extratos de colágeno com elevada pureza (Ferreira et al. 2020).

3.5.7 Extrusão e Extração Assistida por Ultrassom (EAU)

A tecnologia de extrusão é um método importante tanto na produção de alimentos quanto em processos de extração. O processo utiliza cavitação acústica, envolvendo ondas de compressão e rarefação, para melhorar a transferência de massa e acelerar a extração (Syahir et al. 2020; Cravotto et al. 2021).

A EAU surgiu como um método eficaz para melhorar a extração de colágeno de várias fontes, incluindo: tendões bovinos e pele de peixe. A técnica funciona

dispersando agregados enzimáticos e abrindo fibrilas de colágeno, facilitando a hidrólise enzimática. Quando combinados com o tratamento com pepsina, podem melhorar a eficiência da extração sem comprometer a qualidade do colágeno ou a integridade molecular. O colágeno extraído mantém sua estrutura de tripla hélice e composição característica de aminoácidos (Karnjanapratum et al. 2020; Schmidt et al. 2020; Lu et al. 2023).

3.6 Aplicações comerciais do colágeno

A utilização de resíduos industriais na produção de colágeno oferece vantagens significativas tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Ambientalmente, essa abordagem contribui para a redução da quantidade de resíduos sólidos gerados pela indústria, promovendo sustentabilidade e economia circular. Além disso, diminui a necessidade de descarte em aterros sanitários, minimizando o impacto ambiental associado à disposição inadequada de resíduos (Jôgi & Bath, 2020).

Economicamente, a utilização de resíduos industriais como matéria-prima para produção de colágeno pode reduzir os custos de produção, uma vez que esses resíduos geralmente são adquiridos a baixo custo ou até mesmo de forma gratuita. Isso pode resultar em uma redução significativa nos custos de matéria-prima em comparação com fontes convencionais de colágeno, como peles de animais (Liu et al. 2021).

Além disso, a valorização de resíduos industriais pode abrir novas oportunidades de negócios e o desenvolvimento econômico de regiões onde esses resíduos estão disponíveis em grande quantidade. A utilização desses resíduos na produção de colágeno não apenas apresenta vantagens ambientais significativas, contribuindo para a redução de resíduos e o uso mais eficiente de recursos naturais, mas também oferece benefícios econômicos, como redução de custos e oportunidades de negócios sustentáveis. Empresas que adotam práticas sustentáveis de produção e utilizam resíduos como matéria-prima podem se beneficiar de uma imagem corporativa mais positiva e do acesso a mercados consumidores cada vez mais conscientes em relação à sustentabilidade (Zhu et al. 2019; Mazzioni et al. 2023).

O colágeno tem sido considerado um dos biomateriais mais utilizados e um dos motivos é a ampla gama de aplicações industriais (Tabela 1) (Ghomi et al. 2021). No

setor de alimentos industrializados, esta molécula é frequentemente utilizada para aprimorar características como elasticidade, consistência e estabilidade em alimentos e bebidas. As suas propriedades funcionais, como a habilidade de formar géis e emulsões, fazem dele um componente valioso na elaboração de alimentos que satisfaçam as demandas sensoriais e nutricionais dos consumidores (Tang et al. 2022; Ahmad et al. 2023).

Tabela 1: Aplicações industriais do colágeno.		
ÁREA	APLICAÇÃO	REFERÊNCIAS
Alimentos funcionais	Adicionado a produtos como suplementos nutricionais e alimentos fortificados devido ao seu potencial para promover a saúde da pele, articulações e ossos.	Silva, 2021; Campos et al. 2023.
Medicina regenerativa	Utilizado como matriz de suporte para regeneração de tecidos, como pele, ossos e cartilagens.	Goldbloom-Helzner et al. 2019; Fernandes et al. 2021; Paulino et al. 2024.
Cosméticos	Utilizado em produtos cosméticos para melhorar a hidratação da pele e reduzir rugas e linhas finas.	Wieczorek et al. 2021; Miyashiro et al. 2022.

Fonte: Autora (2025)

Pesquisadores testaram fibras de colágeno e colágeno em pó no desenvolvimento de mortadelas com baixo percentual de gordura e obtiveram benefícios no aumento do teor proteico (Souza et al. 2022). Ainda Sousa et al. (2022) observaram que a aplicação de colágeno foi tecnologicamente viável na produção de salsichas mistas com substituição parcial da gordura por colágeno hidrolisado. Foram desenvolvidos sucos de frutas com colágeno hidrolisado e foi observado que a formulação com colágeno foi a mais aceita, indicando que este promoveu melhores atributos sensoriais e aumento significativo de proteína (Shigematsu et al. 2021).

Em bebidas fermentadas à base de soro de leite, a adição de colágeno em pó e hidrolisado melhorou a textura e as características sensoriais (Angelino et al. 2022). Da

mesma forma, o iogurte fortificado com colágeno e sucralose demonstrou boa aceitação e doçura ideal, com uma formulação otimizada contendo 1,25% de colágeno (Rodrigues et al. 2021). A incorporação de colágeno no queijo Petit Suisse também se mostrou promissora, com maior aceitação quando os consumidores foram informados sobre os benefícios do colágeno para a saúde da pele (Fontan et al. 2022). Essas descobertas sugerem que os produtos enriquecidos com colágeno não apenas oferecem benefícios funcionais, mas também melhoram as qualidades sensoriais, tornando-os atraentes para consumidores preocupados com a saúde.

Em um determinado estudo foi sugerida a produção de iogurte congelado com adição de colágeno hidrolisado. Os resultados da análise sensorial foram satisfatórios, evidenciando que o produto representava uma excelente maneira de incorporar o colágeno à dieta diária (Chuproski et al. 2020).

A extração de colágeno a partir de peixes tem ganhado destaque recentemente, visto que o setor de aquicultura apresentou um crescimento de cerca de 25% nos últimos cinco anos (Valenti et al. 2021), superando significativamente outras fontes de proteína animal, como: avicultura, suinocultura e bovinocultura (Fernandes et al. 2021).

O colágeno de peixe emergiu como um dos biopolímeros mais proeminentes na fabricação de filmes e embalagens biodegradáveis. Além disso, sua versatilidade permite sua utilização como espuma emulsificante intumescente, graças às suas propriedades tensoativas. Também se destaca como agente microencapsulante devido às suas propriedades reológicas. Este é frequentemente empregado na produção de cápsulas e emulsificantes para a fabricação de sistemas de óleo em água, devido à sua excelente biocompatibilidade e biodegradabilidade. Essa ampla gama de aplicações evidencia o potencial deste biomaterial marinho na indústria, não apenas como uma alternativa sustentável, mas também como uma solução eficaz para diversas necessidades tecnológicas (Renuka et al. 2019; Zhang et al. 2020).

Os peptídeos obtidos a partir da hidrólise de colágeno podem apresentar propriedades biológicas diferentes, tais como: antioxidante, clareamento de pele, aumento da densidade óssea e diminuição da pressão arterial (Nasri 2019; Cunha et al. 2021). Extratos de colágeno obtidos de bexigas natatórias de bacalhau do Atlântico

apresentam propriedades atrativas para uso em aplicações cosméticas ou biomédicas (Sousa 2020).

Filmes e revestimentos comestíveis feitos de colágeno têm se mostrado promissores na melhoria da qualidade dos alimentos e no prolongamento da vida útil (Friedrichsen et al. 2022). As aplicações de colágeno e gelatina abrangem alimentos musculares, laticínios, confeitaria e bebidas (Ahmad et al. 2023). Os subprodutos do peixe, particularmente a pele, surgiram como uma fonte valiosa para a produção de gelatina, oferecendo vantagens sobre as fontes de mamíferos devido aos menores riscos à saúde e menos restrições religiosas (Tang et al. 2022; Ahmad et al. 2023)

Kumar et al. (2019) elaboraram biscoitos utilizando colágeno como suplemento dietético e observaram que a suplementação resultou em maior potencial proteico e antioxidante. Foi relatado também a produção de queijo com adição de colágeno, com objetivo de produzir um produto com propriedades bioativas, especificamente um alimento com capacidade de inibir a atividade da Enzima Conversora de Angiotensina (ECA) (Shori et al. 2021).

Quando extraído de resíduos de abatedouros, por exemplo, o colágeno pode ser transformado em um fertilizante orgânico de alta qualidade. O colágeno é uma fonte rica de nitrogênio, um dos principais nutrientes necessários para o crescimento das plantas. A utilização de colágeno como fertilizante traz benefícios tanto para a agricultura quanto para o meio ambiente. Em primeiro lugar, o colágeno, sendo uma fonte de nitrogênio orgânico, pode ajudar a melhorar a fertilidade do solo, promovendo o crescimento e desenvolvimento das plantas. Além disso, a utilização de resíduos de colágeno como fertilizantes representa uma forma eficiente de reciclar esses materiais, evitando seu descarte inadequado e reduzindo os impactos ambientais negativos (López 2019; Ramires et al. 2021; Ştefan et al. 2022).

4. PERSPECTIVAS FUTURAS

As tendências e perspectivas futuras na sua obtenção a partir de resíduos industriais apontam para uma maior adoção de práticas sustentáveis, o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e a exploração de novas aplicações e funcionalidades para o colágeno extraído dessas fontes alternativas (León-Lopez,

2020; Ferreira et al. 2020; Matos et al. 2023).

Uma tendência na obtenção de colágeno de resíduos industriais é o desenvolvimento de métodos mais eficientes. Isso inclui a utilização de processos de extração mais verdes, como a extração assistida por tecnologias de alta pressão e a utilização de solventes alternativos de baixo impacto ambiental (Chen et al. 2019). Além disso, abordagens de Biotecnologia, como a engenharia de enzimas para otimizar os processos de hidrólise de colágeno, estão sendo exploradas como uma maneira de aumentar a eficiência e reduzir os custos de produção (Liu et al. 2021).

Outra perspectiva futura promissora é a aplicação de técnicas de biopolímeros avançados na produção de colágeno a partir de resíduos industriais. Isso inclui o desenvolvimento de materiais compostos e biomiméticos que combinam colágeno com outros polímeros naturais ou sintéticos para criar materiais com propriedades específicas para diferentes aplicações biomédicas e industriais (Liao et al. 2020). Além disso, a utilização de técnicas de Nanotecnologia para modificar as propriedades físico-químicas do colágeno extraído de resíduos industriais também representa uma área promissora de pesquisa (Kurian et al. 2021; Lo & Fauzi, 2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção de colágeno a partir de resíduos industriais tem se mostrado uma alternativa promissora, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Aproveitar materiais que antes seriam descartados para gerar uma biomolécula de alto valor é uma estratégia que une sustentabilidade e inovação. Essa prática contribui para a redução da poluição, estimula o reaproveitamento de resíduos e fortalece a lógica da economia circular.

Ao transformar resíduos em colágeno, as indústrias conseguem não apenas agregar valor ao que seria lixo, mas também reduzir custos com matéria-prima. Isso se alinha diretamente aos princípios da bioeconomia, que tem ganhado destaque nos últimos anos por propor modelos produtivos mais eficientes e menos impactantes ao meio ambiente. Além disso, o colágeno gerado por esse processo tem aplicações em diversos setores, como cosméticos, saúde e nutrição, o que aumenta seu valor comercial e abre portas para novos investimentos.

Dessa forma, transformar resíduos em soluções representa um passo importante rumo a uma indústria mais sustentável, alinhada aos desafios e oportunidades do presente. Para consolidar essa trajetória, é essencial continuar investindo em pesquisas que aprimorem os métodos de extração e purificação do colágeno. Além disso, parcerias entre empresas, universidades e órgãos reguladores são fundamentais para fortalecer a inovação e tornar essa produção cada vez mais viável e acessível.

REFERÊNCIAS

- Ahmad MI et al. (2023) Collagen and gelatin: Structure, properties, and applications in food industry. *International Journal of Biological Macromolecules* 240:e128037. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128037>.
- Ahmed M, Verma AK, Patel R (2020) Collagen extraction and recent biology activities of collagen peptides derived from seafood waste: a review. *Sustainable Chemistry & Pharmacy* 18:e100315. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100315>.
- Ahmad, Muhammad Ijaz; Li, Yonghui; Pan, Jinfeng; Liu, Fei; Dai, H.; Fu, Yu; Huang, Tao; Farooq, S.; Zhang, Hui. (2023) Colágeno e gelatina: estrutura, propriedades e aplicações na indústria alimentícia. *Revista Internacional de Macromoléculas Biológicas*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128037>.
- Alcaide-Ruggiero L et al. (2021) Major and minor collagen types in articular cartilage: the role of collagens in assessing tissue repair in chondral defects. *International Journal of Molecular Sciences*. <https://doi.org/10.3390/ijms222413329>.
- Akita ME al. (2020) Correlation of proline, hydroxyproline and serine content, denaturation temperature and circular dichroism analysis of type I collagen with the physiological temperature of marine teleosts. *Food Chemistry* 329:e126775. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126775>.
- Amândio, M. S.; Pereira, Joana M.; Rocha, J.; Serafim, L. S.; Xavier, A. (2022) Obtendo valor dos resíduos da indústria de celulose e papel: a caminho da sustentabilidade e da economia circular. *Energias*, v. 15, n. 11. <https://doi.org/10.3390/en15114105>.
- Angelino GM et al. (2020) Avaliação do potencial tecnológico de colágeno em pó e hidrolisado em bebida fermentada à base de soro de leite. *Studies in Environmental and Animal Sciences* 3:416–426. <https://doi.org/10.54020/seasv3n2-021>.
- Arumugham T et al. (2021) Supercritical carbon dioxide extraction of plant phytochemicals for biological and environmental applications - A review. *Chemosphere* 268:e129525. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129525>.
- Assunção GM (2019) A gestão ambiental rumo à economia circular: como o Brasil se apresenta nessa discussão. *Sistemas & Gestão* 14: 223-231. <https://doi.org/10.20985/1980-5160.2019.V14N2.1543>.

Barzkar N et al. (2023) Marine collagen: purification, properties and application. *Frontiers in Marine Sciences* 10: 2023 <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1245077>.

Bowen H et al. (2022) Application of deep eutectic solvents in the extraction and purification of proteins. *Frontiers in Chemistry* 10:e912411. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.912411>.

Campi IG, Sousa EJS (2023) A implementação da economia circular nas empresas. *Revista Estudos e Negócios Acadêmicos* 3:66-72. <https://doi.org/10.58941/26760460/v3.n6.140>.

Campos LD, Junior VDAS, Pimentel JD, Carregã GLF, Cazarin CBB (2023) Collagen supplementation in skin and orthopedic diseases: A review of the literature. *Heliyon* 9: e14961. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14961>.

Carvalho MM, Júnior VB, Schulte NK, dos Santos CT (2020) Preocupação ambiental e produção industrial: um exemplo de Santa Catarina (SC). *Mix sustentável* 6:163-174. <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n2.163-174>.

Chemat F et al. (2019) Green extraction processes, biorefineries and valorization of by-products. In: *Green Chemistry Series No. 59*. Springer.

Chuproski A, Pereira GDF, Los PR, Judacewski P, Simões DRS, Salem RDS (2020) Desenvolvimento e Avaliação de logurte Adicionado de Colágeno e Goma Xantana. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research* 3:3579-3589. <https://doi.org/10.34188/bjaerv3n4-065>.

Chen D et al. (2020) Distinct effects of different matrix proteoglycans on collagen fibrillogenesis and cell-mediated collagen reorganization. *Scientific reports* 10:e19065. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76107-0>.

Coppola D, Oliviero M, Vitale GA, Lauritano C, D'Ambra I, Iannace S, de Pascale D (2020) Marine collagen from alternative and sustainable sources: Extraction, processing and applications. *Marine drugs* 18:e214. <https://doi.org/10.3390/md18040214>.

Cunha JS et al. (2021) Peptídeos bioativos: obtenção e propriedades biológicas. In: *PRODUÇÃO ANIMAL E VEGETAL: INOVAÇÕES E ATUALIDADES*. <https://doi.org/10.53934/9786599539633-116>.

Dalmora G, Hemkemeier M, Dal Bello AL (2023) IMPACTOS CAUSADOS PELA EVOLUÇÃO DA ATIVIDADE INDUSTRIAL: UM OBSTÁCULO QUE SUPLICA POR PRODUÇÃO MAIS LIMPA. *Revista Científica Multidisciplinar* 4:2675-6218. <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i2.2701>.

De Giorgi F, Fumagalli M, Scietti L, Forneris F (2021) Collagen hydroxylysine glycosylation: non-conventional substrates for atypical glycosyltransferase enzymes. *Biochemical Society Transactions* 49: 855-866. <https://doi.org/10.1042/BST20200767>.

Dheyab AS, Abu Bakar MF, AlOmar M, Sabran SF, Muhamad Hanafi AF, Mohamad A (2021) Deep eutectic solvents (DESSs) as green extraction media of beneficial bioactive phytochemicals. *Separations* 8:e176. <https://doi.org/10.3390/separations8100176>.

Duan Y, Cheng H (2022) Preparation of immobilized pepsin for extraction of collagen from bovine hide. *RSC advances* 12:34548-34556. <https://doi.org/10.1039/d2ra05744a>.

El Blidi O et al. (2021) Extraction methods, characterization and biomedical applications of collagen: A review. *Biointerface Res. Appl. Chem* 11:13587-13613. <https://doi.org/10.33263/briac115.1358713613>.

Fassini D, Oliveira SM, Silva, TH, Reis RL (2020) Biotechnological valorization of marine collagens: biomaterials for health applications. *Encyclopedia of Marine Biotechnology* 2:855-883. <https://doi.org/10.1002/9781119143802.ch35>.

Fernandes VAR et al. (2021). Matrizes poliméricas para a regeneração óssea. Revisão da literatura. *Revista Multidisciplinar da Saúde* 3:65-77. ^a

Fernandes DVGS et al. (2021) Salmonella in the processing line of farmed Tambatinga (*Colossoma macropomum* x *Piaractus brachypomus*) in Mato Grosso, Brazil: serotypes of occurrence and antimicrobial profile. *Tropical Animal Health and Production* 53:1-7. <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02584-8>. ^b

Ferreira CDN, Irmen BR, Gomes LFS, Neto PGB, Stroher R (2020) Potencial de produção de colágeno a partir de escamas de tilápia no oeste do Paraná. In *Agronomia: Jornadas Científicas* 2:163-166. <https://doi.org/10.37885/200400081>.

Fernández-Ochoa, Á. *et al.* (2021). Revalorização de resíduos agroindustriais em produtos de alto valor agregado. In: Inamuddin, Khan, A. (eds) *Bioconversão Sustentável de Resíduos em Produtos de Valor Agregado. Avanços em Ciência, Tecnologia e Inovação*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7_14

Ferronato N, Lizarazu EGG, Tudela JMV, Callisaya JKB, Preziosi G, Torretta V (2020) Selective collection of recyclable waste in Universities of low-middle income countries: Lessons learned in Bolivia. *Waste management* 105:198-210. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.014>.

Florêncio, Ninive Bezerra; SILVA, Pérsio Alexandre da; Melo, E.; Santos, Gleyka Daísa De Melo; Gusmão, N. B. (2022) Fungos filamentosos crescidos em resíduos agroindústrias para uso em aplicações biotecnológicas. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 11, n. 10. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i10.32764>.

Fontan GCR, do Nascimento DJS, da Capela AP, de Oliveira Matos B (2021) Avaliação da informação sobre os benefícios do consumo de colágeno na aceitação de queijo Petit Suisse sabor maracujá. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes* 76:157-167. <https://doi.org/10.14295/2238-6416.v76i3.831>.

Friedrichsen JSA (2022) Propriedades e funcionalidades oferecidas a alimentos por filmes e revestimentos comestíveis: Uma revisão. *Research, Society and Development* 11:e468111335649-e468111335649. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i13.35649>.

Fu, Yu; Therkildsen, M.; Aluko, R.; Lametsch, R. (2019) Exploração do colágeno recuperado de subprodutos animais como precursor de peptídeos bioativos: sucessos e desafios. *Revisões Críticas em Ciência de Alimentos e Nutrição*. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1436038>.

Furtado M, Chen L, Chen Z, Chen A, Cui W (2022) Development of fish collagen in tissue regeneration and drug delivery. *Engineered Regeneration* 3:217-231. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2022.05.002>.

Goldbloom-Helzner L, Hao D, Wang A (2019) Developing regenerative treatments for developmental defects, injuries, and diseases using extracellular matrix

collagen-targeting peptides. *International journal of molecular sciences* 20:e4072. <https://doi.org/10.3390/ijms20174072>.

Gullon P, Gullon B, Astray G, Carpena M, Fraga-Corral M, Prieto MA, Simal-Gandara J (2020) Valorization of by-products from olive oil industry and added-value applications for innovative functional foods. *Food Research International* 137:e109683. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109683>

Hafner AE, Gyori NG, Bench CA, Davis LK, Šarić A (2020) Modeling fibrillogenesis of collagen-mimetic molecules. *Biophysical Journal* 119:1791-1799.

Halper J (2021) Basic components of connective tissues and extracellular matrix: fibronectin, fibrinogen, laminin, elastin, fibrillins, fibulins, matrilins, tenascins and thrombospondins. *Progress in heritable soft connective tissue diseases* 105-126. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80614-9_4.

Hanafi MA, Anwar F, Saari N (2024) Valorization of biomass for food protein via deep eutectic solvent extraction: Understanding the extraction mechanism and impact on protein structure and properties. *Food Frontiers* 5:1265-1301. <https://doi.org/10.1002/fft2.389>.

Hayrapetyan L, Sarvazyan N (2020) Extracellular Matrix and Adhesion Molecules. *Tissue Engineering: Principles, Protocols, and Practical Exercises* 29-38. https://doi.org/10.1007/978-3-030-39698-5_3.

Hayashi, Y (2020) Fish collagen. *Encyclopedia of Marine Biotechnology* 2:1127-1132. <https://doi.org/10.1002/9781119143802.ch45>.

Hulgan SA, Hartgerink JD (2022) Recent advances in collagen mimetic peptide structure and design. *Biomacromolecules* 23:1475-1489. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.2c00028>.

Jafari H, Lista A, Siekapen MM, Ghaffari-Bohlouli P, Nie L, Alimoradi H, Shavandi A (2020) Fish collagen: Extraction, characterization, and applications for biomaterials engineering. *Polymers* 12:e2230. <https://doi.org/10.3390/polym12102230>.

Jiménez-Gastélum GR, Aguilar-Medina EM, Soto-Sainz E, Ramos-Payán R, Silva-Benítez EL (2019) Antimicrobial properties of extracellular matrix scaffolds for tissue engineering. *BioMed Research International* 2019:e9641456. <https://doi.org/10.1155/2019/9641456>.

JÕGI, Katrin; BHAT, Rajeev. Valorização de resíduos e subprodutos do processamento de alimentos para a produção de bioplástico (2020). *Química e Farmácia Sustentáveis*, v. 18, 100326. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100326>.

Justino HDFM, Cunha JS, Pacheco AFC, Pacheco FC, Martins CCN, Paiva PHC, Júnior BRDCL (2022) Uso de tecnologias não convencionais para extração de compostos bioativos de subprodutos de frutas e vegetais: revisão. *Research, Society and Development* 11:e44111435488-e44111435488. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i14.35488>.

Kadri F, Xavier G, Patel U, Prajapati P (2021) Super-Critical Fluid: An Overview on Analytical Applications. *Current Green Chemistry* 8: 203 – 221. <https://doi.org/10.2174/2213346108666210506155009>.

Kalhor P, Ghandi K (2019) Deep eutectic solvents for pretreatment, extraction, and catalysis of biomass and food waste. *Molecules* 24:e4012. <https://doi.org/10.3390/molecules24224012>.

Kurian, Dra. Amal George; Singh, R.; Patel, K.; Lee, Jung-Hwan; Kim, H. (2021) Plataformas multifuncionais GelMA com nanomateriais para terapêutica tecidual avançada. *Materiais Bioativos*. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.06.027>.

León-López, A.; Morales-Peñaloza, A.; Martínez-Juárez, V.; Vargas-Torres, A.; Zeugolis, D.; Aguirre-Álvarez, G. (2019) Colágeno hidrolisado - fontes e aplicações. *Moléculas*. <https://doi.org/10.3390/molecules24224031>.

Li L, Chen M, Zeng Y, Liu G (2022) Application and perspectives of supercritical fluid technology in the nutraceutical industry. *Advanced Sustainable Systems* 6:e2200055. <https://doi.org/10.1002/adsu.202200055>.

Lira GB, da Costa Lopes AS, de Araújo Nascimento FC, dos Santos Conceição G, Brasil DDSB (2021) Processos de extração e usos industriais de óleos de andiroba e açaí: uma revisão. *Research, Society and Development* 10:e229101220227-e229101220227. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20227>.

Lo, Samantha; Fauzi, M. B. (2021) Atualização atual de nanomateriais de colágeno - fabricação, caracterização e suas aplicações: uma revisão. *Farmacêutica*. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13030316>.

Lu WC, Chiu CS, Chan YJ, Mulio AT, Li PH (2023) Characterization and biological properties of marine by-product collagen through ultrasound-assisted extraction. *Aquaculture Reports* 29:101514. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101514>.

Mazzutti S, Pedrosa R, Ferreira SR (2021) Green processes in Foodomics. Supercritical fluid extraction of bioactives. In: Chen H, Ferreira SR (org.). *Foodomics: extraction of bioactives*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100596-5.22816-3>.

Matinong AME, Chisti Y, Pickering KL, Haverkamp RG (2022) Collagen extraction from animal skin. *Biology* 11:e905. <https://doi.org/10.3390/biology11060905>.

Martinez ATT, Buitrago-Sierra R, Aponte AG (2023) Collagen: A Promising Molecule in Biomedical Applications. *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering* 60:11-28. <https://doi.org/10.4028/p-v5a3hl>.

Martins E. et al. (2022) Skin Byproducts of *Reinhardtius hippoglossoides* (Greenland Halibut) as Ecosustainable Source of Marine Collagen. *Applied Sciences* 12:e11282. <https://doi.org/10.3390/app122111282>.

Matos ES, Alves GP, de Carvalho Silva D, dos Santos BRS, de Jesus R, dos Santos Barbosa A (2023) Os bioestimuladores de colágeno no tratamento do envelhecimento cutâneo e a atuação do farmacêutico. *Research, Society and Development* 12:e05121444423-e05121444423. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i14.44423>.

Mazzioni, Sady; Ascari, Camila; Rodolfo, Noele Martinuzo; MAGRO, Cristian Baú dal (2023) Reflexos das práticas ESG e da adesão aos ODS na reputação corporativa e no valor de mercado. *Revue Gestion et Organisation*, v. 16, n. 3. <https://doi.org/10.22277/rgo.v16i3.7394>.

Mienaltowski MJ, Gonzales NL, Beall JM, Pechanec MY (2021) Basic structure, physiology, and biochemistry of connective tissues and extracellular matrix collagens.

Progress in Heritable Soft Connective Tissue Diseases 5-43.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-80614-9_2.

Miyashiro RA, Costa DH, Deuschle VCKN (2022) Suplementação de colágeno para envelhecimento cutâneo: uma revisão. BIOMOTRIZ 16:22–35.
<https://doi.org/10.33053/biomotriz.v16i1.548>.

Moraes JAR, Silva ALE, dos Santos, LMAL, Reis LV, Mallmann MA (2024) Produção mais limpa como ferramenta para o diferencial competitivo em empresas de pequeno porte: um apanhado geral e análise dos principais pontos da ferramenta. International Journal of Scientific Management and Tourism 10:e736-e736. <https://doi.org/10.55905/ijsmtv10n2-001>.

Mota JR, Gomes RC, Fernandes PA (2019) Impacto dos Resíduos Industriais no Meio Ambiente e na Saúde Humana: Uma Revisão Sistemática. Revista Ambiente & Água 14:1-10.

McCluskey AR, Hung KS, Marzec B, Sindt JO, Sommerdijk NA, Camp PJ, Nudelman F (2020) Disordered filaments mediate the fibrillogenesis of type I collagen in solution. Biomacromolecules 21:3631-3643. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.0c00667>.

Nasri M (2019) Bioactive peptides from fish collagen byproducts: A review. Byproducts from Agriculture and Fisheries: Adding Value for Food, Feed, Pharma, and Fuels 309-333. <https://doi.org/10.1002/9781119383956.ch13>.

Noorzai S, Verbeek C (2020) Collagen: From Waste to Gold. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94266>

Núñez SM, Guzmán F, Valencia P, Almonacid S, Cárdenas C (2020) Collagen as a source of bioactive peptides: A bioinformatics approach. Electronic Journal of Biotechnology 48:101-108. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2020.09.009>.

Oliveira Filho, Olavo Bilac Quaresma De; Pereira Junior, Ernesto Gomes; Santos, Nathália Leão Dos; Oliveira, Márcia Pantoja de. (2024) Tratamentos de resíduos sólidos industriais na região nordeste do Brasil. *Caderno Pedagógico*. <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n6-038>.

Oliveira NR, Da Silva IA, Pinto RR (2021) Colágeno: uma breve revisão Collagen: a brief review. Brazilian Journal of Development 7:103346-103355. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n11-11>.

Parisi M, Nanni A, Colonna M (2021) Recycling of chrome-tanned leather and its utilization as polymeric materials and in polymer-based composites: a review. Polymers 13:e429. <https://doi.org/10.3390/polym13030429>.

Paulino GMS, de França JV, Pessoa JGL, de Carvalho Martins ABB, da Silva BR (2024) A EFICÁCIA DAS MATRIZES DE COLÁGENO PARA RECOBRIMENTO RADICULAR EM CASOS DE RECESSÕES GENGIVAIS: REVISÃO DE LITERATURA. Brazilian Journal of Case Reports, 4(Suppl. 11): 31-31. <https://doi.org/10.52600/2763-583x.bjcr.2024.4.suppl.11.31>.

Pérez JM, Gómez-Guillén MC, Montero P (2019) A review on the use of fishery discards and wastes in the food industry. In: Food Industry Wastes. Academic Press (pp. 157-178).

Petcharat T, Benjakul S, Karnjanapratum S, Nalinanon S (2021) Ultrasound-assisted extraction of collagen from clown featherback (*Chitala ornata*) skin: yield and molecular characteristics. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 101:648-658. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10677>.

Prajaputra V et al. (2024) Exploring marine collagen: Sustainable sourcing, extraction methods, and cosmetic applications. *South African Journal of Chemical Engineering* 47:197-211. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.11.006>.

Rajabimashhadi Z, Gallo N, Salvatore L, Lionetto F (2023) Collagen derived from fish industry waste: progresses and challenges. *Polymers* 15:544. <https://doi.org/10.3390/polym15030544>.

Rahman V R et al. (2021) Potensi kolagen sebagai bahan aktif sediaan farmasi. *Majalah Farmasetika* 3 Disponível em: <https://doi.org/10.24198/mfarmasetika.v6i3.33621>.

Ramires MF, de Souza EL, Fontanive DE, Bianchetto R, Cezimbra JCG, Antonioli ZI (2021) Uso potencial de resíduos de abatedouro de suínos como fonte de nutrientes na agricultura. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente* 14:1-19. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021V14N1E006413>.

Rezvani Ghomi E, Nourbakhsh N, Akbari Kenari M, Zare M, Ramakrishna S (2021) Collagen-based biomaterials for biomedical applications. *Journal of biomedical materials research Part B: applied biomaterials* 109:1986-1999. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34881>.

Ricard-Blum S (2020) Extracellular matrix networks: from connections to functions. *Extracellular matrix omics* 101-129. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58330-9_6.

Rodrigues APS, de Souza Santos GÁ, Carvalho HJM, Schmiele M, Sobrinho PDSC, Rocha LDOF (2021) Efeito da adição de colágeno e sucralose nas características tecnológicas e sensoriais do iogurte. *Research, Society and Development* 10:e507101119841-e507101119841. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19841>.

Salo AM, Myllyharju J (2021) Prolyl and lysyl hydroxylases in collagen synthesis. *Experimental Dermatology*, 30:38-49. <https://doi.org/10.1111/exd.14197>.

Santos VB, de Oliveira Souza N, Maia SJM, da Silva Cetira JC, de Alencar Júnior EA, Tapety CMC, Saboia VD PA (2023) Efeitos de agentes de ligação cruzada no colágeno dentinário: uma revisão de literatura. *Brazilian Journal of Health Review* 6:18438-18454. <https://doi.org/10.34119/bjhrv6n4-342>.

Schmidt MM et al. (2021) Ultrasound as an alternative method to increase the extraction yield from chicken mechanically separated meat residue collagen. *Journal of Food Science and Technology* 58:2487-2496. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04755-1>.

Serna-Vázquez J et al. (2021) Latest insights into new deep eutectic solvents (DES) for sustainable extraction of phenolic compounds from natural sources. *Molecules* 26:e5037. <https://doi.org/10.3390/molecules26165037>.

Shigematsu E et al (2021) Desenvolvimento de bebidas em pó: comparação sensorial entre diferentes sabores e colágenos. *Produção Animal e Vegetal: Inovações e Atualidades*. <https://doi.org/10.53934/9786599539633-2>.

Silva, A. T.; Lopes, C.; Chinelate, G.; Berger, L. R. R. (2021) Alimentos funcionais em derivados lácteos: revisão. In: A indústria de alimentos e a economia circular: alimentando uma nova consciência. <https://doi.org/10.53934/9786599539640-15>.

Socas-Rodríguez B, Torres-Cornejo MV, Álvarez-Rivera G, Mendiola JA (2021) Deep eutectic solvents for the extraction of bioactive compounds from natural sources and agricultural by-products. *Applied Sciences* 11:e4897. <https://doi.org/10.3390/APP11114897>.

Shaik MI, Md Nor IN, Sarbon NM (2023) Effect of extraction time on the extractability and physicochemical properties of pepsin—Soluble collagen (PCS) from the skin of silver catfish (*Pangasius sp.*). *Gels* 9:e300. <https://doi.org/10.3390/gels9040300>.

Sousa RO, Alves AL, Carvalho DN, Martins E, Oliveira C, Silva TH, Reis RL (2020) Acid and enzymatic extraction of collagen from Atlantic cod (*Gadus Morhua*) swim bladders envisaging health-related applications. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition* 31:20-37. <https://doi.org/10.1080/09205063.2019.1669313>.

Qi Y et al. (2022) Terminal repeats impact collagen triple-helix stability through hydrogen bonding. *Chemical Science* 13:12567-12576. <https://doi.org/10.1039/d2sc03666e>.

Taga Y, Tanaka K, Hattori S, Mizuno K (2021) In-depth correlation analysis demonstrates that 4-hydroxyproline at the Yaa position of Gly-Xaa-Yaa repeats dominantly stabilizes collagen triple helix. *Matrix Biology Plus* 10:100067. <https://doi.org/10.1016/j.mbplus.2021.100067>.

Tang C et al. (2022) Collagen and its derivatives: From structure and properties to their applications in food industry. *Food Hydrocolloids* 131:e107748. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107748>.

TU, M.; CHEN, J. Bone Extracellular Matrix-Compositional and Structural Specificity and Its Application in Bone Bioengineering. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019; 20(10):2314.

Tvaroška I (2024) Glycosylation Modulates the Structure and Functions of Collagen: A Review. *Molecules* 29:e1417. <https://doi.org/10.3390/molecules29071417>.

Valenti WC, Barr

os HP, Moraes-Valenti P, Bueno GW, Cavalli RO (2021) Aquaculture in Brazil: past, present and future. *Aquaculture Reports* 19:e100611. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100611>

van Huizen NA, Ijzermans JN, Burgers PC, Luider TM (2020) Collagen analysis with mass spectrometry. *Mass spectrometry reviews* 39:309-335. <https://doi.org/10.1002/mas.21600>.

Vardanega R, Osorio-Tobón JF, Duba K (2022) Contributions of supercritical fluid extraction to sustainable development goal 9 in South America: industry, innovation, and infrastructure. *The Journal of Supercritical Fluids* 188:e105681. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105681>.

Varjão LM, Silva MRJM, Cardoso JMOC (2023) A RECICLAGEM E A PRESERVAÇÃO DO MEIO AMBIENTE. *Cadernos Macambira* 8:19. <https://doi.org/10.59033/cm.v8i2.881>

Wen L, Zhang Z, Sun DW, Sivagnanam SP, Tiwari BK (2020) Combination of emerging technologies for the extraction of bioactive compounds. *Critical reviews in food science and nutrition* 60:1826-1841. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1602823>.

Wieczorek C, Oliveira MM, Machado KE (2021) Benefícios do Colágeno Hidrolisado na Prevenção e no Tratamento do Envelhecimento Cutâneo/Benefits of Hydrolysed Collagen in the Prevention and Treatment of Skin Aging. *Saúde em Foco* 8:31-47. <https://doi.org/10.12819/rsf.2021.8.1.3>.

XU, S. et al. Avanços recentes na engenharia enzimática baseada em estrutura para reconstrução funcional. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 120, n. 12, p. 3427-3445, dez. 2023. <https://doi.org/10.1002/bit.28540>.

Xu S et al. (2023) Improving the sustainability of processing by-products: extraction and recent biological activities of collagen peptides. *Foods* 12:e1965. <https://doi.org/10.3390/foods12101965>.

Zain N, Hamdan M (2021) Tilapia fish collagen: Potential as halal biomaterial in tissue engineering applications. *Nusantara Halal Journal* (Halal awareness, opinion, research, and initiative 2:24-32. <https://doi.org/10.17977/um060.2021v2p024-032>.

ARTIGO 2

RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental
ISSN: 1981-982X
Submission date: 1/3/2025
Acceptance date: 2/28/2025
DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n4-089>
Organization: Interinstitutional Scientific Committee
Chief Editor: Ana Carolina Messias de Souza Ferreira da Costa
Assessment: Double Blind Review pelo SEER/OJS

"Caprinocultura no Nordeste do Brasil: Impactos Socioeconômicos e Sustentabilidade no Semiárido"

Jamile Maria Pereira Bastos Lira de Vasconcelos
Amanda Vieira de Barros
Tayane de Cássia Dias Mendes Silva
Lorena Amara Lira de Moraes
Jaqueline dos Santos Silva Pinheiro Rodrigues
Robson Coelho de Araújo Neri
Ranilson Souza Bezerra
Maria Betânia Melo de Oliveira

RESUMO

Este artigo tem como objetivo analisar os impactos socioeconômicos da caprinocultura no nordeste do Brasil, destacando seu papel estratégico na segurança alimentar, geração de renda e fortalecimento da agricultura familiar. Para sua realização, foram utilizados artigos científicos, relatórios e documentos institucionais da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e a Food and Agriculture Organization (FAO). Este estudo integra aspectos históricos, sociais, econômicos e ambientais, e evidencia o papel estratégico da caprinocultura como uma atividade de grande potencial para o desenvolvimento sustentável no nordeste brasileiro; além de ressaltar a importância de investimentos contínuos e abordagens integradas para o fortalecimento da cadeia produtiva e do desenvolvimento regional da Caprinocultura.

Palavras-chave: Geração de Renda, Economia Rural, Produção Animal.

ABSTRACT

This article aims to analyze the socioeconomic impacts of goat farming in northeastern Brazil, highlighting its strategic role in food security, income generation and strengthening of family farming. Scientific articles, reports and institutional documents from the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA) and the Food and Agriculture Organization (FAO) were used for this study. This study integrates historical, social, economic and environmental aspects, and highlights the strategic role of goat farming as an activity with great potential for sustainable development in northeastern Brazil; in addition, it highlights the importance of continuous investments and integrated approaches to strengthening the production chain and regional development of goat farming.

Keywords: Income generation, Rural economy, Animal production.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma longa tradição na criação de caprinos, desempenhando um papel importante no sustento econômico e nutricional de muitas famílias rurais, especialmente aquelas de baixa renda (Sorio, 2017). A caprinocultura, introduzida no país pelos colonizadores portugueses, consolidou-se como uma prática de subsistência e uma atividade econômica de destaque, especialmente no Nordeste, onde 96% do rebanho nacional está concentrado (EMBRAPA, 2024; Dutra et al., 2024). A rusticidade e a alta adaptabilidade dos caprinos às condições do Semiárido brasileiro são apontadas como fatores essenciais para a expansão da atividade na região (Batista & Souza, 2015).

Além de contribuir para a segurança alimentar e geração de renda, a caprinocultura está ligada à preservação sociocultural das comunidades rurais do Nordeste, promovendo a permanência do homem no campo (Nascimento et al., 2022). Apesar de ser considerada durante anos uma atividade marginal no agronegócio, estudos têm evidenciado sua relevância econômica e potencial de crescimento, especialmente no segmento de produção de leite (Felisberto et al., 2016).

Este artigo de revisão explora os avanços e desafios da caprinocultura no Brasil, com foco em sua importância socioeconômica e sustentável. Particular atenção é dada à cadeia produtiva do leite de cabra, que se destaca por sua estruturação e por subprodutos com alto valor agregado, tanto no mercado interno quanto externo (Embrapa, 2020). A análise das principais características produtivas, desafios enfrentados pelos criadores e perspectivas para o setor, busca contribuir para a ampliação do conhecimento sobre essa prática milenar e suas implicações no contexto contemporâneo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo realizou uma revisão integrativa da literatura com o objetivo de explorar o contexto histórico, social e ambiental da caprinocultura no Nordeste Brasileiro. A revisão integrativa foi escolhida por permitir a síntese de múltiplas pesquisas e abordagens, oferecendo um panorama amplo e crítico sobre o tema, ao integrar resultados quantitativos e qualitativos de estudos e relatórios relevantes. A estrutura metodológica seguiu etapas essenciais: definição da questão norteadora, estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão, seleção das bases de dados e estratégias de busca, extração de dados, avaliação crítica e síntese dos resultados.

A questão norteadora deste estudo foi: "Como a caprinocultura no Nordeste Brasileiro tem se desenvolvido sob as perspectivas histórica, social e ambiental, considerando seu papel socioeconômico e sustentável segundo estudos e relatórios de organizações como EMBRAPA e FAO?".

O levantamento bibliográfico foi realizado em bases de dados como SciELO (Scientific Electronic Library Online), LILACS (Literatura Latino-Americana e do Caribe em Ciências da Saúde), Science Direct e Web of Science, além de relatórios técnicos publicados pela EMBRAPA e pela FAO. A pesquisa utilizou uma combinação estruturada de palavras-chave e operadores booleanos, como "caprinocultura" AND "Nordeste Brasileiro" AND "sustentabilidade" AND "impactos socioeconômicos" AND "história".

Para garantir a relevância e atualidade dos dados, os critérios de inclusão definidos foram: estudos e relatórios publicados entre janeiro de 2015 e janeiro de 2025; textos completos disponíveis em inglês, espanhol ou português; publicações que abordassem diretamente a

caprinocultura no Nordeste Brasileiro sob as perspectivas histórica, social ou ambiental; revisões bibliográficas, estudos de caso, relatórios institucionais e artigos acadêmicos. Excluíram-se documentos que não apresentassem descrição clara das abordagens sobre caprinocultura, irrelevantes ao contexto geográfico ou temático do estudo ou estivessem indisponíveis na íntegra.

Os estudos selecionados foram avaliados criticamente, considerando aspectos como as transformações históricas da prática, os impactos socioeconômicos na região, as implicações ambientais e as políticas públicas associadas. Os dados foram organizados e categorizados com base nas perspectivas analisadas, permitindo compilar um panorama abrangente da caprinocultura. Essa abordagem evidenciou os desafios e oportunidades associados à prática, destacando seu papel como vetor de desenvolvimento sustentável na região.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Características Gerais da Prática da Caprinocultura no Brasil

O Brasil tem uma longa tradição na criação de caprinos, que desempenha um papel fundamental na sustentação econômica e nutricional de muitas famílias rurais, especialmente aquelas de menor renda (Sorio, 2017). Diante dessa relevância social, o país tem experimentado uma demanda crescente pelos produtos provenientes da caprinocultura, consolidando-se também como um importante importador, considerando a quantidade de animais e produtos desse setor que entraram no país desde a década de 1990 (Embrapa, 2016).

A cabra (*Capra aegagrus hircus*), ou bode, no masculino é uma espécie domesticada herbívora de capríneo (*Caprinae*) pertencente ao gênero *Capra*. A caprinocultura, dedicada à criação e comercialização deste animal é uma atividade econômica e de subsistência de longa data, introduzida no Brasil pelos colonizadores portugueses, segundo Sidersky (2017). Conforme o autor, esses animais desenvolveram uma notável capacidade de adaptação às condições climáticas típicas da região Semiárida. Um dos seus aspectos relevantes é o baixo custo envolvido tanto na sua implantação quanto na sua manutenção (Nunes et al. 2018).

Na região nordeste, a criação de caprinos se desenvolveu de maneira gradual e configura-se como uma atividade de extrema relevância, seja na questão econômica, gerando renda para a população, seja no quesito sociocultural, contribuindo para a estabilização do homem no campo (Felisberto et al., 2016). Por um longo período, esse segmento produtivo foi considerado em posição marginal em comparação a outras áreas do agronegócio (Ribeiro e Alencar, 2018). No entanto, pesquisas focadas nas cadeias produtivas locais e regionais têm contribuído para a desmistificação dessa percepção, evidenciando sua relevância e notoriedade (Souza e Barros, 2017).

A cadeia produtiva da caprinocultura abrange a produção de leite, carne e pele. No entanto, a comercialização da carne e da pele enfrenta limitações devido à falta de uma estrutura organizada na cadeia produtiva. O abate clandestino representa o principal entrave na produção de carne. Embora essa proteína animal seja bastante importante para as populações dos municípios do interior da região do Semiárido brasileiro, também há uma demanda potencial para a comercialização da carne caprina em restaurantes que atendem a um padrão de consumo mais elevado nas regiões Sul e Sudeste, especialmente durante datas comemorativas de festejos tradicionais (Neres et al., 2024; Rosanova et al., 2024).

Em contrapartida, observa-se uma cadeia produtiva mais estruturada no segmento de produção, processamento e beneficiamento de leite, o que direcionou o foco desta pesquisa para a caprinocultura de leite na Paraíba (Monteiro et al., 2021; Nascimento et al., 2022). Duas regiões no Brasil incentivam a produção de leite de cabra: o Nordeste e o Sudeste. No Nordeste, há apoio governamental, tanto federal quanto estadual, por meio do Programa de Aquisição de Alimentos (PAA), em que o governo adquire o leite caprino, com o objetivo de fortalecer a agricultura familiar e, simultaneamente, fornecer o produto a uma parcela da população em situação de vulnerabilidade alimentar. Já no Sudeste, segunda maior região produtora de leite no Brasil, com destaque para os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo (EMBRAPA, 2024), o estímulo está vinculado a um nicho de mercado especializado, que valoriza produtos diferenciados com valor agregado, como os itens "gourmet" e "nutracêuticos" (Silva & Nunes, 2024; Sambuichi et al., 2019; Moraes & Filho, 2017).

Em 2023, o rebanho caprino no Brasil (Tabela 1) foi estimado em cerca de 12.891 milhões de cabeças, representando um aumento de aproximadamente 500 mil cabeças, ou 4,0%, em comparação com 2022. Esse crescimento foi impulsionado principalmente pelo aumento de

4,5% nos rebanhos caprinos da região Nordeste, somando 12,37 milhões de cabeças. Além do Nordeste, apenas a região Norte apresentou crescimento, com um aumento de 2,8% no rebanho caprino. Nas demais regiões, a queda mais acentuada ocorreu no Centro-Oeste, que registrou uma retração de quase 18% no período (EMBRAPA, 2024).

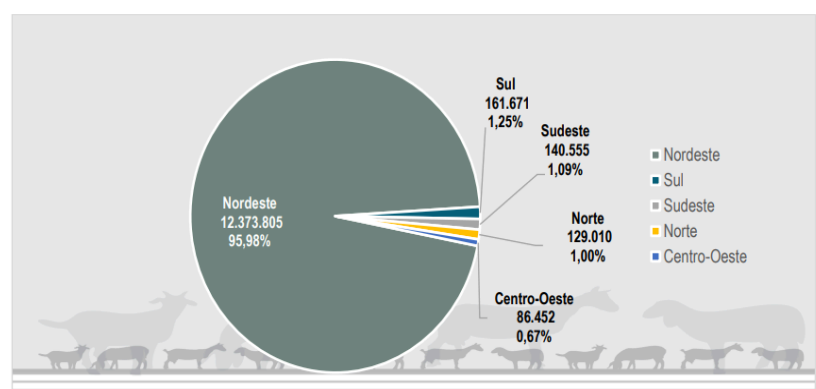
Tabela 1: Evolução do rebanho de caprinos por região do Brasil no período de 2019 a 2023.

Brasil e Grande Região	Ano					
	2019	2020	2021	2022	20223	Variação (%) 2023/2022
Nordeste	11.024.373	11.497.991	11.325.865	11.838.172	12.373.805	4,5%
Sul	206.739	187.679	182.319	173.301	161.671	-6,7%
Sudeste	157.570	154.560	148.706	148.170	140.555	-5,1%
Norte	146.959	161.368	136.863	125.494	129.010	2,8%
Centro-Oeste	101.688	100.088	103.451	105.353	86.452	-17,9%
Brasil	11.637.329	12.101.686	11.897.204	12.390.490	12.891.493	4,04%

Fonte: PPM, IBGE (2024)

A distribuição do rebanho caprino por região (Figura 1) mostra que o Nordeste concentra 96% do rebanho nacional, seguido pela região Sul com 1,3%, Sudeste com 1,1%, Norte com 1,0% e Centro-Oeste com 0,7% do total de caprinos no Brasil (EMBRAPA, 2024).

Figura 1: Distribuição do efetivo de rebanhos por região do Brasil em 2023



Fonte: PPM, IBGE

A análise da distribuição dos rebanhos caprinos por Estado (Tabela 2) revela que a região Nordeste se destaca, com sete estados entre os dez maiores rebanhos caprinos do país, correspondendo a 95,3% do total nacional. Bahia, Pernambuco e Piauí, em conjunto, representam 72,5% do rebanho caprino do Brasil. As maiores reduções no número de animais foram observadas nos estados de Mato Grosso (-25,4%), Tocantins (-21,5%), Mato Grosso do Sul (-18,6%), Espírito Santo (-15,6%) e Rio de Janeiro (-14,1%). Todos os estados das regiões Sul e Sudeste registraram diminuições em seus rebanhos caprinos. Na região Norte, houve uma divisão nas tendências: enquanto Amapá, Acre, Tocantins e Amazonas registraram quedas, Pará, Roraima e Rondônia apresentaram crescimento. No Centro-Oeste, apenas o Distrito Federal teve aumento no rebanho caprino (EMBRAPA, 2024).

Tabela 2: Evolução do rebanho de caprinos por estados do Brasil no período entre 2019 a 2023.

Estado	2019	2020	2021	2022	2023	Variação % (2023/2022)
Bahia	3.504.337	3.645.234	3.409.751	3.738.229	3.955.274	5,8%
Pernambuco	2.933.451	3.116.496	3.127.114	3.226.616	3.364.369	4,3%
Piauí	1.874.530	1.914.146	1.945.903	1.982.362	2.023.532	2,1%
Ceará	1.131.862	1.164.677	1.163.844	1.180.288	1.156.632	-2,0%
Paraíba	692.427	739.915	764.758	796.472	826.432	3,8%
Rio Grande do Norte	433.715	457.276	448.890	459.519	574.775	25,1%
Maranhão	360.503	361.179	360.155	358.464	383.563	7,0%
Minas Gerais	76.520	75.863	71.804	72.896	71.643	-1,7%
Paraná	102.336	85.338	82.124	75.397	67.438	-10,6%
Pará	81.546	98.167	77.707	66.191	66.252	0,1%
Alagoas	71.584	76.627	81.450	70.839	64.482	-9,0%
Rio Grande do Sul	66.558	61.694	60.683	58.999	57.804	-2,0%
São Paulo	54.585	53.212	52.384	51.931	49.008	-5,6%
Santa Catarina	37.845	40.647	39.512	38.905	36.429	-6,4%
Goiás	33.538	33.893	36.464	39.904	34.970	-12,4%
Mato Grosso	37.218	36.242	38.335	37.361	27.879	-25,4%
Sergipe	21.964	22.441	24.000	25.383	24.746	-2,5%
Mato Grosso do Sul	27.543	26.332	25.226	24.566	20.001	-18,6%
Roraima	10.820	11.099	11.459	11.977	16.945	41,5%
Amazonas	15.149	15.233	15.355	16.339	15.414	-5,7%
Rio de Janeiro	13.606	13.560	13.542	13.840	11.882	-14,1%
Tocantins	17.264	15.379	14.211	13.028	10.229	-21,5%
Acre	12.355	12.039	9.467	9.908	9.223	-6,9%
Rondônia	7.639	7.296	6.534	6.087	9.064	48,9%
Espírito Santo	12.859	11.925	10.976	9.503	8.022	-15,6%
Distrito Federal	3.389	3.621	3.426	3.522	3.602	2,3%
Amapá	2.186	2.155	2.130	1.964	1.883	-4,1%
Brasil	11.637.329	12.101.298	11.897.204	12.390.490	12.891.493	4,04%

Fonte: IBGE, 2024

A distribuição dos rebanhos caprinos por município (Tabela 3) mostra uma concentração maior do que a observada no rebanho ovino. Os cinco municípios que se destacam na produção

de caprinos — Casa Nova, Floresta, Juazeiro, Curaçá e Petrolina — são responsáveis por 16,7% do total do rebanho caprino nacional. Além disso, os vinte maiores municípios produtores representam 34,9% do rebanho nacional (EMBRAPA, 2024).

Tabela 3: Principais municípios produtores de caprinos no Brasil de 2019 a 2023.

Município/UF	Rebanho Caprino					
	Ano					
	2019	2020	2021	2022	2023	Variação % (2023/2022)
Casa Nova (BA)	528.867	538.078	585.823	690.115	725.125	5,1%
Floresta (PE)	320.000	360.000	350.000	360.000	426.195	18,4%
Juazeiro (BA)	272.874	286.830	227.684	339.576	371.178	9,3%
Curaçá (BA)	266.856	282.523	206.864	316.475	338.283	6,9%
Petrolina (PE)	264.000	269.000	272.000	290.000	295.000	1,7%
Pilão Arcado (BA)	135.099	177.761	209.713	222.296	246.749	11,0%
Remanso (BA)	169.822	186.644	200.015	220.017	225.421	2,5%
Uauá (BA)	176.318	183.342	187.605	196.410	209.509	6,7%
Sento Sé (BA)	126.336	141.285	150.000	166.453	171.345	2,9%
Custódia (PE)	144.441	123.837	146.250	158.640	164.640	3,8%
Sertânia (PE)	151.167	158.729	161.960	149.350	150.700	0,9%
Dormentes (PE)	130.000	132.000	134.000	140.000	143.000	2,1%
Parnamirim (PE)	139.852	123.099	136.670	150.337	142.825	-5,0%
Lagoa Grande (PE)	117.000	125.000	129.000	138.000	142.000	2,9%
Belém do São Francisco (PE)	90.880	124.824	126.963	130.734	133.255	1,9%
Carnaubeira da Penha (PE)	121.039	119.623	123.750	128.178	132.229	3,2%
Macururé (BA)	103.657	106.700	111.085	113.094	123.907	9,6%
Afrânio (PE)	90.000	96.000	95.000	106.000	120.000	13,2%
Santa Maria da Boa Vista (PE)	103.000	106.000	109.000	115.000	118.000	2,6%
Abaré (BA)	97.426	107.168	110.300	111.844	116.677	4,3%
Brasil	11.637.329	12.101.686	11.897.204	12.390.490	12.891.493	4,04%

Fonte: IBGE , 2024.

Essa distribuição evidencia a forte concentração da caprinocultura em determinadas regiões, especialmente no semiárido nordestino, onde as condições climáticas e a disponibilidade de pastagens favorecem a criação desses animais. A predominância dos municípios listados na Tabela 3 reforça a importância da atividade para a economia local, sendo uma fonte significativa de renda para pequenos e médios produtores.

3.2 Importância socioeconômica da caprinocultura

A caprinocultura desempenha um papel significativo nas economias locais, particularmente nas regiões semiáridas do Brasil. Ela fornece uma fonte alternativa de renda e segurança alimentar para pequenos e médios produtores (Barbosa; Xavier, 2019). O setor

contribui para a criação de empregos e desenvolvimento rural, com a produção de leite de cabra sendo especialmente atraente para agricultores familiares, devido ao seu fluxo de caixa dinâmico e facilidade de gestão (Felisberto et al., 2016). A caprinocultura no Brasil, especialmente no Nordeste, não se limita à produção de carne e leite, mas também abrange a exploração de diversos subprodutos que podem agregar valor à atividade. Abaixo serão descritas características gerais de produtos oriundos da caprinocultura:

3.2.1 Leite

A produção de leite de animais não tradicionais representa aproximadamente 17% da produção mundial total, o que corresponde a cerca de 133 milhões de toneladas por ano. Dentro desse grupo, as cabras são responsáveis pela produção de cerca de 12,2 milhões de toneladas métricas de leite, proveniente de um rebanho estimado em 780 milhões de animais. Esses números são aproximados, uma vez que a criação destes animais é comum em países em desenvolvimento e subdesenvolvidos, onde as informações sobre produção agropecuária e pecuária não são sempre bem documentadas (Turkmen, 2017; Ranadheera et al., 2019).

A composição do leite desses animais é um dos principais fatores que têm aumentado sua visibilidade, destacando-se por várias propriedades benéficas à saúde. O perfil de ácidos graxos, as proteínas presentes, os menores tamanhos dos glóbulos de gordura, a ausência de aglutinina e a menor quantidade de α s1-caseína são características que favorecem a digestibilidade do leite caprino. Além disso, o leite de cabra tem uma coloração branca pura, com um odor e sabor diferenciados, atribuídos à presença de ácidos graxos de cadeia curta e média (6–16 carbonos), como os ácidos capróico, caprílico e cáprico. Esses ácidos são diretamente utilizados como fonte de energia, devido ao seu tamanho menor, o que impede seu depósito no tecido adiposo. Além disso, apresentam potenciais bioativos, como a capacidade de prevenir a resistência à insulina, a esteatose e a inflamação hepática, como demonstrado em estudos com modelos animais (Clark & Mora García, 2017; Delgadillo-Puga et al., 2020).

O perfil de ácidos graxos do leite caprino, inclui também o Ácido Linoleico Conjugado (CLA), que está associado a diversos efeitos benéficos à saúde. O CLA tem mostrado reduzir o estresse oxidativo, participar nas reações inflamatórias e na síntese de mediadores inflamatórios, como os ácidos araquidônicos. Além disso, ele desempenha um papel protetor importante no

sistema nervoso e cardiovascular (Salari et al., 2016; Gumus & Gharibzahedi, 2021; Mollica et al., 2021).

3.2.2 Carne

A produção de carne de cabra no Brasil tem crescido, especialmente no Nordeste, onde a demanda por este tipo de carne é tradicionalmente alta devido ao consumo cultural. Esta procura deve-se especialmente ao seu baixo teor de gordura, o que a torna apreciada em diversas culinárias regionais (Neres et al., 2024; Campos, 2023). Segundo a FAO (2022), esta carne é uma excelente alternativa para pequenos produtores, pois a caprinocultura é uma atividade de baixo custo e requer menos recursos comparado à pecuária bovina. Além disso, as cabras se adaptam bem ao clima semiárido nordestino, o que torna a atividade mais sustentável na região. A produção de carne caprina no Brasil também se destaca pela sua versatilidade, sendo utilizada tanto em mercados locais quanto exportada para mercados internacionais (FAO, 2022).

3.2.3 Pele

A pele de caprinos tem grande valor no mercado de couro, especialmente na fabricação de produtos de alta qualidade, como: bolsas, calçados e artigos de vestuário. A pele caprina é apreciada pela sua maciez, flexibilidade e resistência, especialmente quando comparada à pele bovina (Nascimento et al., 2022). A indústria de couro brasileira, com foco na pele de caprino, tem experimentado um crescimento contínuo, especialmente devido à qualidade do couro produzido no Nordeste (Santos et al. 2023). A caprinocultura no semiárido contribui significativamente para essa cadeia produtiva, sendo um diferencial competitivo para o Brasil no mercado internacional de couro, especialmente para artigos de luxo e de alta durabilidade (Nascimento et al., 2022).

3.2.4 Vísceras

As vísceras de caprinos, que incluem fígado, rins, pulmões e intestinos, também possuem grande valor na indústria de alimentos e na medicina veterinária (Cavalcante et al., 2022). Em muitas regiões, esses tipos de vísceras são utilizadas na alimentação humana, especialmente em mercados de nicho (Cavalcante et al., 2022). Além disso, a indústria de medicamentos, cosméticos e suplementos utiliza subprodutos como colágeno e outros compostos bioativos extraídos de vísceras de animais (Silva et al., 2020; Costa et al., 2020; Campos et al., 2022)

3.2.5 Esterco

O esterco de cabra tem um valor significativo como fertilizante orgânico, especialmente na agricultura de subsistência e na agricultura familiar, muito comuns nas regiões semiáridas do Nordeste. Este é rico em nutrientes, como: nitrogênio, fósforo e potássio, essenciais para o crescimento das plantas (Martins et al, 2016). Segundo Aguiar (2020), seu uso na agricultura melhora a qualidade do solo, favorecendo a sustentabilidade das práticas agrícolas e a redução da dependência de fertilizantes químicos. O esterco também pode ser utilizado na produção de biogás, promovendo uma gestão de resíduos mais eficiente e sustentável (Silva et al, 2021).

3.3 Impacto Ambiental da Caprinocultura

Os impactos ambientais relacionados à caprinocultura, podem ser divididos entre negativos e positivos. Entre os impactos negativos estão a degradação do solo, as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e a perda de biodiversidade, especialmente em regiões como o Nordeste do Brasil (Silva, 2019). Por outro lado, o manejo responsável através de práticas sustentáveis como o uso de subprodutos orgânicos, restauração da vegetação nativa, integração de sistemas agropecuários e inovações tecnológicas podem mitigar esses impactos e promover benefícios ao meio ambiente (Guabiraba et al, 2023). Na tabela 4, estão os principais fatores que a caprinocultura pode impactar ambientalmente.

Tabela 4: Fatores que impactam a caprinocultura.

Categoria	Aspectos Negativos	Aspectos Positivos e Práticas Sustentáveis
Degradação do Solo	Pisoteio e desmatamento levam à erosão e perda de fertilidade.	Uso de esterco caprino melhora a qualidade do solo e reduz fertilizantes químicos.
Emissões de GEE	Produção de metano pela digestão dos animais contribui para mudanças climáticas.	Dietas eficientes e manejo sustentável podem reduzir as emissões de metano.
Desmatamento e Perda de Biodiversidade	Expansão desordenada causa fragmentação de habitats e destruição de	Integração com sistemas agroflorestais e restauração de áreas degradadas preservam

	ecossistemas naturais.	biodiversidade e ecossistemas.
Uso de Subprodutos Orgânicos	Dependência de fertilizantes químicos em algumas práticas convencionais.	Esterco caprino promove ciclos sustentáveis, regeneração do solo e menor poluição.
Restauração da Vegetação Nativa	Fragmentação de habitats devido ao manejo inadequado.	Combinação de caprinocultura com práticas de restauração ambiental melhora ecossistemas locais.
Integração de Sistemas	Manejo isolado pode causar pressão excessiva sobre o solo e vegetação.	Sistemas integrados tornam o uso da terra mais eficiente e sustentável a longo prazo.
Tecnologias e Inovações	Uso insuficiente de tecnologias pode ampliar os impactos ambientais negativos.	Práticas modernas de manejo reduzem impactos no solo e as emissões de gases.

Fonte: A autora, 2025 (adaptado de: FAO, 2022; Rodriguez et al, 2023)

O sucesso da caprinocultura sustentável depende da adoção de práticas que conciliam produtividade e preservação ambiental, garantindo a longevidade dessa atividade tão relevante para o Nordeste brasileiro e outras regiões semiáridas (FAO, 2022). Além disso, o desenvolvimento de políticas públicas voltadas para a capacitação de produtores e o incentivo à pesquisa em tecnologias sustentáveis podem ampliar a eficiência da caprinocultura e reduzir seus impactos negativos (Rodriguez e Silva, 2023; Smith e Davies, 2023; Sunderman, 2021).

3.4 Desafios e perspectivas da caprinocultura no Brasil

A caprinocultura no Brasil, especialmente no Nordeste, enfrenta desafios significativos em relação à qualificação da oferta de produtos, um problema destacado pelo Ministério da Indústria e Comércio (Brasil, 2017). A região, que possui grande relevância neste setor, não apresenta uma oferta de produtos que atenda plenamente às demandas do mercado. Conforme apontado por Alves e Souza (2015), essa deficiência está, em grande parte, relacionada à insuficiente remuneração dos produtores, à falta de capacitação técnica e à fragilidade organizacional dos mesmos, o que resulta em uma oferta de produtos irregular e inconsistente ao longo do ano.

Outro fator que contribui para esses desafios é o fato de muitos produtores não adotarem a caprinocultura como atividade principal, preferindo focar em outras práticas, como a bovinocultura de corte. Essa diversificação de atividades resulta em uma especialização limitada da mão de obra e em um déficit de informações técnicas sobre o manejo e desenvolvimento da atividade, independentemente da qualidade genética dos rebanhos (Sorio, 2017).

A estrutura de criação, fator essencial para o desenvolvimento eficiente da caprinovinocultura, apresenta características específicas que podem variar conforme a região. De maneira geral, essa estrutura inclui instalações e equipamentos como centros de manejo, apriscos, salas de ordenha, instalações para reprodutores, currais de parição, áreas para isolamento de animais e infraestrutura complementar (comedouros, bebedouros, saleiros, pedilúvios, cercas, esterqueiras, depósitos de ração e farmácias veterinárias) (Neto et al., 2019, Castro et al., 2022, Teixeira et al., 2015).

Adicionalmente, os sistemas produtivos utilizados na caprinocultura são outro ponto importante. Estes podem ser classificados como intensivo, semi-intensivo e extensivo (Silva, 2018). Silva (2018) observa que a maioria dos criadores familiares no Brasil adota os sistemas semi-intensivo e extensivo. Entretanto, no semiárido nordestino, o sistema extensivo predomina, em razão da escassez de alternativas econômicas e da baixa disponibilidade de capital; o que torna esse sistema mais viável, devido ao custo reduzido com terra e mão de obra (Lacerda et al., 2022; Cariello, 2023).

Um estudo do Sistema Nacional de Aprendizagem Rural (Senar, 2019) aponta que o sistema semi-intensivo oferece melhores índices de produtividade quando comparado aos outros sistemas, especialmente ao considerar as condições ambientais do país. Esse sistema possibilita um manejo mais eficiente dos rebanhos, tanto alimentar quanto sanitário. Por outro lado, o sistema extensivo, embora seja mais simples e de menor custo de produção, depende fortemente das condições climáticas e da fertilidade do solo. Além disso, a adoção de tecnologias no sistema extensivo é limitada, o que compromete a produtividade.

O ciclo de produção de caprinos pode variar conforme os objetivos econômicos ou os produtos desejados. Para a produção de carne, o ciclo é de cerca de 90 dias, resultando na produção de cabritos desmamados. Se o objetivo é o abate, o ciclo se estende a 180 dias, enquanto para a produção de matrizes e reprodutores, o ciclo chega a aproximadamente 270 dias.

Para a produção de leite, a lactação pode durar entre 240 e 305 dias, dependendo da raça (Monteiro et al., 2021; Santos et al., 2023).

A carne e o leite de caprinos são, principalmente, destinados a abatedouros, frigoríficos e unidades de beneficiamento, onde são processados para a produção de linguiças, cortes de carne fresca, salgadas e secas, queijos, iogurtes, entre outros (Sidersky, 2018). Já a pele tem como destino principal a indústria de vestuário e calçados (Amarilho-Silveira; Brondani e Lemes, 2015). Sidersky (2018) também destaca que há um potencial significativo para a exploração econômica de produtos secundários derivados desses animais, como vísceras (língua, fígado, coração e pulmões), chifres, esterco e produtos artesanais, que ainda são pouco explorados no Brasil.

3.4.1 Desafios da caprinocultura no semiárido

O Nordeste brasileiro apresenta aproximadamente 1.640.00 km² de extensão, e representa 19% de todo o território nacional (Rocha; Melo, 2024). A criação de caprinos e ovinos no Brasil está concentrada principalmente na região Nordeste, com 12,6 milhões de ovinos e 10,1 milhões de caprinos, representando 93,9% e 66,7% do rebanho nacional, respectivamente (IBGE, 2018; Carvalho et al., 2020). A caprinocultura no semiárido nordestino enfrenta desafios complexos que afetam a sustentabilidade e o potencial socioeconômico da atividade.

Embora a região detenha a maior parte do rebanho nacional de caprinos, a criação de cabras têm sido reconhecidas como uma atividade rural marginal ou de subsistência, associada à baixa produtividade, baixa renda, pouco uso de tecnologias e com cadeia produtiva caprina desarticulada (agricultores, fabricantes, distribuidores, mercado e consumidores), o que caracteriza uma evolução lenta da dinâmica produtiva caprina.

O clima árido e semiárido, com chuvas escassas e irregulares, representa um dos maiores obstáculos. A escassez hídrica impacta diretamente a disponibilidade de forragem e a saúde animal, exigindo estratégias de manejo que garantam a sustentabilidade (Souza et al., 2019). As mudanças climáticas, como o aumento das temperaturas e a diminuição das precipitações,

intensificam a necessidade de recursos hídricos adequados, que são frequentemente escassos ou mal distribuídos na região (Nikolaou et al., 2020; Hussain et al., 2021).

A carência de água potável afeta a produtividade, o bem-estar dos animais e a eficiência reprodutiva, dificultando o crescimento sustentável da caprinocultura (Silva et al., 2022). No passado, quando da ocorrência de uma grande seca, as perdas do rebanho podiam chegar a quase 100 %, por falta d'água e de alimento. No geral, nos meses mais secos, há perda de peso, eliminando o ganho obtido nos meses de chuva e pasto farto, com isto a produtividade é baixa (Grandin, 2022).

Os caprinos são mais recomendados para caatinga arbustiva e arbórea, mas respondem pouco, em ganho de produtividade, à melhoria das pastagens (Moura et al., 2024). No entanto, a desertificação, impulsionada por práticas agrícolas inadequadas e fatores climáticos, compromete ainda mais a produtividade do solo e a disponibilidade de pastagens. A degradação da terra no semiárido representa uma ameaça direta à caprinocultura, exigindo práticas de manejo sustentável e políticas públicas eficazes para conter a deterioração ambiental (Hossain et al., 2020; Rocha; Melo, 2024).

A caprinocultura na região ainda é marcada pelo baixo uso de tecnologias avançadas, como manejo nutricional eficiente e controle de doenças, resultando em baixa produtividade do leite e da carne. Estudos revelam que grande parte dos produtores não mantém o leite refrigerado, comprometendo a qualidade do produto. Além disso, a ausência de práticas adequadas de controle sanitário expõe o rebanho a doenças que limitam a produção, agravando a vulnerabilidade socioeconômica dos pequenos produtores (Silva et al., 2015; Guilherme et al., 2017; Carvalho et al., 2020)

Outro desafio significativo é a desarticulação da cadeia produtiva caprina, desde a produção até a comercialização. A informalidade na atividade limita a competitividade e impede o acesso a mercados mais amplos e lucrativos (Souza et al., 2019; Navarrete-Molina et al., 2020). A compreensão e coordenação dos atores da cadeia, incluindo agricultores, distribuidores e consumidores, são fundamentais para o desenvolvimento da atividade. A falta de políticas integradas para assistência técnica e extensão rural também prejudica a capacidade dos pequenos produtores de alcançar mercados mais rentáveis. A falta de dados precisos sobre o número de produtores, localização das propriedades e características do rebanho dificulta a formulação

dessas políticas públicas eficazes. A ausência de diagnósticos aprofundados sobre a cadeia produtiva limita a capacidade de intervenção governamental para melhorar o manejo e a comercialização dos produtos caprinos (Souza et al., 2019).

Os desafios enfrentados pela caprinocultura no semiárido nordestino exigem uma abordagem integrada que combine inovação tecnológica, políticas públicas eficazes e um maior envolvimento dos atores da cadeia produtiva. A criação de um ambiente propício ao desenvolvimento sustentável da caprinocultura pode contribuir para a geração de renda, melhoria da qualidade de vida dos pequenos produtores e preservação dos recursos naturais na região (Meirelles et al., 2024; Neres et al., 2024).

3.4.2 Tecnologia e Inovação na Caprinocultura

Mesmo enfrentando desafios, a caprinocultura no semiárido brasileiro está vivenciando um momento de transição, impulsionado pelos avanços que visam transformar a atividade em um setor mais eficiente, competitivo e sustentável. Entre as inovações mais significativas, destaca-se a Pecuária de Precisão (PLF, Precision Livestock Farming), que tem revolucionado o manejo animal ao integrar tecnologias avançadas de monitoramento (Vercruysse et al., 2018; Silva et al., 2022).

A Identificação Eletrônica (EID), permite o uso de etiquetas eletrônicas para que cada animal possa ser monitorado de forma individual. Os animais são acompanhados em tempo real, coletando dados sobre peso, comportamento, saúde e padrões de alimentação (Cappai et al., 2018; Aleluia et al., 2022). Isso proporciona uma tomada de decisão mais assertiva, aumentando a eficiência na gestão dos rebanhos e reduzindo desperdícios. Além disso, sistemas automatizados, como: balanças eletrônicas e separadores automáticos, têm contribuído para otimizar a mão de obra, algo especialmente importante em regiões onde os recursos humanos são limitados (Silva et al., 2022).

Outro avanço tecnológico que merece destaque é a aplicação de ferramentas “ômicas” — genômica, proteômica e metabolômica. Essas abordagens permitem entender, em nível molecular, como os caprinos respondem ao estresse causado por fatores, como: calor excessivo e falta de pastagem (Yu et al., 2020; Wang et al., 2023). A partir dessas análises, é possível identificar biomarcadores que ajudam na seleção de raças mais resilientes, capazes de manter a produtividade mesmo em condições extremas. Isso é fundamental para o semiárido, onde a

suplementação alimentar pode ser inviável em áreas extensas, tornando a adaptação genética dos animais um diferencial estratégico para a sustentabilidade da produção (Ribeiro et al., 2020; Shashank et al., 2024).

As mudanças climáticas adicionam uma camada extra de complexidade ao cenário. O estresse térmico é um dos maiores desafios para a caprinocultura, afetando diretamente o bem-estar e a produtividade dos animais. O uso de sensores de temperatura ruminal e acelerômetros integrados a sistemas de localização por GPS permite monitorar a temperatura corporal e os padrões de comportamento dos caprinos (Gupta; Mondal, 2021; Hlimi et al., 2024). Esses dispositivos também possibilitam o reajuste do manejo em tempo real, como a oferta de sombra e o acesso à água, garantindo maior conforto térmico e eficiência produtiva. O uso de árvores em sistemas silvipastoris, por exemplo, não apenas reduz o estresse térmico, mas também contribui para a conservação ambiental, uma prática que alia sustentabilidade e bem-estar animal (Lemes et al., 2021; Silva Rodrigues et al., 2023).

Além do manejo térmico, o controle de parasitas gastrointestinais, um dos principais problemas sanitários na caprinocultura, também tem se beneficiado de inovações. A utilização de forragens bioativas, ricas em metabólitos secundários como taninos e saponinas, mostrou-se eficaz no controle de parasitas, reduzindo a necessidade de antiparasitários químicos (Silva et al., 2022; Rodríguez-Hernández et al., 2023). Essa abordagem não apenas melhora a saúde dos animais, mas também diminui a resistência dos parasitas aos tratamentos convencionais, um problema crescente na pecuária global. Outro exemplo inovador é o uso de partículas de óxido de cobre, que, ao serem ingeridas, afetam diretamente os parasitas presentes no trato digestivo, oferecendo uma alternativa sustentável e eficaz ao uso indiscriminado de medicamentos (Burke; Miller, 2020; Kamaraj et al., 2022).

Mesmo com essas inovações, a adoção dessas tecnologias enfrenta barreiras, especialmente no contexto socioeconômico do semiárido. Muitos pequenos produtores ainda resistem ao uso de novas ferramentas devido à falta de capacitação técnica, recursos financeiros limitados e desconfiança em relação a tecnologias modernas. Nesse sentido, é crucial que políticas públicas de incentivo e programas de extensão rural sejam fortalecidos, oferecendo suporte técnico e financeiro para facilitar a transição tecnológica e garantir que os benefícios dessas inovações sejam amplamente acessíveis (Kebebe, 2019; Vaintrub et al., 2021; Timpanaro; Foti, 2024).

3.5 Políticas públicas e incentivos para a caprinocultura

A caprinocultura no Brasil, especialmente no semiárido nordestino, é uma atividade estratégica para o desenvolvimento rural e a sustentabilidade das comunidades locais. O setor tem recebido atenção de políticas públicas e programas de incentivo que buscam promover a produtividade, a sustentabilidade ambiental e a melhoria das condições de vida dos pequenos produtores (FAO, 2022). A tabela 5 apresenta algumas políticas públicas e incentivos para a caprinocultura.

Tabela 5: Políticas públicas e incentivos para a caprinocultura.

Categoria	Principais Iniciativas	Benefícios
Linhas de Crédito e Financiamento	PRONAF: Crédito com juros baixos para infraestrutura, tecnologias e aquisição de animais. FNE Rural: Financia modernização e sistemas agropecuários.	Facilita acesso a recursos para pequenos e médios produtores.
Assistência Técnica e Extensão Rural	Programas: Mais Gestão, EMATER. Capacitação em alimentação animal, manejo sustentável, controle de doenças e tecnologias.	Melhora práticas de manejo, produtividade e sustentabilidade.
Compra Garantida pelo Governo	PAA: Compra carne, leite e derivados para programas sociais. PNAE: Integra produtos caprinos na merenda escolar.	Garante mercado para pequenos produtores e promove segurança alimentar.
Incentivos para Sustentabilidade e Agroecologia	Programas: Água para Todos, Convivência com o Semiárido, Dom Hélder Câmara. Foco em infraestrutura hídrica e sistemas agroecológicos.	Apoia sustentabilidade, gestão de recursos e adaptação ao semiárido.
Pesquisa e Desenvolvimento	Instituições: Embrapa Caprinos e Ovinos. Avanços em melhoramento	Aumenta produtividade e sustentabilidade da caprinocultura.

	genético, forragens adaptadas e tecnologias para uso de resíduos.	
Políticas de Comercialização e Exportação	Selo Arte: Comercialização de produtos artesanais. Política de exportação: certificação sanitária e acesso a mercados internacionais.	Fortalece a cadeia produtiva e promove exportações de carne e couro de alta qualidade.
Educação e Formação Profissional	Instituições: SENAR. Cursos de manejo, administração rural e empreendedorismo.	Promove renovação e profissionalização da caprinocultura

Fonte: A autora, 2025 (adaptado de: Embrapa. (2020); Mapa, 2022; FNDE, 2022; Ministério da Cidadania, 2023; Banco do Nordeste, 2023; EMATER, 2022)

Estes dados evidenciam as políticas públicas e os incentivos disponíveis para fortalecer a caprinocultura no Brasil, especialmente em regiões desafiadoras como o semiárido nordestino. Esses programas e iniciativas desempenham um papel crucial ao atender às necessidades dos pequenos e médios produtores, promovendo práticas ambientalmente corretas mais sustentáveis, aumentando a produtividade e garantindo acesso a mercados locais e internacionais (EMBRAPA, 2020; EMBRAPA, 2023).

O alinhamento entre crédito facilitado, assistência técnica, pesquisa, e políticas de comercialização forma uma base sólida para o desenvolvimento do setor. Além disso, os incentivos voltados à sustentabilidade e à convivência com o semiárido reforçam a importância de adotar práticas agroecológicas e tecnologias inovadoras para minimizar impactos ambientais. Esses esforços integrados não apenas beneficiam os produtores, mas também contribuem para a preservação do meio ambiente e o fortalecimento socioeconômico das comunidades envolvidas (INFOTECA, 2019; AGRO, 2023) .

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises realizadas ao longo deste artigo evidenciam a relevância da caprinocultura no Brasil, especialmente no Nordeste, onde essa atividade se consolida como uma estratégia fundamental para a segurança alimentar, a geração de renda e o desenvolvimento econômico em regiões semiáridas.

Apesar do potencial expressivo, o setor enfrenta desafios estruturais, como a falta de organização na cadeia produtiva, o abate clandestino que compromete a qualidade e a comercialização da carne e a baixa valorização de seus produtos em mercados mais amplos. Contudo, iniciativas regionais, como os programas de apoio à caprinocultura leiteira no Nordeste, têm demonstrado resultados positivos, tanto no fortalecimento da produção quanto na ampliação do acesso a mercados especializados no Sudeste.

Do ponto de vista ambiental, a caprinocultura apresenta vantagens importantes, especialmente no manejo sustentável de áreas degradadas e na utilização de resíduos como fonte de energia ou insumo agrícola, contribuindo para a sustentabilidade do setor. Além disso, o aproveitamento de subprodutos, como o couro e o colágeno, pode agregar valor à cadeia produtiva, favorecendo sua competitividade e ampliando suas possibilidades de mercado.

As perspectivas para a caprinocultura no Brasil são promissoras, desde que investimentos em pesquisa, inovação e assistência técnica sejam priorizados. A adoção de tecnologias que melhorem a eficiência do manejo, aliada à capacitação de produtores e à criação de políticas públicas inclusivas, é fundamental para superar os entraves atuais e explorar plenamente o potencial socioeconômico dessa atividade. Dessa forma, a caprinocultura não apenas se consolida como uma alternativa viável e sustentável, mas também como uma atividade estratégica para o desenvolvimento regional, especialmente em contextos de vulnerabilidade climática e econômica.

REFERÊNCIAS

- AGRO 2. **Embrapa impulsiona caprinocultura e ovinocultura com inovações no semiárido.** 2025. Disponível em: <https://agro2.com.br/pecuaria/embrapa-impulsiona-caprinocultura-e-ovinocultura-com-inovacoes-no-semiarido/>. Acesso em: 1 fev. 2025.
- AGUIAR, B. A. C.; SILVA, N. D. da; SOUSA, M. R. R.; SANTOS, B.; SOUZA, F. B. de; SOUZA, P. B. **Influência dos dejetos da caprinocultura na composição de substratos para produção de mudas de *Anadenanthera peregrina* (L) Speg.** 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20873/uftv7-7404>. Acesso em: 25 jan. 2025.
- ALELUIA, V. M.; SOARES, V. N.; CALDEIRA, J. M.; RODRIGUES, A. M. **Livestock monitoring: Approaches, challenges and opportunities.** *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, v. 11, n. 4, p. 67-76, 2022.
- ALVES, E.; SOUZA, G. S. **Pequenos estabelecimentos também enriquecem? Pedras e tropeços.** *Revista de Política Agrícola*, v. 24, n. 3, p. 7-21, 2015.
- AMARILHO-SILVEIRA, F.; BRONDANI, W. C.; LEMES, J. S. **Lã: características e fatores de produção.** *Archivos de Zootecnia*, v. 64, n. 247, p. 13-24, 2015.
- BANCO DO NORDESTE. **FNE Rural – Financiamento para o Desenvolvimento Rural.** 2023. Disponível em: <www.bnb.gov.br>. Acesso em: [data do acesso].
- BARBOSA, R. F.; XAVIER, R. **Diagnóstico da caprinovinocultura no Cariri Ocidental da Paraíba (PB): estudo de caso de 2005 a 2015.** *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 8, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2018.008.0017>.
- BATISTA, N.; SOUZA, B. **Caprinovinocultura no semiárido brasileiro: fatores limitantes e ações de mitigação.** *Agricultura e Sustentabilidade na Amazônia*, v. 11, n. 1, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.30969/ACSA.V11I1.522>. Acesso em: 1 fev. 2025.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. **Bases para o plano nacional de desenvolvimento da rota do cordeiro.** 2017. Disponível em: <https://bit.ly/3obeHkA>. Acesso em: [data do acesso].
- BURKE, J. M.; MILLER, J. E. **Sustainable approaches to parasite control in ruminant livestock.** *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, v. 36, n. 1, p. 89-107, 2020.
- CAMPOS, M. I. F.; LIMA, A. K. de S.; LOPES NETO, J. H.; OLIVEIRA, J. M. C. de; GADELHA, T. S. **Artigo de revisão: propriedades biológicas das proteínas e peptídeos do soro do leite caprino.** *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 11, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24340>. Acesso em: 25 jan. 2025.

CAMPOS, R. **Uma abordagem econométrica do mercado potencial de carne de ovinos e caprinos para o Brasil**. *Revista Econômica do Nordeste*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.61673/ren.1999.1845>. Acesso em: 25 jan. 2025.

CAPPAL, M. G.; RUBIU, N. G.; NIEDDU, G.; BITTI, M. P. L.; PINNA, W. **Analysis of fieldwork activities during milk production recording in dairy ewes by means of individual ear tag (ET) alone or plus RFID based electronic identification (EID)**. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 144, p. 324-328, 2018.

CARIOELLO, R. **Sistemas agrários em Paraíba do Sul (1850-1920) – um estudo de relações não-capitalistas de produção, de João Luís Fragoso**. *Estudos Econômicos*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-53575346rc>. Acesso em: 1 fev. 2025.

CASTRO, R. L. P.; BRITO, D. R. B.; RIBEIRO, M. C.; COSTA, J. F. da; PIRES FILHO, P. C. S. **Caracterização de pequenas criações de caprinos e ovinos da Ilha de São Luís**. *Revista Sítio Novo*, v. 6, n. 1, p. 30-41, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.47236/2594-7036.2022.v6.i1.30-41p>. Acesso em: 1 fev. 2025.

CAVALCANTE, I.; SOUSA, W. H. D.; RIBEIRO, N.; CARTAXO, F. Q.; RAMOS, J.; AZEVEDO, P. **Ração animal à base de cacto forrageiro: uso de vísceras em pratos tradicionais. Produção de subprodutos que podem resultar em retorno econômico**. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/fst.105921>. Acesso em: 25 jan. 2025.

COSTA, B. P. da; PORTO, A.; OLIVEIRA, V.; PÔRTO, T. **Hidrolizados de colágeno, seus produtos e suas bioatividades: uma mini-revisão**. *Ciência, Tecnologia e Inovação: do campo à mesa*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.31692/iciagro.2020.0202>. Acesso em: 25 jan. 2025.

CARIOELLO, R. **Sistemas agrários em Paraíba do Sul (1850-1920) – um estudo de relações não-capitalistas de produção, de João Luís Fragoso**. *Estudos Econômicos*, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-53575346rc>. Acesso em: 1 fev. 2025.

CAVALCANTE, I.; SOUSA, W. H. D.; RIBEIRO, N.; CARTAXO, F. Q.; RAMOS, J.; AZEVEDO, P. **Ração animal à base de cacto forrageiro: uso de vísceras em pratos tradicionais. Produção de subprodutos que podem resultar em retorno econômico**. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/fst.105921>. Acesso em: 25 jan. 2025.

DA SILVA RODRIGUES, K. et al. **Importance of the silvipastoral system on the animal health and welfare of dairy cattle**. *Brazilian Journal of Development*, v. 9, n. 1, p. 1155-1178, 2023.

DE MELO, Z. N.; ROCHA, A. J. P. **DNBCPC DESERTIFICAÇÃO NO NORDESTE BRASILEIRO EM CONEXÃO ÀS PERSPECTIVAS CLIMÁTICAS**. *Conexão ComCiência*, v. 3, n. 4, 2024.

DE ANDRADE DA SILVA MOURA, R. M. et al. **Herbage allowance, movement and weight of goats in two sites of Caatinga (dry tropical forest).** *Agroforestry Systems*, v. 98, n. 4, p. 1035-1047, 2024.

DE FIGUEIREDO GUILHERME, R. et al. **Characterization and typology of sheep and goat production systems in the State of Paraíba, a semi-arid region of northeastern Brazil.** *Semina: Ciências Agrárias*, v. 38, n. 4, p. 2163-2178, 2017.

DUTRA, Aline Soares de Santana; DUTRA, Rafael Filipe Ferreira; OLIVEIRA, Kleber Godoy de; PARENTE, Ednei Pereira; MORAIS, Danilo Farias de; FREITAS, Victoria Maria Moura de; COSTA, Gabriela Coêlho Machado. **Análise atual da mastite caprina no Brasil: caracterização dos agentes causadores e avaliação de resistência antibiótica.** *Revista Brasileira de Implantologia e Ciências da Saúde*, v. 6, n. 1, p. 616-625, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.36557/2674-8169.2024v6n1p616-625>.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Análise da PPM 2016: evolução dos rebanhos ovinos e caprinos entre 2007 e 2016.** *Boletim do Centro de Inteligência e Mercado de Caprinos e Ovinos*, Sobral, CE, n. 1, out. 2017.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Caprinocultura no Nordeste: oportunidades, políticas públicas e desenvolvimento sustentável.** 2023. Disponível em: <https://revistaft.com.br/a-caprinovinocultura-no-nordeste-oportunidades-politicas-publicas-e-desenvolvimento-sustentavel/>. Acesso em: 1 fev. 2025.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Centro de Inteligência e Mercado de Caprinos e Ovinos.** CIM. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/cim-inteligencia-e-mercado-de-caprinos-e-ovinos.2020>.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Mapeamento identifica frigoríficos e abatedouros inspecionados que operam com carnes ovina e caprina.** 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/49836052/mapeamento-identifica-frigorificos-e-abatedouros-inspecionados-que-operam-com-carnes-ovina-e-caprina>. Acesso em: 1 fev. 2025.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Pesquisa da Pecuária Municipal 2023: rebanhos de caprinos e ovinos.** 2023. Disponível em: https://www.embrapa.br/documents/1355090/35052914/Boletim_N%C2%BA24_PPM+2023.pdf/1d547bbd-3198-08d5-3cf0-4552add581bd. Acesso em: 23 jan. 2025.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Produção de caprinos e ovinos terá recursos de R\$ 426 mil para ações de inovação.** 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/58766679/producao-de-caprinos-e-ovinos-tera-recursos-de-r-426-mil-para-acoes-de-inovacao>. Acesso em: 1 fev. 2025.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Produtos de origem caprina e ovina: mercado e potencialidades na região do Semiárido brasileiro.** *Boletim do Centro de Inteligência e Mercado de Caprinos e Ovinos*, Sobral, n. 3, jul. 2018.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema de produção de caprinos e ovinos de corte para o semiárido brasileiro.** 2016. Acesso em: 23 jan. 2025.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sustentabilidade das cadeias produtivas de leite de cabra e ovelha: uma revisão sistemática com base no Triple Bottom Line.** 2020. Disponível em: Sustentabilidade das cadeias produtivas de leite de cabra e ovelha: uma revisão sistemática com base no Triple Bottom Line. - Portal Embrapa. Acesso em: 23 jan. 2025.

EMATER. **Apoio técnico e capacitação aos pequenos produtores rurais.** 2022. Disponível em: <www.emater.com.br>. Acesso em: 1 fev. 2025.

FELISBERTO, N. R. D. O.; OLIVEIRA, L. S.; CORDEIRO, A. **Sistemas de produção de leiteiros caprinos.** In: WORKSHOP SOBRE PRODUÇÃO DE CAPRINOS NA REGIÃO DA MATA ATLÂNTICA, 13., 2016, Coronel Pacheco. *Anais...*. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos; Coronel Pacheco: Embrapa Gado de Leite, 2016. p. 11-35.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Leather industry dynamics: a global perspective.** Roma: FAO, 2022.

FUNDO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO DA EDUCAÇÃO (FNDE). **Programa Nacional de Alimentação Escolar – PNAE.** 2022. Disponível em: <www.fnde.gov.br>. Acesso em: [data do acesso].

GONZALEZ, A. C.; COSTA, M. L.; SIGNOR, A. **Desenvolvimento sustentável: perspectivas e desafios para a sociedade moderna.** *Revista Internacional de Pesquisa e Ciência em Resiliência Ambiental*, v. 2, n. 2, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.48075/IJERRS.V2I2.26260>. Acesso em: 1 fev. 2025.

GRANDIN, T. **Grazing cattle, sheep, and goats are important parts of a sustainable agricultural future.** *Animals*, v. 12, n. 16, 2022.

GRUBBA, L. S.; ETCHEZAR, J. W. M.; BIORCHI, B. C. **Desenvolvimento sustentável: uma análise da perspectiva de garantia para gerações futuras.** *Revista Digital Constituição e Garantia de Direitos*, v. 11, n. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.21680/1982-310x.2018v11n1id15369>. Acesso em: 1 fev. 2025.

GUABIRABA, B. R. da S.; PEREIRA, H. S.; CORDEIRO, R. D. P.; NETO, A. F. **A caprinovinocultura no Nordeste: oportunidades, políticas públicas e desenvolvimento sustentável.** *Ciências Agrárias*, v. 27, n. 125, p. XX-XX, ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8271232>. Acesso em: 1 fev. 2025.

GUPTA, M.; MONDAL, T. **Heat stress and thermoregulatory responses of goats: a review.** *Biological Rhythm Research*, v. 52, n. 3, p. 407-433, 2021.

HLIMI, A.; EL OTMANI, S.; ELAME, F.; CHENTOUF, M.; EL HALIMI, R.; CHEBLI, Y. **Application of Precision Technologies to Characterize Animal Behavior: A Review.** *Animals*, v. 14, n. 3, 416, 2024.

HOSSAIN, A.; KRUPNIK, T. J.; TIMSINA, J.; MAHBOOB, M. G.; CHAKI, A. K.; FAROOQ, M.; ... & HASANUZZAMAN, M. **Agricultural land degradation: processes and problems undermining future food security.** In: ENVIRONMENT, CLIMATE, PLANT AND VEGETATION GROWTH (pp. 17-61). Cham: Springer International Publishing, 2020.

HUSSAIN, S.; ASLAM, M. U.; JAVED, M.; ZAHRA, M.; EJAZ, H.; MUSHTAQ, I. **Impact of climatic changes and global warming on water availability.** *Anthropogenic Pollution*, v. 5, n. 2, 2021.

IBGE. **Censo Agropecuário 2017.** 2018. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 02 set. 2024.

IBGE. **Pesquisa da Pecuária Municipal. Tabela 3939: Efetivo dos rebanhos, por tipo de rebanho.** [Rio de Janeiro, 2024]. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3939>>. Acesso em: 24 set. 2024.

INFOTECA. EMBRAPA. **Impacto de caprinos e ovinos sobre a comunidade de plantas regenerantes no Parque Nacional do Catimbau, Pernambuco, Brasil.** 2019. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1128217/1/CNPC-2020-Art-51.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2025.

KAMARAJ, C.; GANDHI, P. R.; KUMAR, R. C. S.; BALASUBRAMANI, G.; MALAFAIA, G. **Biosynthesis and extrinsic toxicity of copper oxide nanoparticles against cattle parasites: an eco-friendly approach.** *Environmental Research*, v. 214, 114009, 2022.

KEBEBE, E. **Bridging technology adoption gaps in livestock sector in Ethiopia: A innovation system perspective.** *Technology in Society*, v. 57, p. 30-37, 2019.

LACERDA, F. F.; NEVES, F. M.; CANEL, L. X. C.; LOPES, G. M. B. **Conceito de sistemas agrovoltáicos no Nordeste: uma solução de desenvolvimento ecossustentável para o Semiárido nordestino.** *Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/eissn.2236-2878.rdg.2022.189543>. Acesso em: 1 fev.

2025.

LEMES, A. P.; GARCIA, A. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; BRANDÃO, F. Z.; WATANABE, Y. F.; COOKE, R. F.; ... & GIMENES, L. U. **Silvopastoral system is an alternative to improve animal welfare and productive performance in meat production systems.** *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, 14092, 2021.

LIMA JÚNIOR, J. de O.; MESQUITA, R. F. de; SANTOS, N. A.; FERREIRA, W. G.; SILVA, F.; MATIS, F. R. N. **O futuro que nós criamos: a perspectiva da sustentabilidade em futuros administradores.** *Revista de Administração

LIMA JÚNIOR, J. de O.; MESQUITA, R. F. de; SANTOS, N. A.; FERREIRA, W. G.; SILVA, F.; MATIS, F. R. N. **O futuro que nós criamos: a perspectiva da sustentabilidade em futuros administradores.** *Revista de Administração e Sustentabilidade*, v. 5, n. 4, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.18265/2526-2289V5N4P80-101>. Acesso em: 1 fev. 2025.

MARTINS, J. D. L.; MOURA, M. F. D.; OLIVEIRA, J. F.; OLIVEIRA, M. de; GALINDO, C. A. F. **Esterco bovino, biofertilizante, inoculante e combinações no desempenho produtivo do feijão comum.** *Revista Agro@mbiente On-line*, v. 9, n. 4, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.18227/1982-8470RAGRO.V9I4.2583>. Acesso em: 25 jan. 2025.

MAPA (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO). **Selo Arte e certificação de produtos alimentícios artesanais.** 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/selo-arte-selo-queijo-artesanal>. Acesso em: 1 fev. 2025.

MEIRELES, W. A.; FERREIRA, S. A.; GONÇALVES, R. D. S.; BRITO, E. C. D. S.; NERES, C. P.; BARROS, K. G.; ... & ROSANOVA, C. **PRODUÇÃO E CONSUMO DE LEITE E DERIVADOS DE CAPRINOS E OVINOS NO BRASIL: UMA REVISÃO SOBRE DEMANDAS E MERCADOS.** *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 11, n. 1, 2024.

MINISTÉRIO DA CIDADANIA. **Programa de Aquisição de Alimentos – PAA.** 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/mds/pt-br/acoes-e-programas/acesso-a-alimentos-e-a-agua/programa-de-aquisicao-de-alimentos]). Acesso em: [data do acesso].

MONTEIRO, M. G.; BRISOLA, M.; FILHO, J. V. **Diagnóstico da cadeia produtiva de caprinos e ovinos no Brasil.** *Texto para Discussão*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.38116/td2660>. Acesso em: 1 fev. 2025.

MORAES, B. M. M.; FILHO, R. **Mercado Brasileiro de Lácteos: análise do impacto de políticas de estímulo à produção.** *Revista Brasileira de Economia*, v. 71, n. 3, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790550410>. Acesso em: 1 fev. 2025.

NASCIMENTO, M. I. de S. S.; FERREIRA, F.; ALBUQUERQUE, H. J. O.; NASCIMENTO, T. L. F.; ALBUQUERQUE, H.; CABRAL, A. M. D.; SILVA, L. F. da; SANTOS, M. J. M. dos; BARRETO, L. M. G.; LIMA, V. R. da S.; SANTOS, G. C. de L. **Insights dos principais produtos oriundos da caprinovinocultura no Nordeste brasileiro.** *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, v. 11, n. 5, 2022.

NAVARRETE-MOLINA, C.; MEZA-HERRERA, C. A.; HERRERA-MACHUCA, M. A.; MACIAS-CRUZ, U.; VELIZ-DERAS, F. G. **Not all ruminants were created equal: Environmental and socio-economic sustainability of goats under a marginal-extensive production system.** *Journal of Cleaner Production*, v. 255, 120237, 2020.

NERES, C. P.; DE PINHO, E. B.; BRITO, E. C. D. S.; DOS SANTOS, J. S.; BARROS, K. G.; GONÇALVES, R. D. S.; ... & ROSANOVA, C. **AGRONEGÓCIO DA CARNE OVINA E CAPRINA NO BRASIL, UMA REVISÃO SOBRE PRODUÇÃO, PERSPECTIVAS E DESAFIOS.** *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 11, n. 1, 2024.

NERES, C. P.; PINHO, E. B. de; BRITO, E. C. da S.; SANTOS, J. S. dos; BARROS, K. G.; GONÇALVES, R. dos S.; FERREIRA, S. A.; MEIRELES, W. A.; ROSANOVA, C. **Agronegócio da carne ovina e caprina no Brasil: uma revisão sobre produção, perspectivas e desafios.** *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 11, n. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.61164/rmn.v11i1.3152>. Acesso em: 25 jan. 2025.

NIKOLAOU, G.; NEOCLEOUS, D.; CHRISTOU, A.; KITTA, E.; KATSOULAS, N. **Implementing sustainable irrigation in water-scarce regions under the impact of climate change.** *Agronomy*, v. 10, n. 8, 1120, 2020.

NUNES, R. P.; SILVA, M. A. D.; SILVA, B. M.; PEREIRA, C. M. P.; LIMA, C. M. D. *Revista Diversitas*. 2018. DOI: 10.17648/DIVERSITAS-JOURNAL-V3I3.684.

PERNAMBUCO. ****Decreto nº 53.178, de 12 de julho de 2022. Estabelece normas técnicas para abatedouros frigoríficos**

PIMENTEL NETO, J. G.; OLIVEIRA, H. S. de; SILVEIRA, K. C. da. **Desenvolvimento local-regional no Nordeste brasileiro: um estudo situacional do arranjo produtivo local de caprinovinocultura de Pernambuco.** *Revista Contexto Geográfico*, v. 3, n. 6, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.28998/CONTEGEO.V3I6.6719>. Acesso em: 1 fev. 2025.

REIS E PIMENTA, M. L.; ROSA, B. L.; PIMENTA, P. C. R. E. **Perspectivas futuras para a gestão de projetos e sua relação com a sustentabilidade das organizações.** *Revista de Gestão e Projetos*, v. 14, n. 3, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5585/gep.v14i3.25016>. Acesso em: 1 fev. 2025.

RIBEIRO, D. M.; SALAMA, A. A.; VITOR, A. C.; ARGÜELLO, A.; MONCAU, C. T.; SANTOS, E. M.; ... & ALMEIDA, A. M. **The application of omics in ruminant production: A review in the tropical and sub-tropical animal production context.** *Journal of proteomics*, v. 227, 103905, 2020.

RIBEIRO, K. A.; ALENCAR, C. M. M. **Desenvolvimento territorial e a cadeia produtiva da caprinovinocultura no semiárido baiano: o caso do município de Juazeiro-BA.** *Revista Baru-Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos*, v. 4, n. 1, p. 144-179, jan.-jun. 2018.

RODRIGUEZ, M.; SILVA, J. **Environmental policies and labor costs in the global leather industry.** *Sustainability and Industry*, v. 12, n. 4, p. 201-215, 2023.

RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, P.; REYES-PALOMO, C.; SANZ-FERNÁNDEZ, S.; RUFINO-MOYA, P. J.; ZAFRA, R.; MARTÍNEZ-MORENO, F. J.; ... & DÍAZ-GAONA, C. **Antiparasitic tannin-rich plants from the south of Europe for grazing livestock: A review.** *Animals*, v. 13, n. 2, 201, 2023.

SAMBUICHI, R. H. R.; PERIN, G.; ALMEIDA, A. F. D.; ALVES, P.; ARAÚJO, D.; CÂMARA, R.; JANUÁRIO, E. S. **Diversidade de produtos adquiridos pelo Programa de Aquisição de Alimentos no Brasil e regiões.** *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 2019.

SAMPAIO, B.; SAMPAIO, Y.; LIMA, R.; AIRES, A.; SAMPAIO, G. R. **A economia da caprinocultura em Pernambuco: problemas e perspectivas.** *Revista de Economia*, v. 35, n. 2, p. 16704, 2010. DOI: 10.5380/RE.V35I2.16704.

SANTOS, W. de S.; ALBUQUERQUE, H. J. O.; ALBUQUERQUE, H.; CABRAL, A. M. D.; FERREIRA, F. da C.; SANTOS, E. S. S.; NASCIMENTO, M. I. de S. S.; SANTOS, G. C. de L. **Diagnóstico da cadeia produtiva de caprinos e ovinos no Brasil e na região Nordeste.** *Revista Brasileira de Desenvolvimento*, v. 9, n. 7, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv9n7-006>. Acesso em: 25 jan. 2025.

SENAR – SISTEMA NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. **Ovinocultura: criação e manejo de ovinos de corte.** Brasília: Senar, 2019.

SIDERSKY, P. R. **Sobre a cadeia produtiva da caprinovinocultura no sertão do Piauí: um estudo centrado no território da Chapada do Vale do Itaim (região de Paulistana).** Brasília: FIDA; IICA, 2018.

SILVA, J. C. da; COSTA, B. de A. M. da; LINO, L. H. S.; OLIVEIRA, V. de M.; PORTO, A. L. F. **Colágeno, gelatina e suas aplicações na indústria alimentícia: uma visão geral focando na matéria-prima da piscicultura.** *Ciência, Tecnologia e Inovação: do campo à mesa*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.31692/iciagro.2020.0343>. Acesso em: 25 jan. 2025.

SILVA, J. J. L.; PEREIRA, T. M. S.; AZEVEDO, P. V. **Produção de biogás com o uso de esterco animal: uma prática para a obtenção de benefícios socioeconômicos e ambientais.** *Boletim Geográfico*, v. 39, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v39.a2021.e46743>. Acesso em: 25 jan. 2025.

SILVA, C. A. **Caracterização do sistema de criação de ovinos no assentamento Maria Bonita – Delmiro Gouveia/AL.** 2018. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SILVA, J. R. **Impacto de caprinos e ovinos sobre a comunidade de plantas regenerantes no Parque Nacional do Catimbau, Pernambuco, Brasil.** *Revista Gaia*, João Pessoa, v. 12, n. 2, p.

45-56, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/ojs2/index.php/gaia/article/view/50597>. Acesso em: 1 fev. 2025.

SILVA CARVALHO, J. et al. **Characterization of goat and sheep production in the state of Sergipe, Northeast of Brazil.** *Acta Veterinaria Brasilica*, v. 14, n. 2, 2020.

SILVA, S. R.; SACARRÃO-BIRRENTTO, L.; ALMEIDA, M.; RIBEIRO, D. M.; GUEDES, C.; GONZÁLEZ MONTAÑA, J. R.; ... & DE ALMEIDA, A. M. **Extensive sheep and goat production: The role of novel technologies towards sustainability and animal welfare.** *Animals*, v. 12, n. 7, 885, 2022.

SMITH, J.; DAVIES, L. **Global leather market insights and trends.** Market Research Publishing, 2023.

SORIO, A. **Diagnóstico da oferta e demanda de ovinos e caprinos para processamento de carne, pele e leite na região central do Tocantins.** Palmas-TO, 2017.

SOUZA, M. F. dos S. et al. **Characterisation of goat product consumers and goat farming systems in the Brazilian Northeast region.** *Small Ruminant Research*, v. 179, p. 7-13, 2019.

SUNDERMAN, A. **Leathercraft through the ages: the evolution of artisanship.** New York: HarperCraft, 2021.

TEIXEIRA, W. C.; SANTOS, H. P.; SILVA, J. C. G.; RIZZO, H.; MARVULO, M. F. V.; CASTRO, R. S. de. **Perfil zoonosológico dos rebanhos caprinos e ovinos em três mesorregiões do estado do Maranhão, Brasil.** *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, v. 9, n. 1, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.21708/AVB.2015.9.1.4438>. Acesso em: 1 fev. 2025.

TIMPANARO, G.; FOTI, V. T. **The sustainability of small-scale sheep and goat farming in a semi-arid Mediterranean environment.** *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, v. 3, n. 3, e12111, 2024.

VAINTRUB, M. O.; LEVIT, H.; CHINCARINI, M.; FUSARO, I.; GIAMMARCO, M.; VIGNOLA, G. **Precision livestock farming, automats and new technologies: Possible applications in extensive dairy sheep farming.** *Animal*, v. 15, n. 3, 100143, 2021.

VERCRUYSSSE, J.; CHARLIER, J.; VAN DIJK, J.; MORGAN, E.; GEARY, T.; VON SAMSON-HIMMELSTJERNA, G.; CLAEREBOU, E. **Control of helminth ruminant infections by 2030.** *Parasitology*, v. 145, 1655–1664, 2018.

WANG, J.; FU, Y.; SU, T.; WANG, Y.; SOLADOYE, O. P.; HUANG, Y.; ... & WU, W. **A Role of Multi-Omics Technologies in Sheep and Goat Meats: Progress and Way Ahead.** *Foods*, v. 12, n. 22, 4069, 2023.

YU, K.; MATZAPETAKIS, M.; HORVATIĆ, A.; TERRÉ, M.; BACH, A.; KULEŠ, J.; YESTE, N.; GÓMEZ, N.; ARROYO, L.; RODRÍGUEZ-TOMÀS, E.; et al. **Metabolome and proteome changes in skeletal muscle and blood of pre-weaning calves fed leucine and threonine supplemented diets.** *J. Proteom.*, v. 216, 103677, 2020.

ARTIGO 3- Goat Skin (*Capra aegragruss* Erxleben, 1777): a Promising and Sustainable Source of Collagen

Applied Biochemistry and Biotechnology
<https://doi.org/10.1007/s12010-025-05242-z>

ORIGINAL ARTICLE



Jamile Maria Pereira Bastos Lira de Vasconcelos

Federal University of Pernambuco-UFPE Recife, Pernambuco, Brazil
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901
jamilebastoslira@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0898-0643>

Robson Coelho de Araújo Neri

Federal University of Pernambuco-UFPE Recife, Pernambuco, Brazil
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901
robsonc6@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-0328-6932>

Amanda Vieira de Barros*

Federal University of Pernambuco-UFPE Recife, Pernambuco, Brazil
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901
vieira.barros@ufpe.br
<https://orcid.org/0000-0002-4648-0359>

Carlos Eduardo Sales da Silva

Federal University of Pernambuco-UFPE Recife, Pernambuco, Brazil
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901
<https://orcid.org/0000-0002-9037-0827>

Maria Cecília Ferreira Galindo

Federal University of Pernambuco-UFPE Recife, Pernambuco, Brazil
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901
mariaceciliaferreiragalindo@gmail.com

Bruno Oliveira de Veras

Federal University of Pernambuco, Centro de Ciências Biológicas, Departamento de Bioquímica e Biofísica. Laboratório de Enzimologia. Cidade Universitária. 50670-420 - Recife, Pernambuco, Brazil
bruno.veras@ufpe.br
<https://orcid.org/0000-0002-7814-1757>

Ranilson Souza Bezerra

Federal University of Pernambuco, Centro de Ciências Biológicas, Departamento de Bioquímica e Biofísica. Laboratório de Enzimologia. Cidade Universitária. 50670-420 - Recife, Pernambuco, Brazil

ranilson.bezerra@ufpe.br
<https://orcid.org/0000-0001-6657-3782>

Maria Betânia Melo de Oliveira

Federal University of Pernambuco-UFPE Recife, Pernambuco, Brazil
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE, 50670-901
maria.bmoliveira@ufpe.br

*** corresponding author**

ABSTRACT

The aim of the study was to extract and characterize collagen from solid untanned skin waste from the processing of leather in a *Capra aegagrus* tannery. Using pepsin (SPC), 37 grams of collagen were obtained from 100 grams of dry weight skin. Characterization took place using SDS-PAGE, FTIR and UV absorption techniques, identifying it as type I collagen. The ultraviolet (UV) absorption spectrum showed a peak at 238 nm. In the thermogram, the maximum transition temperature was 56° C. Using the electrophoresis technique, it was observed that SPC consists of band patterns formed by a γ chain, a β chain and two distinct α chains ($\alpha 1$ and $\alpha 2$). In the FTIR analysis, the collagen showed the absorption peaks for the amides, showing that the SPC extraction process maintained the integrity of the molecule. To observe the effect of NaCl concentration on the solubility of SPC, the collagen showed high solubility, up to a concentration of 2% NaCl. The solubility peak was observed at pH 4.0, with a sharp drop until pH 7.0, reaching its minimum point at pH 10. Scanning microscopy showed some irregular surfaces, cavities and fibrous structures, which may favor the application of collagen as a biomaterial. The zeta potential found the isoelectric point of collagen at pH = 6.61. These results indicate that the collagen obtained has a high level of structural integrity and can be applied as an alternative source, as well as adding value to a waste product that is often discarded in the environment.

Keywords: Sustainability; Bioeconomy; Biomolecule; Protein.

1. INTRODUCTION

Collagen is a fibrous protein that forms insoluble fibers with high tensile strength. Structurally, collagen is characterized by three polypeptide chains linked together to form a right-handed triple helix and a motif, (Glycine-X-Y)_n, common to all twenty-nine types of collagen, repeated along the chains. The X and Y positions are often occupied by the amino acids proline and hydroxyproline [1, 2, 3].

Due to its biocompatibility, biodegradability and low antigenicity, collagen is used in various fields such as cosmetics, pharmaceuticals and the food industry. In cosmetics, collagen-based biostimulants have proven effective in reversing intrinsic and extrinsic aging, improving skin firmness and hydration [4]. In the food sector, there is growing interest in collagen applications and hydrolyzed collagen supplements, showing promising results in delaying skin aging and improving elasticity [5, 6].

Collagen-based materials have also been successfully used in various medical fields, including wound healing, surgery and cosmetology [7]. This protein is essential for maintaining joint health, as well as for understanding the etiology of scleroderma and developing new therapeutic approaches for autoimmune diseases [8, 9].

Although the main source of this protein is animal by-products such as beef, pork and poultry, which account for approximately 30% of its protein content, some recent studies have shown other sources of collagen, such as the recycling of industrial, food and fish waste [1, 3, 10, 11]. In this context, the collagen contained in the hides left over from leather processing has aroused interest in various sectors [12, 13]. The by-products of leather processing are used to obtain high value-added biomolecules that can help reduce the environmental impact of tanning and produce high value-added biodegradable products [14].

When leather is processed, the skin of the animal is prevented from rotting by a process called tanning in industries called tanneries. Tanned leather is the skin of an animal that has undergone the tanning process, an essential step in the production of leather, which makes it flexible and soft, ready to be used in the manufacture of bags, shoes, clothing, suitcases, household utensils and accessories such as hats and belts. Leather can be tanned from cattle, including calves, sheep, goats, camels, pigs, snakes, horses, buffalo, kangaroos, crocodiles, fish, frogs, birds such as ostriches, and other animals [15, 16].

Goat skins produced in the Northeast Region of Brazil are highly valued in the market

for their greater elasticity, resistance and texture, making them suitable for a wider range of products in the clothing and footwear industries. This activity has been carried out since the 17th century and is growing every day. In addition to its economic contribution, this practice has great cultural value for the population [17, 18].

Despite the economic importance of the leather sector, there is growing concern about the environmental sustainability of the industry, as large-scale production can have negative impacts such as improper disposal of environmentally hazardous waste, water pollution from chemicals such as chromium and sulfides, improper disposal of solid waste, toxic air emissions, and degradation of natural resources [19, 20].

The use of by-products from leather processing allows the recovery of biomolecules with high added value and at the same time helps to reduce the environmental impact caused by the inappropriate disposal of these wastes [15, 21, 22]. In this context, the aim of this study was to extract and characterize collagen from untanned waste generated during leather processing in *Capra aegagrus* Erxleben, 1777 goat tanneries located in northeastern Brazil.

2. MATERIALS AND METHODS

For this study, 100 grams of non-chrome-tanned *C. aegagrus* goat skins were used (Fig.1), from waste from the initial stage of leather processing in a tannery in the interior of the state of Pernambuco, in northeastern Brazil. These skins have not undergone the chrome tanning process, which makes them ideal for extracting collagen due to the lower presence of chemical compounds that could compromise the quality of the material. Initially, the skins were treated with sodium sulphide and hydrated lime, reagents widely used in the hair removal stage due to their ability to break the bonds between the epidermis and the rest of the skin. Sodium sulphide acts as a reducing agent, while hydrated lime helps to soften the hair follicles, making it easier to remove the hair.

Fig. 1 Untanned leather offcuts at the initial stage of leather processing



Source: Author (2024)

Subsequently, in order to remove residues of sodium sulphide and hydrated lime, the skins (Fig. 2A) were treated with a 3% solution of ammonium sulphate, in a ratio of 1:2 (weight/volume), and the material was homogenized for two and a half hours. Ammonium sulphate is a neutral salt that helps neutralize alkaline residues, ensuring that the material is free of impurities that could interfere with the quality of the extracted collagen. After the treatment, a test was carried out with phenolphthalein, a pH indicator, to confirm the complete removal of the sodium sulphide and hydrated lime. The change or absence of color in the test (Fig. 2B and 2C) demonstrated the success of the cleaning process, preparing the material for the subsequent extraction stages.

Fig. 2 Treatment for the removal of sodium sulfide and hydrated Lime (2A), test with phenolphthalein to confirm the removal of sodium sulfide and hydrated Lime (2B and 2C), Confirmation of the removal of substances after application of phenolphthalein (2D and 2E).



Source: Author (2024)

2.1 Collagen extraction from goat skin

Collagen extraction occurred in two steps. In the first, goat skins were treated with NaOH at 0.1M (1:1 ratio) for a period of 24 hours with changes of the solution every 12 hours; after this period the skin was washed with running water and then with an HCl solution to obtain a neutral pH; the fat was extracted from the skin with a 10% solution of butyl alcohol for 5 hours. A 3% oxygen peroxide solution was used for 3 hours to remove pigments and residual fats.

In the second stage, 100 grams of pre-treated goat skin were used for collagen extraction. Initially, the skins were immersed in 0.5 M acetic acid (pH 2.5) for 48 hours to promote the initial disaggregation of the collagen fibers. The skin fragments were then added to a solution containing 1.5% commercial pepsin diluted in 0.5 M acetic acid, in a ratio of 1:6 (weight/volume). This mixture was kept for 72 hours, with the solution being changed every 24 hours, ensuring efficient enzymatic digestion.

The extracted material was then precipitated using a solution of sodium carbonate and bicarbonate, combined with 0.9 M NaCl, for 1 hour. After the precipitation process, the material was centrifuged at 12,000 rpm for 30 minutes at 4 °C to separate the precipitated collagen from

the rest of the solution. The precipitate obtained was resolubilized in 0.5 M acetic acid and subjected to dialysis in three stages, successively using 0.05 M acetic acid, 0.01 M acetic acid and distilled water, lasting two hours for each stage. Finally, the purified collagen was lyophilized to obtain Soluble Pepsin Collagen (SPC) ready for analysis or application (Figure 3).

Fig. 3 Lyophilized Soluble Pepsin Collagen (SPC). Freeze-dried SPC extracted from goat skins. The image shows the powdered material obtained after the extraction and freeze-drying process, highlighting the characteristic texture of the collagen.



Source: Author (2024)

2.2 Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE)

For Polyacrylamide Gel electrophoresis (SDS-PAGE) the protocol established by Laemmli [23] was followed using Tris-HCl /glycine buffer, and 7.5% running gel and 4% concentration gel. For the detection of the protein bands, the Coomassie Blue dye was used. The gel was stained with Coomassie Blue R-250 (0.5% w/v), methanol 45% (v/v) and acetic acid 10% (v/v) and then bleached with acetic acid 10% (v/v).

2.3 Thermal transition temperature measurement

The freeze-dried collagen sample from *C. aegagrus* was prepared according to the method described by Rochdi et al. [24]. For rehydration, a solution of 0.05 M acetic acid in a ratio of 1:40 (w/v) was used, followed by solubilization for 48 hours at 4 °C. The thermal transition was evaluated by Differential Scanning Calorimetry (DSC-60 Shimadzu), using an aluminum thermogram as a standard for temperature calibration. An aliquot of 5 mg was weighed into a precision aluminum pan, sealed and analyzed in temperature ranges from 25 to 100 °C, with a heating rate of 1 °C/min. Finally, the maximum transition temperature (T_{max}) was determined from the maximum transition peak recorded in the DSC measurements.

2.4 Ultraviolet Spectrum

Collagen sample was dissolved for 24 hours in 0.5 M acetic acid solution until a concentration of 1mg/mL was obtained. The ultraviolet ray absorption spectrum of SPC was measured in a Bio-Rad spectrophotometer. The solution was transferred to the quartz bucket and the absorption in the ultraviolet band occurred in length ranging between 200-600 nm [25].

2.5 FTIR spectroscopy

The infrared collagen spectrum of *C. aegagrus* was recorded using an FTIR Genesis II spectrophotometer (Mattson, USA) equipped with an ATR (MIRacle™ PIKE Technologies) device with zinc selenide crystal (ZnSe). This was recorded in absorption mode at intervals of 4 cm⁻¹ and 64 scans [26].

2.6 NaCl Effect on solubility

The solubility of SPC was determined following the methodology of Montero et al. [27]. A 30 mg sample of SPC was dissolved in 0.5 M acetic acid to obtain a final solution of 3 mg/mL. After 24 hours of stirring at 4 °C, the sample was centrifuged at 5000 rpm for 12 minutes at 4 °C. The supernatant was incubated with 5 mL of NaCl in 0.5 M acetic acid at different concentrations (0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% and 6% v/v), followed by centrifugation at 12,000 rpm for 12 minutes at 4 °C. The protein content in the supernatant was determined by the

method of Lowry et al. [28] using bovine serum albumin (Sigma, St. Louis, USA) as a standard.

2.7 pH Effect on Solubility

The effect of pH on SPC solubility was evaluated according to Montero et al. [29] with modifications. Samples of 30 mg of SPC (3 mg/mL) were incubated in deionized water solutions with the pH adjusted using 6 M HCl or 6 M NaOH, in order to obtain solutions with a final pH varying between 1 and 10. After adjusting the pH, the samples were centrifuged at 12,000 rpm for 12 minutes at 4 °C.

2.8 Scanning Electron Microscopy (SEM)

The lyophilized collagen samples were metalized with gold and CETENE (Center for Strategic Technologies of the Northeast). The analysis was performed using a TESCAN Scanning Electron Microscope (SEM), MIRA LMU model (serial number: 123-0086). This equipment is designed to provide high-resolution images, allowing detailed observation of the sample morphology.

Scanning electron microscopy (SEM) was performed using an electron beam focused on the surface of the sample, allowing high-resolution images to be obtained. The environmental conditions during the analysis were maintained at 15.2°C with a relative humidity of 60.1%, which is essential to ensure the stability of the sample and the quality of the images.

The system operated with an acceleration voltage of 5 kV, suitable for the observation of several morphological characteristics of the sample. The Everhart-Thornley secondary electron detector (ETD) was used, which enables the efficient collection of electrons emitted by the sample, providing images with excellent contrast and resolution. The spot size was adjusted to 4.59 nm, allowing precise focusing of the electron beam, essential for obtaining fine details on the surface of the sample.

The working distance was set at 16.33mm, a measure that favors the depth of field and the quality of the image obtained. The system operated in high vacuum conditions, ensuring that the interaction between the electrons and the sample was not affected by air particles, which is crucial for obtaining sharp and high-quality images.

2.9 Determination of zeta potential

The SPC sample was dissolved in acetic acid at 0.5M, for 24 hours of agitation at 4 °C. This was centrifuged at 3500 rpm for 12 minutes at 4° C. The load measurement was carried out by determining the zeta potential, using the Zetasizer equipment (Nano-Z model, Malvern Instruments, Worcestershire, U.K.).

2.10 Statistical analysis

All dosing experiments were carried out in triplicate and expressed as mean and standard deviation. Analyses were performed using the statistical program MicroCal® Origin® Version 8.0 (MicroCal, Northampton, MA, USA).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 SPC collagen extraction yield

It was not possible to obtain collagen in acetic acid treatment even after 48 hours of acid treatment. This result shows that the collagen present in goat skins, as well as in other tissues, is not completely solubilized in 0.5M acetic acid. The results show that goat collagen has a higher yield in enzymatic extraction. When subjecting the skins to the extraction with acetic acid, the cleavage of the telopeptide region and the hydrolysis of the cross-links occurs [30, 31]. This happens because collagen molecules can be strongly bound by transverse covalent bonds, which are formed by the condensation of aldehyde groups in the telopeptide and intermolecular regions of collagen. This phenomenon results in a decrease in the solubility of the protein in acetic acid [32].

The collagen obtained from the skins was extracted using pepsin and on a dry weight of 100 grams of skin, 37 grams of collagen were extracted. Thus, the total yield of collagen extracted from the skins of *C. aegagrus* was 37%. The cross-links between chains in the telopeptide region of collagen molecules are cleaved in the presence of pepsin, leading to a higher extraction yield [33].

The 37% yield of collagen obtained from dried *C. aegagrus* skins using pepsin demonstrates significant efficiency compared to other animal sources and extraction methods. Extraction methods include acid, alkaline and enzymatic processes, with yields varying

depending on the species and technique [34]. Fish scales and skin have shown results with tilapia scales producing 8.9% collagen [35] and Hungarian carp skin producing 14% collagen [36]. Studies on cattle and pigs have reported lower yields than goats, with yields ranging from 1.42% to 10.75% in acid extraction and yields of around 30% in adaptations to the extraction method [37].

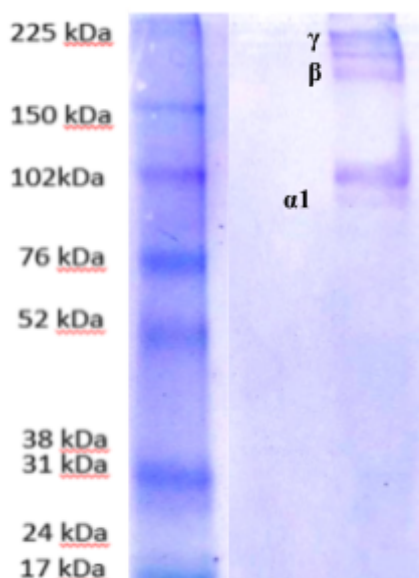
In the case of goats, the collagen fibers have a lower density of cross-links, which, combined with the cleavage promoted by pepsin in the telopeptide region, facilitates extraction and results in a higher yield [34, 38, 39]. In addition, the more uniform and finer composition of collagen fibers in goat skin contributes to the greater efficiency of the process, making them an advantageous source in terms of yield and purity. When compared to methods without enzymes or using more aggressive chemical agents such as hydrochloric acid, pepsin-based processes offer not only higher yields, but also better preservation of the molecular structure of collagen [40, 41].

Therefore, goat skins stand out as a promising source of high-quality collagen, combining extraction efficiency, structural integrity and lower environmental impact, since they take advantage of waste from an existing production chain. This feature reinforces the economic and environmental viability of using goat skins as a raw material for obtaining value-added biomolecules.

3.2 Polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE)

The SDS-PAGE of collagen obtained from untanned solid residues of goat leather (Fig. 4). Observe the molecular weights ranging from 225 kDa to 17 kDa. The sample showed two bands with molecular weights between 150 and 102 kDa, corresponding to the $\alpha 1$ and $\alpha 2$ chains, identified in type I collagen. It is observed in the column that $\alpha 1$ is proportionally denser than $\alpha 2$ this is due to the presence of significant amounts of cross-links. The sample revealed bands with molecular weights greater than 150 kDa, corresponding to the β chain [33, 42] and close to 225 kDa corresponding to the γ chain.

Fig. 4 Distribution of bands for SPC extracted from untanned cowhide waste. SDS-PAGE gel electrophoresis of collagen extracted from goat skins. The distribution of bands indicates the presence of the γ , β , $\alpha 1$ and $\alpha 2$ chains, confirming type I collagen with bands ranging from 225 kDa to 17 kDa.



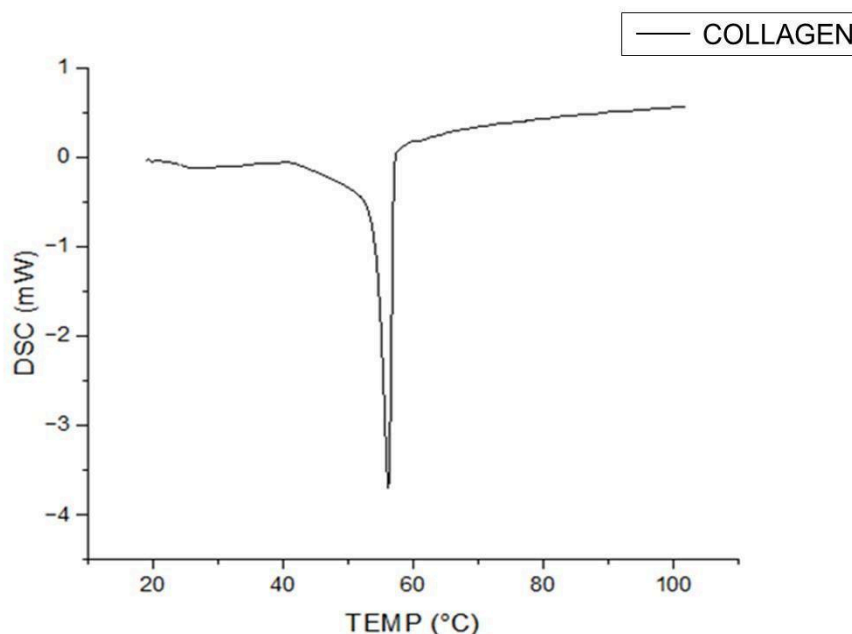
Source: Author (2024)

Gao et al. [43], in their work found similar results for SPC extracted from sheep, this collagen being composed of chains $\alpha 1$ and $\alpha 2$ and β and γ , indicating dimer and trimer of α chains, respectively, high molecular weight compounds, representing type I collagen. The data found in the present work are in accordance with those presented by these authors and indicate that possibly the collagen extracted from untanned solid residues of goat leather in northeastern Brazil corresponds to type I collagen.

3.3 Thermal stability

The DSC (Differential Scanning Calorimetry) pattern of the goat SPC sample is characterised by an endothermic peak at approximately 56 °C. (Fig. 5). This result is an indication that digestion by pepsin probably does not affect the triple helix structure of collagen [44, 45]. One of the main factors directly influencing the thermal stability of SPC is the amino acid content, with hydroxyproline playing a key role as it maintains the stability of the trimers present in this protein.

Fig. 5. SPC thermogram rehydrated in 0.5M of acetic acid. Caption: DSC thermogram of SPC collagen rehydrated in 0.5M acetic acid. It shows an endothermic peak at approximately 56 °C, indicating the thermal stability and integrity of the collagen's triple helix structure.



Source: Author (2024)

It is therefore possible to establish a linear relationship between the maximum transition temperature (T_{max}) and the percentage of hydroxyproline in the amino acid content [44, 45, 46]. SPC from goats has a higher T_{max} than other terrestrial animals, such as commercial collagen from calf leather (35.7°C) [47, 48], bovine leather (36.3°C) [49] and rabbit leather (36°C) [50]. This difference in thermal stability is of great relevance in practical applications, such as the processing of biomaterials and food.

In biomaterials, for example, collagens with a higher T_{max} , such as goat's, may be more suitable for physiological environments, such as in dressings or scaffolds for tissue engineering, where the high thermal stability prevents the collagen from degrading at body temperature, ensuring greater durability and functionality. In food processing, such as gelatine production, the superior thermal stability can provide better resistance to temperature variations during manufacture and storage, resulting in more consistent products with a better texture. Thus, collagens with higher T_{max} offer advantages in terms of performance, thermal resistance and greater flexibility in various industrial applications [51, 52, 53].

3.4 Ultraviolet Spectrum

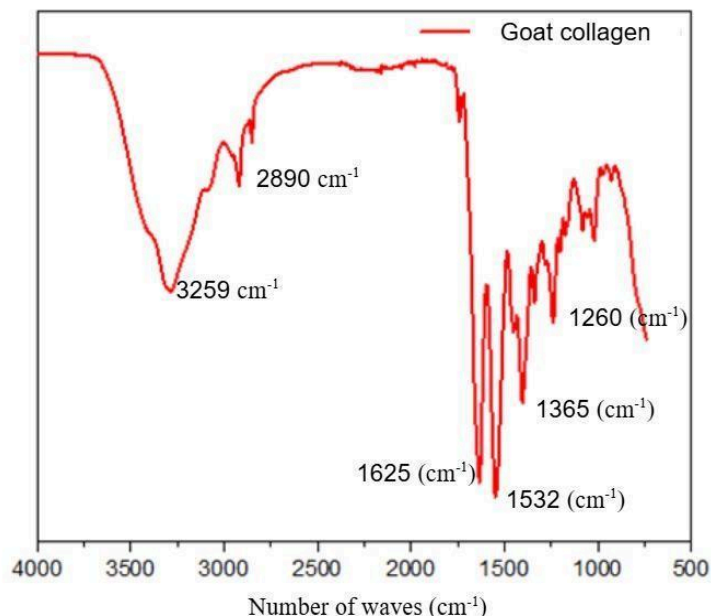
The ultraviolet spectrum data revealed that SPC collagen has at the peak of the length range of 238 nm, an absorbance of 0.928 indicating that the triple helix of this protein is intact after the extraction process. This peak value of length range indicates and confirms that the collagen studied corresponds to type I, which forms CO, CONH₂ and COOH groups accessible in the polypeptide chains of this biomolecule [54].

According to studies present in the literature and the property of phenylalanine and tyrosine being chromophores, the integrity of non-helical telopeptide regions is observed [55]. Thus, it can be said that the material extracted in this work is type I collagen, because the level of absorbance occurred in a range that comprises the occurrence of this protein. The results indicate that the extraction process obtained collagen with a high degree of purity, efficiently separating non-collagenous proteins during the process.

3.5 FTIR spectroscopy

FTIR infrared absorption spectroscopy is an important method to analyze the existence of functional groups of organic structures that are located between 400 and 4000 cm⁻¹. In this method, when radiation is emitted on extracts, a vibration of atoms and their groups of organic compounds occurs, facilitating the identification of the bands. This happens in each change in the level of vibrational energy, influencing changes in rotational level causing the printing and constitution of the data and bands observed in the spectrum [56, 57]. The collagen infrared spectrum obtained from goat tannery residues can be observed in Fig. 6, where the wave number and its peaks define the functional groups of collagen, thus characterizing the sample.

Fig. 6 FTIR spectrum for SPC collagen. FTIR spectrum of SPC collagen, showing the functional groups present in the collagen, with specific peaks for amides A, B, I, II and III, which represent structural and molecular bonding characteristics of the collagen.



Source: Author (2024)

Additionally, Table 1 shows wave peaks and groupings observed in the infrared spectrum -FTIR for investigated sample. The SPC infrared spectrum obtained from goat skins showed the peak for Amide A and occurred at 3259 cm⁻¹ probably due to the involvement of NH groups of peptides in hydrogen bonds [58, 59]. Normally, the peak of this type of amide occurs in the range between 3400 cm⁻¹ and 3340 cm⁻¹. Amide B that represents the asymmetric elongation of CH₂ [60] was found at 2890 cm⁻¹. In general, NH free stretch vibration occurs in the range of 3,400 to 3,440 cm⁻¹. When the NH group of a peptide is involved in a bond, the position is shifted to lower frequencies, usually around 3300 cm⁻¹ [61]. On the other hand, the amide B band of 2890 cm⁻¹ is related to the asymmetric stretch vibration of CH₂ [62].

Table 1. Wave peaks and groupings observed in the infrared spectrum -FTIR.

Wavelength Region (cm ⁻¹)	Amides	Functional Group
3259	Amide A	NH Group
2890	Amide B	CH ₂ Asymmetric Elongation
1625	Amide I	Stretching of carbonyl group C=O; secondary structure
1532	Amide II	NH vibrations, CN stretching (triple helix)
1345 -1260	Amide III	N-H deformation and C-N stretching

Source: Adapted from Lin and Liu [57]

The portion that corresponds to Amide I has a stretching frequency between 1600 and 1700 cm⁻¹ and is associated with stretching vibrations of carbonyl groups along the polypeptide skeleton and this region may indicate the presence of secondary structures [63]. The band found for goat SPC corresponding to Amide I was 1625 cm⁻¹ and may be associated with the elongation vibrations of the carbonyl groups along the polypeptide chain, contributing to the secondary structure of the peptide [32]. This data indicates confirmation of the formation of hydrogen bonds between the N-H strains and group C=O (Glycine), referring to the initiation process of the triple collagen helix [64].

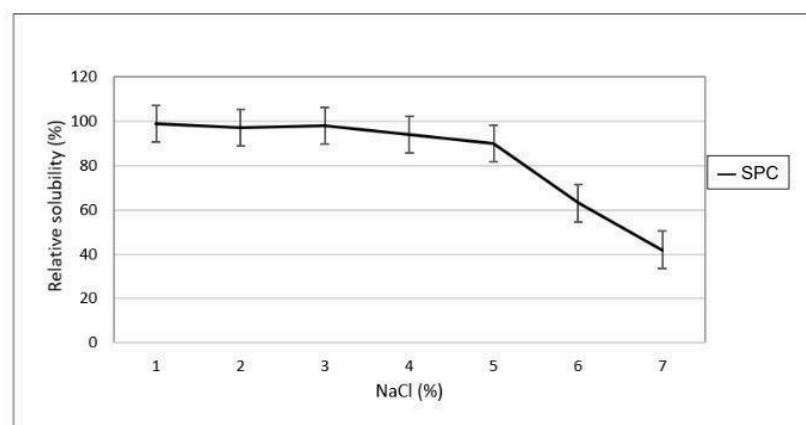
The Amida II band was located at 1532 cm⁻¹ and corresponds to the NH vibrations coupled to the CN stretch vibration, associated with the triple helix structure of collagen [65]. The Amide III band was located between 1345 and 1260, associating in the process of N-H deformation and C-N stretching. The impression of infrared spectral values between the range of 1260- 1300 cm⁻¹ is characterized by being a unique mark of the composition and molecular organization of collagen allowing the sequential tryptic formation of glycine - Gly, proline - Pro and hydroxyproline - Hyp [66]. These results reveal that the enzymatic extraction process caused structural changes in the collagen molecule without, however, compromising its basic structure.

3.6 Effect of NaCl concentration on collagen solubility

The solubility of SPC collagen (30 mg) extracted from untanned solid goatskin waste as a function of NaCl concentration showed high solubility up to 2% NaCl, with a significant drop

between 2% and 4% and stability between 5% and 6%, demonstrating the “salting” effect (Fig. 7). In this figure, it is observed that the solubility of the SPC remained high up to the concentrations of 1% and 2% of NaCl (w/v), with a significant decrease between 2% and 4%, and only stabilizing between 5% and 6%. Similar results were found for fish residues of the species *Carcharhinus albimarginatus* [67] and *Evenchelys macrura* [50].

Fig.7 SPC solubility in NaCl



Source: Author (2024)

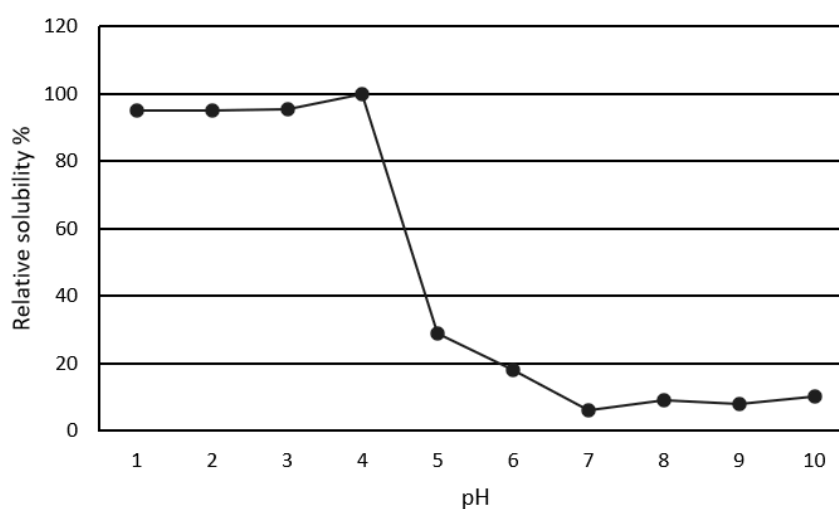
The decrease in collagen solubility is due to the "salting out" effect that occurs at high concentrations of NaCl. Once in the medium, ionic salts will compete for water with proteins; as these have a greater ionic strength, they will have the effect of reducing the solubility of collagen, which in turn will increase the hydrophobic interactions between their chains resulting in precipitation [68, 69]. SPC is less susceptible to variations in NaCl concentration, probably due to partial hydrolysis of high molecular weight crosslinked molecules by pepsin action [68].

3.7 pH effect on solubility

The SPC showed greater solubility in acid pH ranges, showing small variations throughout the range (Fig. 8). The solubility peak was observed at pH 4.0, with a sharp drop to pH 7.0 (neutral range), reaching its minimum point at pH 10. These variations in solubility as a function of pH can be explained by the different conformations that collagen adopts in different pH conditions. When the pH approaches or reaches the Isoelectric point (pI) of collagen, there is

a significant decrease in solubility. This happens because the sum of positive and negative charges is equal to zero, resulting in the aggregation and precipitation of molecules due to the increase in hydrophobic interactions [70].

Fig. 8 SPC solubility in function of pH. The greatest solubility occurs at acidic pH, with a peak at pH 4.0 and a reduction to the isoelectric point at pH 7.0, reaching a minimum at pH 10.



Source: Author (2024)

3.8 Scanning Electron Microscopy (SEM)

After lyophilization of collagen, it acquires a spongy texture (Fig. 9) and some areas appear more rigid and rough, characteristic of collagenous proteins and/or resulting from the lyophilization process [71].

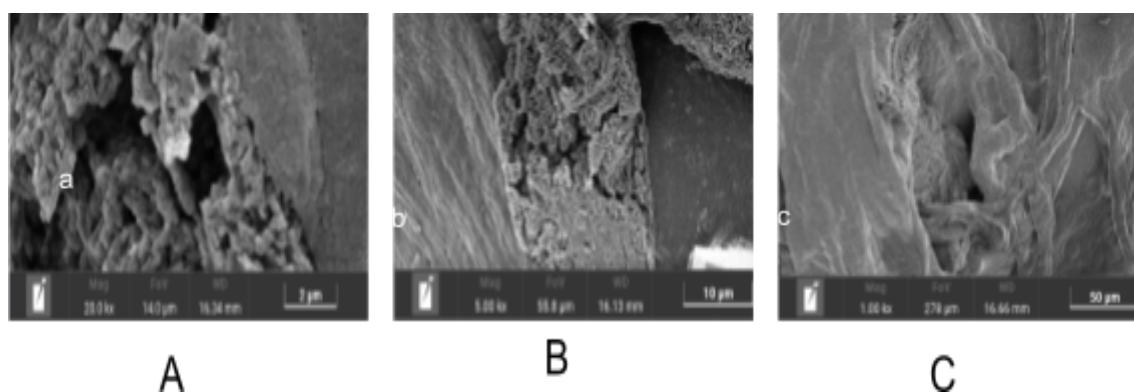
Fig. 9 Lyophilized collagen from goat skin. The image shows the collagen before preparation for scanning electron microscopy.



Source: Author (2024)

In scanning electron microscopy it was possible to observe some irregular surfaces, cavities and fibrous structures present in the lyophilized collagen (Fig. 10).

Fig. 10 Lyophilized collagen visualized through Scanning Microscopy. Figure 10-A: rough surface of collagen at 2 μ m with the presence of cavities; 10-B: collagen surface at 10 μ m; 10-C: fibrous structures in collagen at 50 μ m. Morphological structures of freeze-dried goat skin collagen observed by scanning electron microscopy (SEM). The image shows the irregular, rough surface of the collagen at different magnifications: (10A) with the presence of cavities on the surface magnified by 2 μ m; (10B) collagen surface at 10 μ m; (10C) fibrous structures at 50 μ m. These morphological characteristics, such as cavities and fibers, can facilitate the use of collagen as a biomaterial due to its porous and adaptable architecture.



Source: Author (2024)

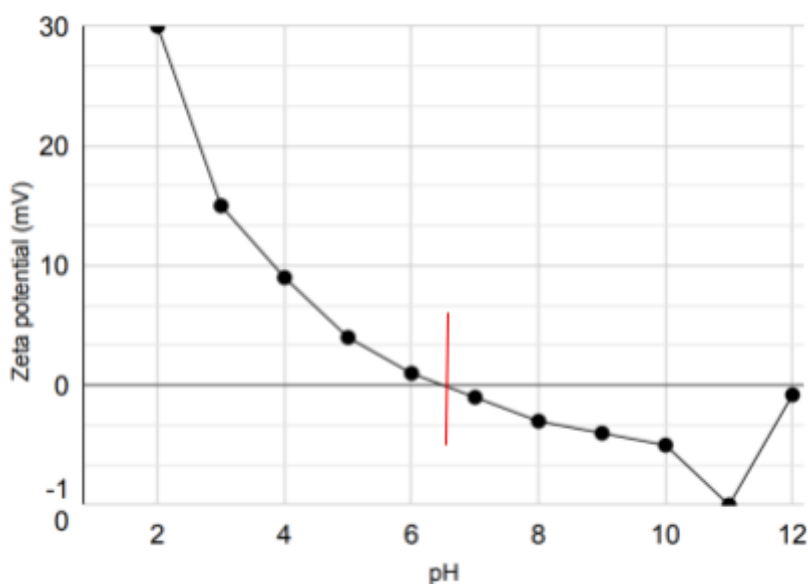
The lyophilized collagen surface showed in the SEM images a rough or rough texture, resulting from the freeze-drying process that removes moisture and creates an irregular appearance [72, 73]. The presence of cavities and fibrous structures in collagen can favor its

application as a biomaterial [74].

3.9 Determination of zeta potential

The zeta potential is an important parameter to evaluate the stability of colloidal suspensions, such as collagen [75]. It reflects the magnitude of the electrical charge in the double electric layer that surrounds the particles in solution, directly influencing the interaction between them. The analysis of the zeta potential in conjunction with the pH allows us to understand the behavior of collagen in aqueous solutions, providing information on the stability of the suspension, the interaction with other molecules and the functionality in various industrial, biomedical and cosmetic applications [76, 77]. Fig. 11 shows the collagen zeta potential curve in function of pH.

Fig. 11 Relationship between the Zeta Potential and the pH. Zeta potential curve of collagen as a function of pH, showing the stability of the colloidal suspension. Collagen shows a positive zeta potential between pH 2 and 6, with a predominant positive surface charge due to the protonation of the amino groups. Above pH 7, the zeta potential becomes negative, indicating the deprotonation of the carboxylic groups. The isoelectric point (pI) is identified at pH 6.61, where the net charge of the collagen is zero, increasing the tendency to aggregate due to the reduction in electrostatic repulsion between the particles.



Source: Author (2024)

It is observed that collagen has positive zeta potential between pH 2 and 6, indicating a predominance of positive charges on its surface, probably due to the protonation of the amino

groups of amino acids [68]. Above pH 7, the zeta potential becomes negative, showing the inversion of the surface charge to negative, possibly due to the deprotonation of the carboxyl groups [25].

The isoelectric point (pI), pH at which the net load of the protein is zero and the zeta potential is canceled, was determined to be 6.61. This value, close to neutral pH, was expected for goat skin collagen, since the surface load of this protein is mainly resulting from the ionization of the amino and carboxylic acid groups of the amino acids that compose it [78].

It is important to note that, in addition to the composition of amino acids, other factors can influence the pI of collagen, such as the type of collagen, the source (goat skin) and the extraction method [79]. The analysis of Fig. 11 reveals that the zeta potential reaches values above +30 mV at pH 2. According to the DLVO theory (Derjaguin, Landau, Verwey and Overbeek), this magnitude of the zeta potential suggests good stability of the collagen suspension at extreme pHs, with a greater tendency to aggregation close to pI, due to the reduction of electrostatic repulsion between particles.

The knowledge of the pI and zeta potential of goat skin collagen is essential to optimize its application in cosmetic formulations, ensuring product stability and proper interaction with the skin, since the zeta potential can influence the adhesion and penetration of collagen into the skin [77].

CONCLUSION

This study showed that the untanned solid residues of goat leather (*C. aegagrus*) is an excellent sustainable source of collagen, which were characterized through different techniques indicating that the extracted collagen corresponds to type I. The SPC sample was susceptible to loss of solubility by increasing NaCl concentrations. These results show that the collagen obtained from these residues has a high purity content as well as a considerable commercial importance and can be used in the future in obtaining various biomaterials.

REFERENCES

1. Oliveira, N. R., Da Silva, I. A., & Pinto, R. R. (2021). Collagen: a brief review. *Revista Brasileira de Desenvolvimento*, 7, 112-126. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n11-112>.
2. Liu, X. et al. (2019). Biofabrication and Characterization of Collagens with Different Hierarchical Architectures. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 5 (1), 445-454. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.9b01252>.
3. Tang, C. et al (2022). Collagen and its derivatives: From structure and properties to their applications in food industry. *Food Hydrocolloids*. 131, 107748. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107748>.
4. Matos, E. S., Alves, G. P., Silva, D. E. C., Santos, B., Jesus, R., & Barbosa, A. (2023). Os bioestimuladores de colágeno no tratamento do envelhecimento cutâneo e a atuação do farmacêutico. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, 12(14). <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i14.44423>
5. Miranda, R. B., Oliveira, P., & Rossi, R. (2021). Efeitos da suplementação de colágeno hidrolisado no envelhecimento cutâneo: uma revisão sistemática e meta-análise. *Revista Internacional de Dermatologia*. <https://doi.org/10.1111/ijd.15518>
6. Silva, T., & Penna, A. L. B. (2012). Colágeno: características químicas e propriedades funcionais. *Revista do Instituto Adolfo Lutz*, 71. <https://doi.org/10.53393/rial.2012.v71.32461>
7. Shekhter, A., Fayzullin, A., Vukolova, M., Rudenko, T. G., Osipychcheva, V. D., & Litvitsky, P. (2019). Aplicações médicas de colágeno e materiais à base de colágeno. *Química Medicinal Atual*, 26(3). <https://doi.org/10.2174/0929867325666171205170339>
8. Oliveira, N. R., Silva, I. A., & Pinto, R. R. (2021). Colágeno: uma breve revisão / Collagen: a brief review. *Revista Brasileira de Desenvolvimento*, 7(11). <https://doi.org/10.34117/bjdv7n11-112>
9. Vitoreli, B. C., Nunes, G. O., Melo, A. B., Montenegro, L. R., Campos, R. V. R., Dias, L. A., Oliveira, M. L. G., Ribeiro, F. V., Schneider, F. F., Martins, E. A., & Zanoni, R. D. (2024). Therapeutic approach to autoimmune skin diseases. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.7-042>
10. Caruso, G., Floris, R., Serangeli, C., & Di Paola, L. (2020). Fishery wastes as a yet undiscovered treasure from the sea: Biomolecules sources, extraction methods and valorization. *Marine drugs*, 18(12), 622. <https://doi.org/10.3390/md18120622>
11. Noorzai, S., & Verbeek, C. (2020). Collagen: From waste to gold. In *Biotechnological applications of biomass*. IntechOpen, 127-142. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94266>
12. Ferreira, C., et al. (2020). Potencial de produção de colágeno a partir de escamas de tilápia no Oeste do Paraná. *Revista Brasileira de Pesca*, 14, 163-166. <https://doi.org/10.37885/200400081>
13. Lohmann, L., et al. (2018). Extração do colágeno a partir de pele de peixe da espécie carpa húngara (*Cyprinus carpus*, L.). In *Processos de Engenharia Química*. Blucher. <https://doi.org/10.5151/COBEQ2018-PT.0262>
14. Bitencourt, G. D. A., Deknes, L. B., & Laura, V. A. (2022). Crescimento de mudas de eucalipto em solo com aplicação do lodo de curtume. *Scientia Plena*, 18(3). <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2022.034901>
15. Souza, F., Freire, E. M. B., Alves, T. N., Oliveira, R. P. S., Aderaldo, F. Í. C., Campello, T. H. P., Aderaldo, P. Í. C., Costa, W. M., & Campello, J. M. A. V. (2024). Use of agro-industrial waste in the processing of ecological salmon leather. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*. <https://doi.org/10.55905/oelv22n11-078>
16. Fernandes, P. R. B., Baruke-Ramos, J., & Sousa, C. M. (2024). Circular design and sustainable development in local productive arrangements. *Projética*. <https://doi.org/10.5433/2236-2207.2024.v15.n3.49256>

17. Coppola, D. (2020). Colágeno marinho de fontes alternativas e sustentáveis: extração, processamento e aplicações. In *Drogas Marinhas*. <https://doi.org/10.3390/md18040214>
18. Nascimento, M. I. S. S., Ferreira, F., Albuquerque, H. J. O., Nascimento, T. L. F., Albuquerque, H., Cabral, A. M. D., Silva, L. F. D., Santos, M. J. M., Barreto, L. M. G., Lima, V. R. S., & Santos, G. C. L. (2022). Insights dos principais produtos oriundos da caprinovinocultura no Nordeste brasileiro. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, 11(5). <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28264>.
19. Santos, W.S. et al (2023). Diagnóstico da cadeia produtiva de caprinos e ovinos no Brasil e na região Nordeste. *Revista Brasileira De Desenvolvimento*, 9 (7), 21283–21303. <https://doi.org/10.34117/bjdv9n7-006>
20. Santos, P.V.S., & Araújo, M.A (2020). A metodologia de produção mais limpa (P+L): um estudo de caso em uma indústria de curtume. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 9 (1), 524-547. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e12020524-547>.
21. Mendes Junior, B. O., & Ximenes, L. F. (2021). Produção e perspectiva do setor de couro e calçados do Brasil, Nordeste, Ceará, Bahia. *Caderno Setorial ETENE*, 5(148). https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/647/1/2021_CDS_148.pdf
22. Frazão, F. F. et al (2024). Prospecção tecnológica e elaboração de produtos após curtimento artesanal com tanino vegetal em peles de peixes cultivados na baixada Maranhense. *Revista Brasileira de Pesquisa Animal e Ambiental*, 7 (1), 49-60. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n1-049>.
23. Laemmli, U.K. (1970). Clivagem de proteínas estruturais durante a montagem da cabeça do bacteriófago T4. *Nature*, 22, 680-685. <https://doi.org/10.1038/227680a0>
24. Rochdi, A., Foucat, L., & Renou, J. P. (2000). NMR and DSC studies during thermal denaturation of collagen. *Food Chemistry*, 69 (3), 295–29. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00267-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00267-8)
25. Zeng, S. et al. (2012). Structure and characteristics of acid and pepsin-solubilized collagens from the skin of cobia (*Rachycentron canadum*). *Food Chemistry*, 135 (3), 1975–1984. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.086>
26. Sionkowska, A (2006). Current research on the blends of natural and synthetic polymers as new biomaterials: Review. *Progress in Polymer Science*, 36 (9), 852-875. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.05.003>
27. Montero, P., Jiménez-Colmenero, F., & Borderías, J. (1991). Effect of pH and the presence of NaCl on some hydration properties of collagenous material from trout (*Salmo irideus* Gibb) muscle and skin. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 54 (1), 137-146. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740540115>
28. Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A. L., & Randall, R. J. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193, 265-275. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)52451-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)52451-6).
29. Duan, Y., & Cheng, H. (2022). Preparation of immobilized pepsin for collagen extraction from bovine leather. *RSC Advances*. <https://doi.org/10.1039/d2ra05744a>
30. Munmun, S. A., Rashid, T., & Rahman, M. M. (2024). Optimization of enhanced collagen extraction from raw hide trimming waste using bromelain enzyme derived from pineapple peel through response surface methodology. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140774>.
31. Vaez, M., Asgari, M., Hirvonen, L., Bakir, G., Aguayo, S., Schuh, C., Gough, K., & Bozec, L. (2022). Modulation of collagen biophysical and biochemical properties by glycation for tissue engineering applications. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2022.03.03.482886>
32. Nurjanah, N., Baharuddin, T. I., & Nurhayati, T. (2021). Extraction of collagen from yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) skin using pepsin and papain enzymes. *Jurnal Pengolahan Hasil*

- Perikanan Indonesia. <https://doi.org/10.17844/jphpi.v24i2.35410>
33. Ferreira, C., Irmen, B. R., Gomes, L., Borges Neto, P. G., & Stroher, R. (2020). Potencial de produção de colágeno a partir de escamas de tilápia no Oeste do Paraná. *Revista Brasileira de Pesca*, 14, 163-166. <https://doi.org/10.37885/200400081>
 34. Oliveira, G. G., Uchida, D. T., Miyoshi, J. H., Grieser, D. D. O., Quevedo, P. S., & Souza, M. L. R. (2024). Extração de colágeno de resíduos da indústria pesqueira. *Agropecuária Científica no Semiárido*. <https://doi.org/10.30969/8he2xf62>.
 35. Shen, Z., Zhang, Q., Li, L., Li, D., Takagi, Y., & Zhang, X. (2022). Collagen and gel properties of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) for biomaterial applications. *Gels*. <https://doi.org/10.3390/gels8110699>
 36. Dias, A. P. S., Ramos, M., & Rijo, B. (2022). Processing of bovine tallow for biodiesel production: microwaves versus boiling water and acetone fat extraction. *Processes*. <https://doi.org/10.3390/pr10040666>
 37. Mendez, L. C., & Lucas, L. A. (2024). Técnicas de extração de colágeno e otimização da hidrólise de dejetos animais: uma revisão bibliométrica. *Pesquisa em Agrociências*. <https://doi.org/10.17268/agrosci.2024.007>
 38. Heidari, M., & Rezaei, M. (2022). Pepsin extracted from trout waste and an ultrasound-assisted green method for fish collagen recovery. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100854>
 39. Gomez, K. P., Fiorimanti, M., Cristofolini, A., Benzoni, A., Luján, M., Luján, O., Barbeito, C., & Merkis, C. I. (2024). Caracterização do colágeno placentário fetal em cabras restringidas nutricionalmente durante a etapa pré-puberal. *In Vet*. <https://doi.org/10.62168/invet.v26i1.42>
 40. El Bliidi, O., Omari, N. E., Balahbib, A., Ghchime, R., Menyiy, N., Ibrahimi, A., Ben Kaddour, K., Bouyahya, A., Chokairi, O., & Barkiyoun, M. (2024). Extraction methods, characterization, and biomedical applications of collagen: A review. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. <https://doi.org/10.33263/briac115.135871361>
 41. Esquisatto, M. A. M., Contriciani, R. E., Pimentel, E. R., & Gomes, L. (2023). Proteoglycan population in different anatomical sites of bovine knee articular cartilage. *Revista Ensaios Pioneiros*. <https://doi.org/10.24933/rep.v7i1.301>
 42. Gao, L. (2018). The characterization of acid and pepsin soluble collagen from ovine bones (Ujumuin sheep). *Journal of Integrative Agriculture*, 17 (3), 704-711. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61751-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61751-9).
 43. Xu, R. et al. (2020). Protein solubility, secondary structure and microstructure changes in two types of undenatured type II collagen under different gastrointestinal digestion conditions. *Food Chemistry*, 343 (1), 128555. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128555>.
 44. Zhang, M. et al. (2020). Overheating induced structural changes of type I collagen and impaired the protein digestibility. *Food Research International*, 134, 109225. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109225>
 45. Akita, M., Nishikawa, Y., Shigenobu, Y., Ambe, D., Morita, T., Morioka, K., & Adachi, K. (2020). Correlation of proline, hydroxyproline, and serine content, denaturation temperature, and circular dichroism analysis of type I collagen with the physiological temperature of marine teleosts. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126775>
 46. Taga, Y., Kusubata, M., & Mizuno, K. (2020). Quantitative analysis of positional distribution of hydroxyproline in Gly-Xaa-Yaa collagen sequences by LC-MS with partial acid hydrolysis and pre-column derivatization. *Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01098>
 47. Li, D., Yang, W., & Li, G. (2008). Extraction of native collagen from limed bovine split wastes through improved pretreatment methods. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 83 (7), 1041-1048. <https://doi.org/10.1002/JCTB.1912>.
 48. Kempka, A., et al. (2014). Utilização da calorimetria exploratória diferencial (DSC) para

- avaliação da desnaturação térmica de diferentes colágenos bovinos. In *Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. <https://doi.org/10.5151/CHEMENG-COBEQ2014-1167-20687-175307>
49. Martínez-Ortiz, M.A. et al. (2015). Extraction and characterization of collagen from rabbit skin: partial characterization. *International Journal of Food Properties*, 13(2), 253–258. <https://doi.org/10.1080/19476337.2014.946451>.
 50. Meyer, M. (2019). Processamento de biomateriais à base de colágeno e as propriedades dos materiais resultantes. *Engenharia Biomédica Online*. <https://doi.org/10.1186/s12938-019-0647-0>
 51. El Bliidi, O., El Omari, N., Balahbib, A., Ghchime, R., El Menyiy, N., Ibrahimi, A., ... & Barkiyou, M. (2021). Extraction methods, characterization and biomedical applications of collagen: A review. *Biointerface Res. Appl. Chem*, 11, 13587-13613.
 52. Senra, M. R., & Vieira Marques, M. F. V. (2020). Thermal and mechanical behavior of ultra-high molecular weight polyethylene/collagen blends. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103577>
 53. Yu, C.-H., Khare, E., Narayan, O., Parker, R. N., Kaplan, D. L., & Buehler, M. (2021). ColGen: An end-to-end deep learning model for predicting the thermal stability of de novo collagen sequences. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104921>
 54. Carpio, K., Bezerra, R. S., Cahú, T. B., do Monte, F. T. D., Neri, R. C. A., da Silva, J. F., Santos, P. R., Carvalho, R. P., Galeno, D. M. L., & Inhamuns, A. J. (2023). Extraction and characterization of collagen from the skin of Arapaima gigas, an Amazonian freshwater fish. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*. <https://doi.org/10.1590/1414-431X2023e12564>
 55. Barone, V., & Fusè, M. (2023). Accurate structures and spectroscopic parameters of phenylalanine and tyrosine in the gas phase: A joint venture of DFT and composite wave function methods. *The Journal of Physical Chemistry A*. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.3c01174>
 56. Seccatto, C. P. (2021). Aplicação da espectroscopia FT-IR e Raman para caracterização de solo obtido em escavação no sítio arqueológico Templo dos Pilares, Mato Grosso do Sul. *CLIO – Arqueológica*, 36 (1) Disponível em: <https://doi.org/10.51359/2448-2331.2021.250748>.
 57. LIN, Y. K.; LIU, D. C. (2006) Effect of pepsin digestion at different temperatures and time on properties of telopeptide-poor collagen from bird feet. *Food Chemistry*, v. 94, p. 621-625. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.12.007>
 58. Li, H. et al. (2004). Studies on bullfrog skin collagen. *Food Chemistry*, 84 (1), 65-69. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00167-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00167-5)
 59. Chonger, A. M. (2023). Assessment of changes in conformation and collagen content of goat skin due to different dehairing processes. *East African Journal of Science, Technology and Innovation*. <https://doi.org/10.37425/eajsti.v4i3.692>
 60. Queda, T. (2022). Infrared spectra of amides. Part 1. Stretching vibrations of primary carboxamides. *Vibrational Spectroscopy*. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2022.103386>
 61. Hansen, P., Vakili, M., Kamounah, F. S., & Spanget-Larsen, J. (2021). NH stretching frequencies of intramolecular hydrogen-bonded systems: An experimental and theoretical study. *Molecules*. <https://doi.org/10.3390/molecules26247651>
 62. De Meutter, J., & Goormaghtigh, E. (2021). Contribution of amino acid side chains to protein FTIR spectra: Impact on secondary structure assessment. *European Journal of Biophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00249-021-01507-7>
 63. Sadat, A., & Joye, I. (2020). Peak fitting applied to Fourier transform infrared and Raman spectroscopic analysis of proteins. *Applied Sciences*. <https://doi.org/10.3390/app10175918>
 64. Walker, D. R., Alizadehmojarad, A. A., Kolomeisky, A., & Hartgerink, J. (2021). Uncharged

- amide- π stabilizing interactions can be used to control collagen triple helix self-assembly. *Biomacromolecules*. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.1c00234>
65. Cutini, M., & Ugliengo, P. (2021). Infrared harmonic characteristics of collagen models in B3LYP-D3: From amide bands to the THz region. *Journal of Chemical Physics*. <https://doi.org/10.1063/5.0056422>
 66. Taga, Y., Tanaka, K., Hattori, S., & Mizuno, K. (2021). In-depth correlation analysis demonstrates that 4-hydroxyproline at the Yaa position of Gly-Xaa-Yaa repeats predominantly stabilizes the collagen triple helix. *Matrix Biology Plus*. <https://doi.org/10.1016/j.mbplus.2021.100067>
 67. Jeevithan, E. et al. (2014). Isolation, purification and characterization of pepsin soluble collagen isolated from silvertip shark (*Carcharhinus albimarginatus*) skeletal and head bone. *Process Biochemistry*, 49 (10), 1767-1777. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.06.011>
 68. Oliveira, N. R., Da Silva, I. A., & Pinto, R. R. (2021). Collagen: A brief review. *Brazilian Journal of Development*. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n11-112>
 69. Soria Biurrun, T., Abarzuza, L., & Fernández-D'arlas, B. (2023). Affinity between wool keratases and different ions in aqueous phase analyzed by sedimentation. *Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry*. <https://doi.org/10.55815/413303>
 70. Vojdani, F. (1996). Solubility. In G. M. Hall (Ed.), *Methods of testing protein functionality* (1st ed., pp. 11-60). Great Britain: St Edmundsbury Press.
 71. Katrilaka, C., et al. (2023). Freeze-drying process for the fabrication of collagen-based sponges as medical devices in biomedical engineering. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma16124425>
 72. Marques, D., et al. (2023). Surface topography of resorbable porcine collagen membranes and their effect on early osteogenesis: An in vitro study. *Journal of Stomatology Oral and Maxillofacial Surgery*. <https://doi.org/10.1016/j.jormas.2023.101607>
 73. Araújo, E.S., Santos, J., & Narain, N. (2020). Avaliação da influência de diferentes condições de liofilização nas características físico-químicas e sensoriais do umbu em pó. *Revista Brasileira de Desenvolvimento*, 6(9), 359-378. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-359>
 74. GhomI, E. R., et al. (2021). Collagen-based biomaterials for biomedical applications. *Journal of Biomedical Materials Research. Part B - Applied biomaterials*. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34881>
 75. Jailani, S., Franks, G., Healy, T. ζ Potential of Nanoparticle Suspensions: Effect of Electrolyte Concentration, Particle Size, and Volume Fraction. *Journal of the Society for Information Display*, 16 (4), 202-212. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02277.x>
 76. Benoso, P., et al. (2022). Rheological and viscoelastic properties of colloidal solutions based on gelatin and chitosan as a function of pH. *International Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15592>
 77. Serrano-Lotina, A. (2022). Zeta potential as a tool for functional materials development. *Catalysis Today*, 423 (1), 113862. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2022.08.004>
 78. Li, J., et al. (2020). Physicochemical properties of collagen from *Acaudina molpadioides* and its protective effects against H₂O₂-induced injury in RAW264.7 cells. *Marine Drugs*. <https://doi.org/10.3390/md18070370>
 79. Chen, J., et al. (2016). Extraction and characterization of acid-soluble collagen from scales and skin of tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Lwt - Food Science and Technology*, 66, 453-459. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.070>

STATEMENTS AND DECLARATIONS

Funding

The authors declare that no funds, grants or other support were received during the preparation of this manuscript.

Competing Interests

The authors have no relevant financial or non-financial interests to declare.

Author contributions

All authors contributed to the conception and design of the study. The authors Jamile Maria Pereira Bastos Lira de Vasconcelos, Robson Coelho de Araújo Neri and Maria Betânia Melo de Oliveira contributed to the conception and design of the study. Material preparation, data collection and analysis were carried out by Jamile Maria Pereira Bastos Lira de Vasconcelos and Robson Coelho de Araújo Neri. The authors Bruno Oliveira de Veras, Carlos Eduardo Sales da Silva and Ranilson Souza Bezerra assisted with the methodology. The first draft of the manuscript was written by Jamile Maria Pereira Bastos Lira de Vasconcelos, and authors Amanda Vieira de Barros, Robson Coelho de Araújo Neri and Maria Betânia Melo de Oliveira commented on and revised previous versions of the manuscript. Maria Cecília Ferreira Galindo worked on the translation of the manuscript. All the authors read and approved the final manuscript.

CONCLUSÕES GERAIS DA TESE

Este trabalho investigou o uso dos resíduos de pele caprina, ainda não curtidos, como uma fonte alternativa de colágeno. A ideia foi unir o aproveitamento de um material que muitas vezes é descartado com a valorização da caprinocultura, atividade comum no semiárido e importante para muitas famílias da região.

A extração do colágeno apresentou bons resultados, com rendimento de 37% em relação ao peso seco do material. As análises feitas com diferentes técnicas confirmaram que o colágeno obtido era do tipo I, com boa pureza e estrutura preservada — o que mostra que ele pode ser aproveitado em várias áreas, como na indústria de cosméticos, alimentos e medicamentos.

Além de mostrar que a extração é possível e eficiente, o estudo também apontou que dar um novo destino a esses resíduos pode ajudar a reduzir impactos ambientais e abrir caminho para novas oportunidades econômicas. Reaproveitar materiais que antes eram descartados é uma forma de transformar problemas em soluções sustentáveis.

O trabalho também destaca como a caprinocultura pode contribuir para o desenvolvimento local, promovendo renda, inclusão social e fortalecendo a agricultura familiar em regiões mais secas, como o sertão de Pernambuco. Os resultados obtidos estão alinhados com propostas atuais de desenvolvimento sustentável, como o uso mais consciente dos recursos, a inovação na indústria e a geração de trabalho digno.

Portanto, esta tese serve de base para a criação de novas tecnologias e soluções sustentáveis, ajudando a ciência a avançar e a melhorar as condições sociais, econômicas e ambientais de regiões vulneráveis, como o sertão de Pernambuco.