

# PlumaFilm: Naturalmente Leve

Produção de um bioplástico a partir de queratina avícola e glicerol.

Martim Sousa <sup>1</sup>, Rodrigo Seabra <sup>1</sup>, Tiago Queiroz <sup>1</sup>, Paulo Sousa <sup>1</sup>

**Parceiros:** Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP), Sociedade Avícola do Norte (SAVINOR), Laboratório associado para a Química Verde (LAQV/REQUIMTE)

**1-Instituição:** Curso de Ciências e Tecnologias, Escola Secundária da Maia

---

## Resumo

Com o aumento da poluição causada por plásticos à base de petróleo, existe uma preocupação cada vez maior em encontrar uma solução permanente. Estes polímeros são altamente resistentes à degradação natural, demorando até 500 anos para se tornar inócuo. Ao mesmo tempo, a indústria avícola é uma das maiores contribuidoras para as mudanças climáticas, emitindo até 600 milhões de toneladas por ano. Face a este problema, PlumaFilm visa criar um polímero à base de queratina, um composto naturalmente encontrado em penas, resistente e dúctil, para criar um substituto biodegradável e sustentável.

O estudo inicializou-se com a recolha de uma amostra de penas. Estas foram inicialmente separadas do material grosseiro (sólidos), por meio de catação, em seguida lavadas em água corrente, e secas numa estufa. Os resultados indicaram que o método que inclui a etapa de lavagem permite obter o composto de queratina com um maior grau de pureza, sendo por isso considerado o mais adequado para utilização nas futuras etapas do processo químico.

De seguida, procedeu-se à extração da queratina. As penas foram trituradas e uma solução de sulfureto de sódio foi adicionada. O resultante foi filtrado e centrifugado, aproveitando a parte sólida. Acrescentou-se sulfato de amónio com o intuito de coagular as proteínas dissolvidas, submetendo novamente a solução à centrifugadora. O sobrenadante foi purificado com NaOH, obtendo-se a queratina isolada.

Na sequência, foi elaborado o bioplástico. Através de uma preparação contendo amido de milho, ácido acético, glicerol e amido, e após submeter este preparado a uma temperatura amena com circulação de ar num forno, concretizou-se a formação de um material de características semelhantes a um plástico tradicional, no entanto mais sustentável. Isto demonstra a capacidade que os compostos naturais têm em permitir um futuro mais verde

**Palavras-chave:** Poluição por plásticos, Queratina, Biomateriais, Economia circular, Extração de proteínas, Plastificante, Inovação sustentável

# 1.Introdução

A pegada ambiental da indústria de processamento de aves é um dos desafios mais críticos da bioeconomia contemporânea, sendo acentuada pelo volume massivo de resíduos queratinosos gerados anualmente [4, 6]. As penas, que representam uma fração significativa do peso vivo das aves, são frequentemente destinadas a aterros sanitários ou submetidas a processos de incineração de baixa eficiência energética, o que resulta não só em perdas económicas substanciais, mas também em riscos severos de contaminação ambiental [5, 7, 8].

A escala do desperdício gerado pela indústria avícola é um dos indicadores mais alarmantes da ineficiência dos atuais modelos de produção linear. Estimativas mais abrangentes indicam que a produção global de resíduos derivados de penas pode atingir as 40 milhões de toneladas anuais [3, 4]. Este valor colossal reflete a expansão exponencial do consumo de carne de aves a nível mundial, onde as penas, representando cerca de 7% do peso do animal, se acumulam como um subproduto de baixa rotatividade comercial [3].

Este resíduo é particularmente problemático devido à sua estrutura física; embora individualmente leves, as penas em massa ocupam um volume considerável, sobrecarregando a capacidade dos aterros sanitários. Além disso, a sua degradação natural é extremamente lenta devido à proteção das pontes dissulfureto na queratina [1, 7]. Quando estas 40 milhões de toneladas são descartadas através da incineração ou deposição descontrolada, o impacto ambiental é duplo: desperdiça-se uma fonte nobre de biopolímeros e libertam-se contaminantes atmosféricos e lixiviados para o subsolo [5, 6].

O projeto **PlumaFilm** intervém precisamente nesta lacuna, propondo uma solução de escalabilidade global para converter este passivo ambiental massivo num recurso polimérico estratégico, desviando toneladas de biomassa de circuitos de poluição para circuitos de valor acrescentado [2, 5]. Ao contrário dos polímeros sintéticos de base fóssil, que persistem nos ecossistemas durante séculos e contribuem para a disseminação de microplásticos, a queratina oferece uma alternativa biopolimérica com biodegradabilidade intrínseca e propriedades renováveis [1, 2]. Neste sentido, a transição para materiais de base biológica e a valorização de subprodutos animais surgem como uma necessidade imperativa para reduzir a dependência global de hidrocarbonetos e mitigar a acumulação de resíduos sólidos persistentes em ecossistemas sensíveis [2, 6].

## 1.1. Objetivos

**-Valorização e Mitigação:** Converter as penas resultantes da produção de aves em biopolímeros, reduzindo a incineração e a dependência de plásticos fósseis.

**-Extração e Purificação:** Isolar a queratina através de processos químicos para obter uma matriz proteica pura e processável.

**-Desenvolvimento e Plastificação:** Sintetizar biofilmes por *casting* com incorporação de glicerol para transformar a rigidez da proteína em flexibilidade funcional.

**-Validação e Circularidade:** Caracterizar as propriedades físicas do PlumaFilm para viabilizar o *upcycling* de resíduos avícolas em embalagens biodegradáveis.

## 2. Materiais e Métodos

Inicialmente adquirimos a matéria-prima (**penas de aves**) (**Fig.1**), através da SAVINOR, tomando as devidas precauções de conservação, congelando-as num ambiente favorável à conservação dos compostos necessários ao nosso produto.

As etapas laboratoriais seguintes foram realizadas nos laboratórios da Escola Secundária da Maia e as restante na FCUP, onde foi possível proceder à formação de soluções necessárias aos processos de extração de queratina, bem como à trituração das penas.

Este projeto exigiu os compostos de sulfureto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ), sulfato de amónio ( $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$ ), hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), amido de milho, glicerol ( $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ ) e ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ). Todos estes compostos foram adquiridos comercialmente. Ainda, as penas de aves foram cedidas pela SAVINOR, uma empresa local, garantida a frescura da amostra.

Para quantificar a qualidade da extração da queratina através da espectrofotometria, utilizou-se o UV-3600, do qual resultou o gráfico UV-VIS representado pelo Gráfico 1.



Fig.1- Recolha da Matéria Prima

### 2.1. Limpeza e Desinfecção das Penas

A fase inicial do projeto PlumaFilm consistiu na preparação e descontaminação rigorosa das penas de aves, um passo crítico para assegurar a remoção de impurezas biológicas, sujidade particulada e lípidos superficiais que poderiam inibir a eficácia da extração da queratina ou comprometer a homogeneidade e transparência do bioplástico final.

O protocolo de higienização iniciou-se com uma lavagem tensoativa exaustiva (**Fig. 2**), utilizando uma solução de água e detergente neutro para proceder à emulsificação das gorduras naturais e à remoção de resíduos orgânicos aderidos às fibras.

Após esta etapa, a biomassa foi separada através de um processo de filtragem por coagem e submetida a enxaguamentos sucessivos com água destilada para a eliminação de vestígios de agentes tensoativos.

Seguiu-se uma etapa de desinfecção e desengorduramento profundo através da imersão das penas em álcool etílico 70% (**Fig.3**), garantindo a eliminação de microrganismos e de lípidos residuais insolúveis em água, o que permitiu a desidratação parcial das fibras e preparou a superfície para a reatividade química posterior.

Uma vez concluída a fase líquida, as penas foram novamente coadas e transferidas para tabuleiros de secagem, sendo posteriormente introduzidas numa estufa de circulação de ar forçado. O tratamento térmico foi mantido a uma temperatura constante de 60 °C durante um período de 4 horas, assegurando a remoção total de humidade e voláteis alcoólicos, resultando numa matéria-prima estéril, seca e quimicamente estabilizada para a fase de isolamento da proteína.



**Fig.2-** Lavagem tensoativa exaustiva



**Fig.3-** Desinfecção com o uso de etanol (70%)

## 2.2. Trituração da Biomassa

Concluída a secagem, as penas foram submetidas a um processo de fragmentação mecânica através de um moinho de lâminas.(**Fig 4,5**)

O objetivo central desta etapa não foi a obtenção de um pó impalpável, mas sim a desestruturação física das fibras e do ráquis (o eixo central rígido da pena), transformando a biomassa numa estrutura particulada de menores dimensões (**Fig. 4**).

Esta redução granulométrica é um passo estratégico na metodologia, pois permite um aumento exponencial da área de superfície específica do material exposta ao meio reacional.

Ao fragmentar as penas, eliminam-se as barreiras físicas naturais da queratina, facilitando a difusão e a penetração dos agentes químicos de hidrólise no interior das cadeias proteicas. Este incremento da área de contacto assegura que a reação química subsequente ocorra de forma mais célere e homogénea, otimizando a solubilização da queratina e garantindo um melhor rendimento na recuperação da massa proteica para a formação do bioplástico.



Fig.4- Produto Final Triturado



Fig.5- Processo de Trituração através de moinho

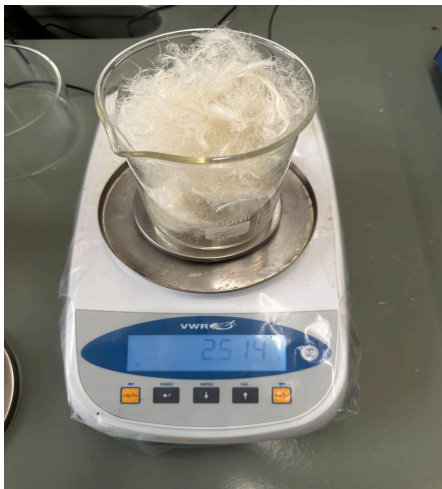
## 2.3 Extração da Queratina

A extração da queratina foi executada seguindo a metodologia proposta por Dhayanithi e Meenakshisundaram (2014), com adaptações procedimentais para otimizar o rendimento. O processo iniciou-se com a adição de 2.5 g da biomassa preparada a 50 mL de uma solução de sulfureto de sódio (0,50 mol/L). Esta mistura foi mantida sob agitação constante a uma temperatura de 30 °C durante um período de 24 horas, assegurando-se que o pH do meio reacional permanecesse no intervalo alcalino entre 10 e 13 para favorecer a separação proteica. Após a dissolução completa, a solução resultante foi filtrada e submetida a uma centrifugação a 3600 rpm durante 10 minutos, sendo o sobrenadante cuidadosamente recolhido para a obtenção da denominada "Solução A".

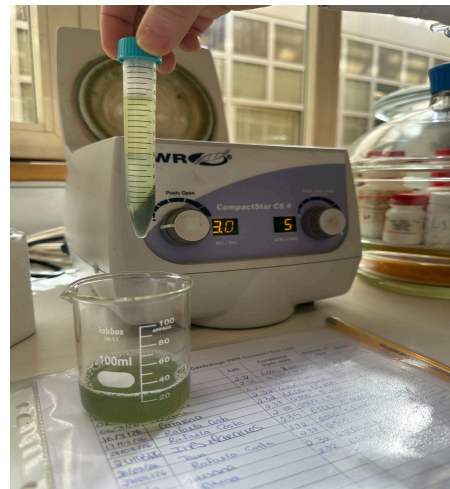
Para a etapa de isolamento da proteína, promoveu-se a precipitação por salinização (*salting-out*), utilizando uma solução saturada de sulfato de amónio. A "Solução A" foi combinada com a solução de sulfato de amónio numa razão de 1:1 (v/v), originando a "Solução B". Esta mistura foi novamente centrifugada a 3600 rpm por 10 minutos,

permitindo a colheita do precipitado sólido. Para maximizar a recuperação da queratina, o líquido sobrenadante foi submetido a ciclos adicionais de precipitação e centrifugação.

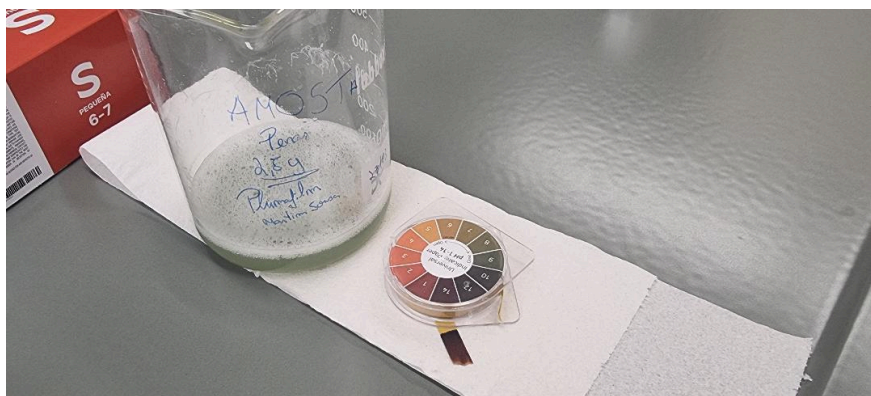
A fase final de purificação consistiu na lavagem do precipitado em 100 mL de água deionizada sob agitação, seguida de nova centrifugação para remoção de sais residuais (**Fig.7**). A fração sólida purificada foi então dissolvida em 100 mL de hidróxido de sódio (NaOH) 2 M. Através de uma separação de fases final, descartou-se qualquer resíduo sólido insolúvel, sendo a porção líquida purificada (**Fig.8**), contendo a queratina isolada,. Este ciclo de precipitação, lavagem e dissolução foi repetido por duas vezes para garantir a máxima pureza do biopolímero antes da sua utilização na síntese do PlumaFilm.



**Fig.6-** Massa inicial penas



**Fig.7-** Sólido precipitado após centrifugação



**Fig.8** Porção líquida purificada de queratina

Concluída a extração da queratina, foi realizada uma espectroscopia UV/VIS de modo a determinar a qualidade da nossa matéria-prima. Comparando a outros resultados [9], determinamos que a queratina foi obtida com sucesso.

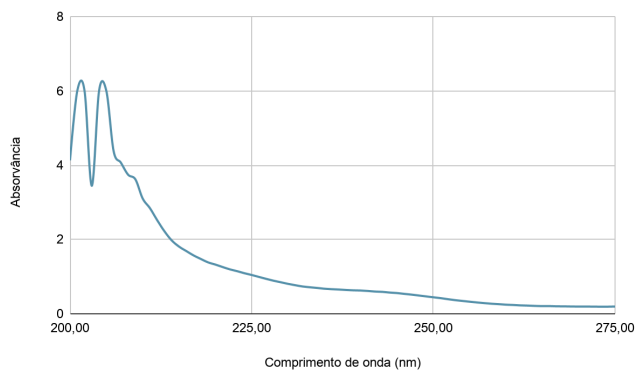


Gráfico 1 - Espectroscopia UV/visível da queratina extraída

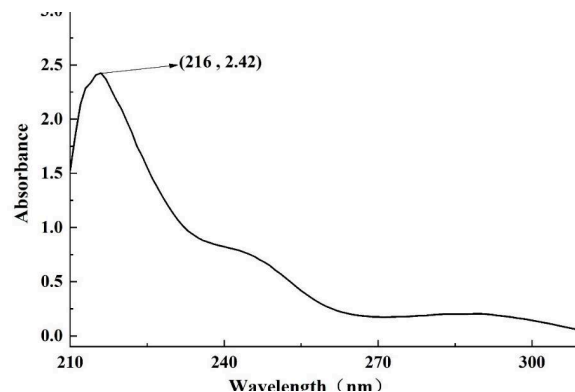


Gráfico 2 - Espectroscopia UV/visível de queratina (referência)

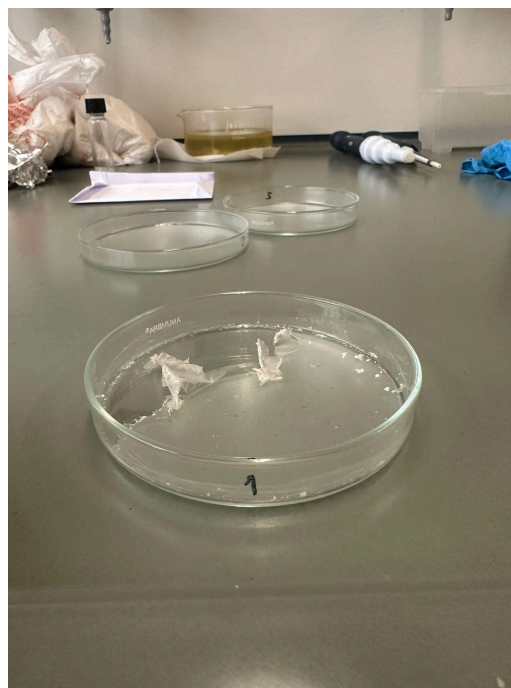
Deste modo, decidimos proceder a criação do bioplástico

## 2.4 Criação do bioplástico

Com base no procedimento realizado por Djeson Mateus Alves da Costa e Raniely Alves de Oliveira (2020), procedemos à preparação de uma solução de 100mL composta por 3g de amido de milho, 3,75g de ácido acético, 3,75g de glicerol e 2,5g de queratina, que corresponde a uma razão de 20% de queratina. A solução foi submetida a um aquecimento em banho Maria a cerca de 90°C, com leve agitação, durante cerca de 20 minutos, com o objetivo de homogenizar a solução. A solução foi posteriormente vertida sobre 3 caixas de Petri ( $\varnothing \approx 12$  cm) e colocadas num forno a 45°C durante 3 dias. Este processo foi repetido para uma solução-padrão, que não inclui a queratina. Num vertimento original, foi possível observar alguns “spots”, que demonstram que a homogenização poderá não ter tido sucesso, no entanto, estes não se revelaram no produto final. Resultou um filme bastante fino, difícil de retirar, de textura bastante semelhante ao celofane disponível comercialmente. Após cerca de 3 dias após retirarmos o material, observamos que ficou menos dúctil e mais rígido, divergindo da comparação inicial, mas ainda semelhante a outros plásticos comerciais. Observamos que muita da solução evaporou; ainda, como evaporou bastante da solução branco, tornando-a impossível de retirar [Fig. 10], determinamos que a queratina possui propriedades estruturais que dão caráter ao produto final [Fig. 9].



**Fig.9** Material obtido



**Fig.10** Solução branco

Numa segunda tentativa, decidimos preparar uma solução equivalente de menor volume (10 mL) e massas de amido de milho, ácido acético e glicerol proporcionais, no entanto alteramos a razão da queratina para 30%, e usamos material equipado com teflon, com o intuito de facilitar a extração do plástico.

A solução foi igualmente submetida a uma temperatura de cerca de 45°C, com circulação de ar, durante cerca de 5 dias. Foi possível observar de imediato que o teflon tornou a remoção do material do recipiente bastante mais fácil. O próprio revelou-se mais resistente, sendo possível induzir que um aumento da quantidade relativa de proteína remete para uma maior robustez. Comparando as massas final e inicial, confirma-se uma perda de cerca de 84% da massa original.

### **3. Conclusões**

Em conclusão, as atividades laboratoriais realizadas validaram com sucesso as etapas preliminares para o desenvolvimento de um biopolímero a partir de resíduos avícolas. Esta fase focou-se na preparação da biomassa e na estruturação dos meios reacionais, estabelecendo uma base técnica sólida para a extração da queratina, no âmbito de um modelo de economia circular e valorização de subprodutos.

O pré-tratamento da biomassa, incluindo a limpeza, desinfecção e trituração das penas, revelou-se essencial para garantir a remoção de impurezas e o aumento da área de superfície, fatores determinantes para a eficiência da hidrólise química. Este conjunto de procedimentos permitiu obter uma matéria-prima homogênea e reativa, adequada às etapas subsequentes.

A fase de extração da queratina, baseada na redução das pontes dissulfureto com sulfureto de sódio, mostrou-se eficaz, tendo sido possível isolar a fração proteica através de processos de filtração, centrifugação e precipitação por salinização.

Adicionalmente, os ciclos de purificação implementados contribuíram para a obtenção de uma solução de queratina com grau de pureza adequado, evidenciando a robustez do protocolo adotado. Estes resultados comprovam que a metodologia utilizada é funcional e passível de aplicação no contexto da valorização de biomassa residual.

Posteriormente, a fase de preparação do bioplástico também se demonstrou eficaz. Em comparação com a amostra sem o uso da queratina, foi possível observar a propriedade estrutural que esta oferece. O produto final revelou-se bastante dúctil e resistente, equivalente ao polietileno de baixa densidade, comumente utilizado em embalagens descartáveis. Embora existam vários aspectos a aprimorar, todos os resultados obtidos demonstraram o potencial que estes novos polímeros oferecem face a uma transição para materiais mais sustentáveis.

## 4. Trabalho Futuro

Com base nos protocolos de pré-tratamento estabelecidos, as etapas subsequentes do projeto focar-se-ão na transição da fase de preparação para a síntese efetiva do material, seguindo uma estratégia de otimização progressiva:

**Otimização da Extração Protéica:** O processo atual de extração envolve solventes bastante agressivos para o ambiente, e é bastante demorado. De modo a nos aproximar-nos aos objetivos de sustentabilidade que este projeto promove, temos como prioridade investigar novos solventes menos nocivos

**Otimização da plastificação:** A existência de vários compostos com propriedades plastificantes, como toda a família dos PEG's, permite que existam várias formulações, todas elas com propriedades diferentes. Assim, é de todo o interesse investigar e experimentar com diferentes quantidades de queratina, agente plastificante, entre outros, de modo a obter as propriedades desejadas para o plástico, conforme o objetivo.

**Análise Comparativa com Polímeros Convencionais:** De modo a quantificar as propriedades do material, temos como objetivo submeter o bioplástico a testes rigorosos de resistência, ductilidade e biodegradabilidade, para certificar a sua utilidade no uso quotidiano

**Escalação e Modulação de Formulações:** Visto o sucesso tido em pequena escala, o passo final seria o *scale-up* para um processo a nível industrial. Esta fase permitirá um estudo sistemático através da variação das proporções entre a queratina e o glicerol, permitindo descobrir e catalogar os diversos tipos de bioplásticos passíveis de serem produzidos, com diferentes graus de flexibilidade e rigidez.

Assim, prevemos que estas próximas etapas do projeto consigam validar o conceito do nosso bioplástico 100% sustentável e consolidar o potencial destes novos materiais como concorrentes diretos aos plásticos tradicionais.

## 5. Agradecimentos

Estendemos o nosso profundo reconhecimento principalmente à **Investigadora Doutora Fátima Mirante**, afetos ao Departamento de Química e Bioquímica da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e ao Laboratório Associado para a Química Verde. Agradecemos a sua imprescindível orientação científica, bem como a total disponibilidade e apoio técnico demonstrados ao longo do desenvolvimento deste projeto. A cedência de infraestruturas laboratoriais e de materiais específicos foi determinante para a viabilização das experiências, sendo o seu contributo académico fundamental para o rigor e sucesso deste trabalho.

Ao mesmo tempo, realçamos a importância que a SAVINOR teve na concretização desta ideia. O seu esforço em garantir a qualidade do material fornecido foi fundamental para o sucesso do projeto.

Manifestamos igualmente o nosso profundo agradecimento à **Professora Isabel Allen**, docente de Química da Escola Secundária da Maia, pelo incentivo constante e pela orientação dedicada ao longo de todo o processo de desenvolvimento. O seu acompanhamento pedagógico e científico foi o pilar fundamental que motivou a equipa e tornou possível a concretização e o rigor deste trabalho.

## 6. Referências Bibliográficas

1. Bioresource Technology. (s.d.). *Sustainable applications of keratin waste in the polymer industry*. Elsevier. <https://www.journals.elsevier.com/bioresource-technology>
2. European Circular Economy Stakeholder Platform. (s.d.). *Valorisation of poultry feathers into high-added-value products*. <https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/news-and-events/all-news/valorisation-poultry-feathers>
3. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s.d.). *Global poultry production and waste statistics*. <https://www.fao.org/poultry-production-flu/en/>
4. Global Market Insights. (s.d.). *Poultry waste management market: Analysis of keratinous waste and poultry by-products*. <https://www.gminights.com/poultry-waste-management-market>

5. Journal of Cleaner Production. (s.d.). *Environmental impact of poultry waste management strategies*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-cleaner-production>
6. Journal of Material Cycles and Waste Management. (s.d.). *Global perspective on the management of poultry feathers*. Springer. <https://link.springer.com/journal/10163>
7. Waste Management & Research. (s.d.). *Sustainable recovery of keratin from feather waste*. SAGE Journals. <https://journals.sagepub.com/home/wmr>
8. MacLeod, M., Gerber, P., Mottet, A., Tempio, G., Falcucci, A., Opio, C., Vellinga, T., Henderson, B., & Steinfeld, H. (2013). *Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains*. The Poultry Site. <https://www.thepoultrysite.com/articles/greenhouse-gas-emissions-from-pig-and-chicken-supply-chains>
9. El-Rafie, M. H., Hebeish, A., & El-Kalliny, A. S. (2021). *Extraction and characterization of keratin and keratin hydrogels from wasted rabbit hair*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1790(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1790/1/012008>