



REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTES A PARTIR DE HIDRÓLISE BIOLÓGICA DE RESÍDUOS DE PENAS DE FRANGO

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA: PRODUCCIÓN DE BIOFERTILIZANTES A PARTIR DE LA HIDRÓLISIS BIOLÓGICA DE RESIDUOS DE PLUMAS DE POLLO

LITERATURE REVIEW: PRODUCTION OF BIOFERTILIZERS FROM BIOLOGICAL HYDROLYSIS OF POULTRY FEATHER RESIDUES

Leandro Pellenz¹; Patrícia Viera de Oliveira²; Carlos Rafael Silva de Oliveira³ Lisandro Simão⁴; Afonso Henrique da Silva Júnior⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/IIICIAGRO.0032>

RESUMO

Grandes quantidades de resíduos queratinosos são geradas anualmente por indústrias frigoríficas e, devido a sua recalcitrância, a destinação final destes resíduos representa um desafio ambiental. Dentre estes, as penas de frangos possuem grande relevância, sendo compostas em grande parte de queratina, que é uma proteína de difícil degradação, mas quando hidrolisada, pode ser uma boa fonte de peptídeos, aminoácidos e minerais. Os métodos tradicionais de hidrólise, como hidrotérmico e químico, demandam grandes quantidades de energia e reagentes não ambientalmente adequados, além de reduzirem a quantidade de aminoácidos e proteínas aproveitáveis. Por outro lado, o tratamento biológico destes resíduos utilizando microrganismos queratinolíticos, além de ser ambientalmente mais favorável, tem potencial para produção de subprodutos de valor, com aplicações em suplementos para alimentação animal, biocombustíveis, meios de cultura, cosméticos, biofertilizantes, entre outros. Os fertilizantes a base penas biologicamente hidrolisadas possuem aminoácidos, proteínas solúveis e peptídeos em sua composição, que promovem o crescimento da microbiota do solo, aumentando a absorção e utilização de nutrientes. Além disso, a presença destes hidrolisados aumenta a relação C/N do solo, teor de minerais e sua capacidade de reter água, tendo bom potencial de aplicação agrícola, especialmente em sistemas orgânicos. Devido a isso e tendo em vista a elevada e crescente demanda por fertilizantes agrícolas, além o fato de que o uso exacerbado de fertilizantes convencionais pode causar impactos negativos ao meio

¹ Engenheiro Ambiental e Sanitarista, Mestre em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis (Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS), Doutorando em Engenharia Química (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), leandropellenz@hotmail.com

² Engenheira Química, Mestre em Nanociências (Universidade Franciscana), Doutoranda em Engenharia Química (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), p.v.oliveira@posgrad.ufsc.br

³ Engenheiro Têxtil (Universidade Estadual de Maringá – UEM), Doutor em Engenharia Química (UFSC), carlos.oliveira@ufsc.br;

⁴ Engenheiro Ambiental e Sanitarista (Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC), Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais (Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC), lisandrosimao@gmail.com;

⁵ Engenheiro Agroindustrial-Agroquímico (Universidade Federal do Rio Grande – FURG), Mestre em Engenharia Química, Doutorando em Engenharia Química (Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC), afonso.silva@posgrad.ufsc.br;

ambiente, os biofertilizantes a base de hidrolisados de penas se apresentam como uma alternativa interessante. Neste contexto, objetivo desta revisão é apresentar e discutir os principais estudos recentes abordando conversão biológica de resíduos de penas em biofertilizantes com potenciais aplicações em sistemas ecologicamente sustentáveis de produção agrícola.

Palavras-Chave: Biofertilizante, Avicultura, Penas, Hidrólise biológica, Queratina.

RESUMEN

Las industrias frigoríficas generan anualmente grandes cantidades de residuos queratinosos y, debido a su obstinación, el destino final de estos residuos representa un reto medioambiental. Entre estas, las plumas de pollo tienen gran relevancia, al estar compuestas en gran parte por queratina, que es una proteína difícil de degradar, pero que al hidrolizarse puede ser una buena fuente de péptidos, aminoácidos y minerales. Los métodos tradicionales de hidrólisis, como la hidrotermal y la química, demandan grandes cantidades de energía y reactivos ambientalmente inadecuados, además de reducir la cantidad de aminoácidos y proteínas utilizables. Por otro lado, el tratamiento biológico de estos residuos mediante microorganismos queratinolíticos, además de ser más amigable con el medio ambiente, tiene el potencial de producir subproductos valiosos, con aplicaciones en suplementos para la alimentación animal, biocombustibles, medios de cultivo, cosméticos, biofertilizantes, entre otros. Los fertilizantes biológicamente hidrolizados a base de plumas tienen en su composición aminoácidos, proteínas solubles y péptidos, que favorecen el crecimiento del microbiota del suelo, aumentando la absorción y utilización de nutrientes. Además, la presencia de estos hidrolizados aumenta la relación C/N del suelo, el contenido de minerales y su capacidad para retener agua, teniendo un buen potencial de aplicación agrícola, especialmente en sistemas orgánicos. Debido a esto y ante la alta y creciente demanda de fertilizantes agrícolas, además de que el uso exacerbado de fertilizantes convencionales puede causar impactos negativos en el medio ambiente, los biofertilizantes a base de hidrolizados de plumas se presentan como una interesante alternativa. En este contexto, el objetivo de esta revisión es presentar y discutir los principales estudios recientes que abordan la conversión biológica de residuos de plumas en biofertilizantes con aplicaciones potenciales en sistemas de producción agrícola ecológicamente sostenibles.

Palabras Clave: Biofertilizante, Avicultura, Plumass, Hidrólisis biológica, Queratina.

ABSTRACT

Large amounts of keratinous waste are generated annually by poultry industries and, due to its recalcitrance, the final destination of these residues represents an environmental challenge. Among these, chicken feathers have great relevance, being composed largely of keratin, which is a protein of difficult degradation, but when hydrolyzed, it can be a good source of peptides, amino acids and minerals. Traditional hydrolysis methods, such as hydrothermal and chemical, demand large amounts of energy and environmentally unsuitable reagents, in addition to reducing the amount of usable amino acids and proteins. On the other hand, the biological treatment of these residues using keratinolytic microorganisms, besides being environmentally more friendly, has the potential to produce valuable by-products, with applications in animal feed supplements, biofuels, culture media, cosmetics, biofertilizers, among others. Biologically hydrolyzed feather-based fertilizers have amino acids, and soluble proteins and peptides in their composition, which promote the growth of soil microbiota, increasing the absorption and utilization of nutrients. In addition, the presence of these hydrolysates increases the soil C/N ratio, mineral content and its ability to retain water, having good potential for agricultural application, especially in organic systems. Due to this and in face of the high and growing demand for agricultural fertilizers, in addition to the fact that the exacerbated use of conventional fertilizers may cause negative impacts on the environment, biofertilizers based on feather hydrolysates arise as an interesting alternative. In this context, the aim of this review is to present and discuss the main recent studies addressing biological conversion of feather residues into biofertilizers with potential applications in ecologically sustainable agricultural production systems.

Keywords: Biofertilizer, Poultry, Feathers, Biological hydrolysis, Keratin.

INTRODUÇÃO

A indústria aviária tem apresentado uma grande expansão no mundo nos últimos anos, sendo que o Brasil é o segundo maior produtor – com 14,5 milhões de toneladas em 2021 – e o maior exportador de carne de frango do mundo (USDA FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE, 2022). Entretanto, essa indústria gera imensas quantidades de resíduos, com destaque para os grandes volumes de penas, que são materiais queratinosos que precisam ser adequadamente gerenciados para não causarem impactos ambientais. Por serem compostas majoritariamente de proteínas estruturais de difícil degradação, denominadas queratinas, as penas de frango representam um desafio para sua gestão como resíduo (BHARI; KAUR; SARUP SINGH, 2021; BRANDELLI; DAROIT; RIFFEL, 2010).

A queratina é um proteína rica em aminoácidos essenciais, minerais e peptídeos, que podem ter várias aplicações, tais como na suplementação de alimentação animal e como biofertilizantes (VERMA *et al.*, 2016). No entanto, devido a sua grande estabilidade e insolubilidade destas proteínas, se faz necessário um tratamento hidrólise antes de sua aplicação na indústria. Métodos termoquímicos são convencionalmente utilizados para hidrólise de queratinas, entretanto, além de caros e ambientalmente desfavoráveis, promovem a quebra de proteínas importantes e a destruição de grandes quantidades de aminoácidos, representando uma perda de potenciais fontes de renda (CALLEGARO; BRANDELLI; DAROIT, 2019). Desta forma, a hidrólise biológica surge com uma alternativa relevante de valorização de resíduos queratinosos. Alguns microrganismos, denominados queratinolíticos, são capazes de metabolizar resíduos de penas, utilizando-os como fontes de carbono, nitrogênio, enxofre e energia, produzindo subprodutos de valor, como biofertilizantes (GUPTA; RAMNANI, 2006). Neste contexto, este trabalho de revisão apresenta uma abordagem acerca da possibilidade de agregar valor à resíduos de penas de frango através da utilização de hidrolisados biológicos como fertilizantes agrícolas.

METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho de revisão ocorreu através de pesquisa bibliográfica de artigos científicos originais e de revisão nas bases de dados Scopus e Google Scholar, utilizando as palavras-chave penas de frango, penas de aves, resíduos de penas, hidrólise microbiana,

hidrolisados microbianos, queratina, fertilizantes e biofertilizantes. A pesquisa foi realizada na língua inglesa, buscando informações relevantes e atualizadas de acordo com a disponibilidade, porém sem período específico, acerca dos tópicos do escopo deste trabalho.

DESENVOLVIMENTO

PENAS DE FRANGO

As queratinas são proteínas estruturais caracterizadas por sua alta resistência, maleabilidade e impermeabilidade à água, e compõem cerca de 90% da estrutura das penas (GUPTA; RAMNANI, 2006). Suas características de estabilidade, insolubilidade e grande resistência a degradação proteolítica por proteases comuns ocorrem devido ao empacotamento compacto das cadeias proteicas em estruturas de α -hélice (α -queratina) ou β -folhas (β -queratina), e ao elevado nível de enovelamento da cadeia polipeptídica. Além disso, as queratinas possuem uma grande quantidade de ligações inter e intra-cadeia na cadeia polipeptídica por meio de interações hidrofóbicas, pontes de hidrogênio e ligações dissulfeto (BRANDELLI; DAROIT; RIFFEL, 2010). A composição química de penas de frango varia com a alimentação, idade, raça e ambiente em que a ave se encontra, mas tipicamente exibe uma grande quantidade de aminoácidos (MARTINEZ-HERNANDEZ *et al.*, 2005). Constituídas principalmente de carbono, nitrogênio, enxofre e hidrogênio, as penas de frango também contêm importantes micro e macronutrientes, como potássio, fósforo, zinco, cálcio, ferro, magnésio, manganês, sódio e cobre (NURDIAWATI *et al.*, 2018).

GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE PENAS

O gerenciamento de resíduos de penas de frangos pode ser conduzido de duas maneiras. A disposição final sem tratamento/valorização é a forma mais simples, no entanto apresenta desvantagens relevantes. Já o tratamento por hidrólise, embora seja mais complexo, propicia um destino final ambientalmente mais adequado a estes resíduos, além de produzir subprodutos com valor agregado (CHATURVEDI; AGRAWAL; VERMA, 2021).

Um dos métodos mais antigos de disposição final de resíduos de penas é a incineração, no entanto possui um gasto energético e pode gerar emissão de poluentes tóxicos ao meio ambiente (SHARMA; GUPTA, 2016). A disposição de resíduos de penas em aterros também é uma alternativa amplamente utilizada, porém, este método gera gases que contribuem com o efeito

estufa e um efluente de lixiviação que precisa ser cuidadosamente gerenciado para não causar danos ao meio ambiente (SINGH *et al.*, 2016). Além disso, se os aterros não forem corretamente geridos, podem ser focos de proliferação de patógenos virais, bacterianos e parasitários (CAMARGO; ALONSO, 2006). A compostagem com digestão aeróbia, e a digestão anaeróbia, também são alternativas convencionais para a gestão de resíduos de pena, produzindo fertilizante e biogás, respectivamente. No entanto, devido a estrutura complexa destes resíduos, estes métodos ainda apresentam limitações relacionadas a qualidade dos subprodutos, custos e potenciais riscos ambientais (BHARI; KAUR; SARUP SINGH, 2021).

Quando se opta pela hidrólise de resíduos de penas, existem os métodos químicos, hidrotérmicos e biológicos. Os métodos químicos consistem na utilização de solventes ácidos, alcalinos ou orgânicos para realizar a hidrólise das queratinas e obter aminoácidos e proteínas solúveis (STIBOROVA *et al.*, 2016). Porém, os subprodutos hidrolisados por este método, além de demandarem o uso de reagentes não ambientalmente amigáveis, possuem algumas limitações como baixo valor biológico, falta de aminoácidos essenciais e baixa digestibilidade (BHARI; KAUR; SARUP SINGH, 2021). Os métodos hidrotérmicos consistem na aplicação de altas pressões e temperaturas na presença de vapor visando hidrolisar a queratina das penas. No entanto estes métodos possuem um consumo energético elevado, e resultam majoritariamente em aminoácidos não nutritivos (EL BOUSHY; VAN DER POEL; WALRAVEN, 1990). Já a hidrólise biológica com microrganismos específicos se apresenta como um dos métodos mais promissores de tratamento de resíduos de penas e tem despertado crescente interesse de pesquisadores devido a qualidade dos seus subprodutos e condições favoráveis de operação (CALLEGARO; BRANDELLI; DAROIT, 2019).

HIDRÓLISE BIOLÓGICA

Microrganismos possuem um papel fundamental na grande maioria dos processos de degradação que ocorrem no meio ambiente, inclusive para materiais queratinosos (GUPTA; RAMNANI, 2006). Para estes materiais, alguns tipos de bactérias e fungos produzem enzimas denominadas queratinases, que fazem a hidrólise de queratinas permitindo sua utilização por parte do microrganismo como fonte de carbono, nitrogênio, enxofre e energia (BRANDELLI, 2008). Além da degradação em sistemas biológicos, as queratinases podem ser isoladas para utilização na hidrólise enzimática de resíduos de penas, sem presença do microrganismo. Os processos de hidrólise enzimática de queratinas são considerados promissores por terem um

baixo consumo energético e produzirem subprodutos de alta qualidade, com aplicações em suplementos para alimentação animal, biocombustíveis, meios de cultura, cosméticos e biofertilizantes (CALLEGARO; BRANDELLI; DAROIT, 2019; CHATURVEDI; AGRAWAL; VERMA, 2021).

APLICAÇÃO DE HIDROLISADOS COMO FERTILIZANTES

O crescimento populacional e o aumento dos padrões de consumo das pessoas têm levado a um aumento significativo na demanda de commodities agrícolas nas últimas décadas, especialmente grãos. O suprimento desta demanda só se tornou possível devido a um drástico aumento na produtividade, promovido em grande parte pelo uso de fertilizantes sintéticos (CHATURVEDI; AGRAWAL; VERMA, 2021). No entanto, embora benéficos para a segurança alimentar da humanidade, estes fertilizantes também trouxeram efeitos negativos, como poluição das águas, eutrofização, acidificação ou alcalinização aguda do solo, além de redução da qualidade e danos a microflora do solo (LIU *et al.*, 2016). Neste contexto, a utilização de fertilizantes orgânicos se apresenta como a principal alternativa, por utilizar produtos de baixo impacto ambiental, desde a sua produção até aplicação no solo e/ou plantas. Além disso, em muitos casos, fertilizantes orgânicos são provenientes de resíduos, promovendo a valorização destes e reduzindo custos e impactos da sua disposição no meio ambiente (CHEW *et al.*, 2019).

As penas de frango possuem aproximadamente 15% de nitrogênio em sua composição, que é o principal nutriente limitante para o crescimento de plantas. Porém, devido a recalcitrância das queratinas, sua utilização direta em solo como fertilizantes se torna inviável (THURIÈS *et al.*, 2001). Para contornar esta limitação, a utilização de hidrolisados biológicos de penas tem se mostrado promissora e uma série de pesquisas sobre o seu potencial como biofertilizantes vem sendo desenvolvida, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 01: Aplicações de hidrolisados biológicos como fertilizantes.

Microrganismo	Forma de aplicação	Resultados	Referência
<i>Stenotrophomonas maltophilia DHHJ</i>	Foliar	Aumento do crescimento de couve chinesa em relação a controles sem fertilização	(CAO <i>et al.</i> , 2012)

Microrganismo	Forma de aplicação	Resultados	Referência
Bacillus polymyxa B20	Foliar	Teores de clorofila foliar e massa fresca em tomateiro, pepineiro e repolho-branco similares a controles com fertilização de referência	(KUCINSKA <i>et al.</i> , 2014)
Chryseobacterium sp. RBT	Solo e foliar	Aceleração da floração, colheita e maior rendimento de frutos de bananeira em relação a controles sem fertilização	(GURAV; JADHAV, 2013)
Paenibacillus woosongensis TKB2	Solo	Aumento da germinação, massa fresca e seca de raízes de grão de bico em relação a que controles sem fertilização	(PAUL <i>et al.</i> , 2013)
Bacillus amyloliquefaciens 6B	Solo	Aumento da germinação e crescimento de feijão-mungo em relação a controles sem fertilização e valores similares em relação a fertilização de referência	(BOSE <i>et al.</i> , 2014)
Streptomyces sampsonii GS 1322	Solo	Aumento da germinação e crescimento de trigo em relação a controles sem fertilização	(JAIN <i>et al.</i> , 2016)
Thermoactinomyces sp. RM4	Solo	Aumento da germinação, massa fresca e seca de raízes de grão de bico em relação a controles sem fertilização	(VERMA <i>et al.</i> , 2016)
Amycolatopsis sp. MBRL 40	Solo	Crescimento e massa seca de arroz similares aos observados com fertilização de referência	(TAMREIHAO <i>et al.</i> , 2017)
Aspergillus niger	Solo	Aumento no crescimento e rendimento de plantas de feijão-caupi em relação a controles sem fertilização	(ADETUNJI <i>et al.</i> , 2012)
Bacillus pumilis KHS-1	Solo	Crescimento e massa seca de cenoura e couve chinesa similares a controle com fertilização de referência	(KIM; CHOI; SUH, 2005)

Microrganismo	Forma de aplicação	Resultados	Referência
Thermoactinomyces spp. 3H, 8H e M4	Solo	Aumento de germinação e crescimento de azevém superiores a controle sem fertilização	(GOUSTEROVA <i>et al.</i> , 2011)
Bacillus licheniformis ASU	Solo	Maior crescimento e massa seca em fava em relação a controles sem fertilização	(NAFADY <i>et al.</i> , 2018)
Bacillus sp. CL18	Solo	Aumento do crescimento e produção de biomassa de alface em comparação com fertilizante de referência e outros subprodutos da indústria aviária	(SOBUCKI <i>et al.</i> , 2019)

Microrganismo	Forma de aplicação	Resultados	Referência
Bacillus aerius NSMk2	Solo	Aumento da germinação e crescimento e produtividade de feijão-mungo em comparação com fertilização de referência	(KAUR; BHARI; SINGH, 2021)

Fonte: Própria (2022).

A baixa relação carbono/nitrogênio (C/N) de hidrolisados biológicos permite rápida mineralização nitrogênio orgânico pela microbiota do solo, tornando-o disponível para as plantas (CALLEGARO; BRANDELLI; DAROIT, 2019; NURDIAWATI *et al.*, 2019). As plantas também podem absorver peptídeos e aminoácidos importantes fornecidos pelos hidrolisados, através das folhas ou raízes, utilizando-os no seu crescimento (COLLA *et al.*, 2015). Estudos identificaram a presença dos aminoácidos alanina, arginina, ácido aspártico, cisteína, glutamato, glicina, histidina, isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina, prolina, serina, treonina, triptofano, tirosina e valina em hidrolisados microbianos, em diferentes teores, variando de acordo com o substrato e microrganismo utilizado (BHARI; KAUR; SARUP SINGH, 2021). Os aminoácidos são de fundamental importância para os mais diversos processos vegetais. Alanina contribui com a resistência contra vírus e mudanças de clima, além de estimular o metabolismo de hormônios (DIAB; LIMAMI, 2016; PALECKIENE; SVIKLAS; ŠLINKŠIENE, 2007). A arginina participa da divisão celular, auxilia na maturação e germinação de sementes, estimula a produção de clorofila e é utilizada para o transporte e armazenagem de nitrogênio (PALECKIENE; SVIKLAS; ŠLINKŠIENE, 2007; WINTER *et al.*, 2015). A cisteína é utilizada pelas plantas na síntese de proteínas, auxilia na resposta imune e resistência a baixas temperaturas (ÁLVAREZ *et al.*, 2012; BONNER *et al.*, 2005). O glutamato é utilizado na regulação do pH e osmolaridade, defesa contra insetos e como reserva de nitrogênio orgânico (FORDE; LEA, 2007). A glicina atua na regulação osmótica e melhora resistência ao stress abiótico das plantas (ASHRAF; FOOLAD, 2007; HUANG *et al.*, 2000). A histidina promove o transporte de íons metálicos como quelante, além de melhorar a resistência das plantas contra patógenos bacterianos e auxiliar na reprodução e crescimento (SEO *et al.*, 2016; STEPANSKY; LEUSTEK, 2006). A isoleucina e metionina atuam como agentes antiestresse (JOSHI *et al.*, 2010). A lisina promove imunidade nas plantas (NÁVAROVÁ *et al.*, 2012). A fenilalanina reduz o estresse oxidativo e regula produção de

lignina e tecidos lenhosos (GILL; TUTEJA, 2010). A prolina atua como agente antiestresse, no desenvolvimento de paredes celulares, crescimento de raízes e flores, aumenta a fertilidade do pólen e atua no transporte de nitrogênio (GOTHANDAM *et al.*, 2010; KAVI KISHOR *et al.*, 2015; LIANG *et al.*, 2013). A serina regula a fotorrespiração e o stress biótico e abiótico das plantas (ROS; MUÑOZ-BERTOMEU; KRUEGER, 2014; TIMM *et al.*, 2013). A treonina estimula a germinação e atua no combate ao estresse vegetal (JOSHI *et al.*, 2010). O triptofano é utilizado por microrganismos para produção de ácido indolacético, um hormônio que promove o alongamento celular e crescimento das plantas (BHANGE; CHATURVEDI; BHATT, 2016). A valina é um precursor das auxinas, que são hormônios de regulação de crescimento vegetal (WADITEE *et al.*, 2007). Autores também reportaram os hidrolisados microbianos podem conter sideróforos, ácidos que promovem a solubilização de fosfato insolúvel, permitindo o seu uso pelas plantas (PAUL *et al.*, 2013). Além de nitrogênio, peptídeos e aminoácidos, os hidrolisados biológicos também podem fornecer diretamente macro e micronutrientes importantes para as plantas, como fósforo, potássio, zinco, ferro, manganês, cálcio e cobre (GURAV; JADHAV, 2013; KSHETRI *et al.*, 2019; NURDIAWATI *et al.*, 2018).

A aplicação de hidrolisados microbianos como biofertilizantes em plantas pode ser realizada por via foliar ou em solo. Uma série de resultados positivos nas culturas a partir do uso destes fertilizantes em comparação com fertilização de referência é reportada na literatura, incluindo aceleração do crescimento e floração, aumento da massa fresca e massa seca das plantas, aumento dos teores de clorofila foliar, aumento de germinação e aumento de produtividade (Tabela 1).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resíduos de penas frango ainda são bastante negligenciados em relação ao seu potencial para agregação de valor. A literatura acerca do tema demonstra que existem diversas potencias aplicações para estes resíduos, especialmente para hidrolisados microbianos como fertilizantes agrícolas. Em paralelo a isso, para atender as demandas de alimentos da população global, a demanda por fertilizantes agrícolas é extremamente elevada, sendo que uso excessivo de fertilizantes convencionais pode causar danos ao solo e ao meio ambiente em geral.

A maioria dos estudos relacionados ao uso de hidrolisados biológicos de penas de frango como fertilizantes ainda apresenta resultados de estágios iniciais, com produção em laboratórios e

testes em pequenas escalas. Além disso, até o momento, existe um número relativamente pequeno de microrganismos identificados como capazes de degradar resíduos queratinosos, e em muitos casos estes processos ainda são relativamente lentos. Neste contexto, ainda há um caminho significativo a ser percorrido neste tema, com o desenvolvimento de técnicas bioconversão em larga escala de resíduos de penas e transformação dos hidrolisados em biofertilizantes com aplicabilidade real na agricultura.

REFERÊNCIAS

- ADETUNJI, C O *et al.* Production and application of keratin-based organic fertilizer from microbially hydrolyzed feathers to cowpea (*Vigna unguiculata*). **International Journal of Scientific & Engineering Research**, [s. l.], v. 3, n. 12, p. 1–9, 2012.
- ÁLVAREZ, Consolación *et al.* Cysteine homeostasis plays an essential role in plant immunity. **New Phytologist**, [s. l.], v. 193, n. 1, p. 165–177, 2012.
- ASHRAF, MFMR; FOOLAD, Majid R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. **Environmental and experimental botany**, [s. l.], v. 59, n. 2, p. 206–216, 2007.
- BHANGE, Khushboo; CHATURVEDI, Venkatesh; BHATT, Renu. Ameliorating effects of chicken feathers in plant growth promotion activity by a keratinolytic strain of *Bacillus subtilis* PF1. **Bioresources and Bioprocessing**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 13, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40643-016-0091-y>
- BHARI, Ranjeeta; KAUR, Manpreet; SARUP SINGH, Ram. Chicken Feather Waste Hydrolysate as a Superior Biofertilizer in Agroindustry. **Current Microbiology**, [s. l.], v. 78, n. 6, p. 2212–2230, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00284-021-02491-z>
- BONNER, Eric R *et al.* Molecular basis of cysteine biosynthesis in plants: structural and functional analysis of O-acetylserine sulfhydrylase from *Arabidopsis thaliana*. **Journal of Biological Chemistry**, [s. l.], v. 280, n. 46, p. 38803–38813, 2005.
- BOSE, Anjali *et al.* Keratinolytic Protease Production by *Bacillus amyloliquefaciens* 6B Using Feather Meal as Substrate and Application of Feather Hydrolysate as Organic Nitrogen Input for Agricultural Soil. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 595–605, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9272-5>
- BRANDELLI, Adriano. Bacterial Keratinases: Useful Enzymes for Bioprocessing Agroindustrial Wastes and Beyond. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 1, n. 2, p.

105–116, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11947-007-0025-y>

BRANDELLI, Adriano; DAROIT, Daniel J; RIFFEL, Alessandro. Biochemical features of microbial keratinases and their production and applications. **Applied microbiology and biotechnology**, [s. l.], v. 85, n. 6, p. 1735–1750, 2010.

CALLEGARO, Kelly; BRANDELLI, Adriano; DAROIT, Daniel Joner. Beyond plucking: Feathers bioprocessing into valuable protein hydrolysates. **Waste Management**, [s. l.], v. 95, p. 399–415, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.040>

CAMARGO, Julio A; ALONSO, Álvaro. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. **Environment International**, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 831–849, 2006. Disponível em:

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.05.002>

CAO, Zhang-Jun *et al.* Composition analysis and application of degradation products of whole feathers through a large scale of fermentation. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 19, n. 7, p. 2690–2696, 2012. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s11356-012-0763-x>

CHATURVEDI, Venkatesh; AGRAWAL, Komal; VERMA, Pradeep. Chicken feathers: a treasure cove of useful metabolites and value-added products. **Environmental Sustainability**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 231–243, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00160-2>

CHEW, Kit W *et al.* **Transformation of Biomass Waste into Sustainable Organic Fertilizers**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11082266>

COLLA, Giuseppe *et al.* Protein hydrolysates as biostimulants in horticulture. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 196, p. 28–38, 2015. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.037>

DIAB, Houssein; LIMAMI, Anis M. **Reconfiguration of N Metabolism upon Hypoxia Stress and Recovery: Roles of Alanine Aminotransferase (AlaAT) and Glutamate Dehydrogenase (GDH)**. [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants5020025>

EL BOUSHY, A R; VAN DER POEL, A F B; WALRAVEN, O E D. Feather meal—A biological waste: Its processing and utilization as a feedstuff for poultry. **Biological Wastes**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 39–74, 1990. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0269->

7483(90)90071-Y

FORDE, Brian G; LEA, Peter J. Glutamate in plants: metabolism, regulation, and signalling.

Journal of experimental botany, [s. l.], v. 58, n. 9, p. 2339–2358, 2007.

GILL, Sarvajeet Singh; TUTEJA, Narendra. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant physiology and biochemistry**, [s. l.], v. 48, n. 12, p. 909–930, 2010.

GOTHANDAM, Kodiveri Muthukalianan *et al.* OsPRP3, a flower specific proline-rich protein of rice, determines extracellular matrix structure of floral organs and its overexpression confers cold-tolerance. **Plant Molecular Biology**, [s. l.], v. 72, n. 1, p. 125–135, 2010.

GOUSTEROVA, A *et al.* Assessment of feather hydrolysate from thermophilic actinomycetes for soil amendment and biological control application. **International Journal of Environmental Research**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 1065–1070, 2011.

GUPTA, Rani; RAMNANI, Priya. Microbial keratinases and their prospective applications: an overview. **Applied microbiology and biotechnology**, [s. l.], v. 70, n. 1, p. 21–33, 2006.

GURAV, Ranjit G; JADHAV, Jyoti P. A novel source of biofertilizer from feather biomass for banana cultivation. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 20, n. 7, p. 4532–4539, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1405-z>

HUANG, Jun *et al.* Genetic engineering of glycinebetaine production toward enhancing stress tolerance in plants: metabolic limitations. **Plant physiology**, [s. l.], v. 122, n. 3, p. 747–756, 2000.

JAIN, Richa *et al.* Feather hydrolysate from *Streptomyces sampsonii* GS 1322: A potential low cost soil amendment. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, [s. l.], v. 121, n. 6, p. 672–677, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2015.11.003>

JOSHI, Vijay *et al.* Interdependence of threonine, methionine and isoleucine metabolism in plants: accumulation and transcriptional regulation under abiotic stress. **Amino acids**, [s. l.], v. 39, n. 4, p. 933–947, 2010.

KAUR, Manpreet; BHARI, Ranjeeta; SINGH, Ram Sarup. Chicken feather waste-derived protein hydrolysate as a potential biostimulant for cultivation of mung beans. **Biologia**, [s. l.], v. 76, n. 6, p. 1807–1815, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00724-x>

KAVI KISHOR, Polavarapu B *et al.* Role of proline in cell wall synthesis and plant development and its implications in plant ontogeny. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 6,

p. 544, 2015.

KIM, Jin-Man; CHOI, Yang-Mun; SUH, Hyung-Joo. Preparation of feather digests as fertilizer with *Bacillus pumilis* KHS-1. **Journal of microbiology and biotechnology**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 472–476, 2005.

KSHETRI, Pintubala *et al.* Transforming Chicken Feather Waste into Feather Protein Hydrolysate Using a Newly Isolated Multifaceted Keratinolytic Bacterium *Chryseobacterium sediminis* RCM-SSR-7. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 1–11, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0037-4>

KUCINSKA, Jolanta K *et al.* Bioefficacy of Hen Feather Keratin Hydrolysate and Compost on Vegetable Plant Growth. **Compost Science & Utilization**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 179–187, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1065657X.2014.918866>

LIANG, Xinwen *et al.* Proline mechanisms of stress survival. **Antioxidants & redox signaling**, [s. l.], v. 19, n. 9, p. 998–1011, 2013.

LIU, Hongjun *et al.* Amino acids hydrolyzed from animal carcasses are a good additive for the production of bio-organic fertilizer. **Frontiers in microbiology**, [s. l.], v. 7, p. 1290, 2016.

MARTINEZ-HERNANDEZ, A L *et al.* Microstructural characterisation of keratin fibres from chicken feathers. **International Journal of Environment and Pollution**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 162–178, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1504/IJEP.2005.006858>

NAFADY, Nivien Allam *et al.* Effectiveness of eco-friendly arbuscular mycorrhizal fungi biofertilizer and bacterial feather hydrolysate in promoting growth of *Vicia faba* in sandy soil. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [s. l.], v. 16, p. 140–147, 2018. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.07.024>

NÁVAROVÁ, Hana *et al.* Pipecolic acid, an endogenous mediator of defense amplification and priming, is a critical regulator of inducible plant immunity. **The Plant Cell**, [s. l.], v. 24, n. 12, p. 5123–5141, 2012.

NURDIAWATI, Anissa *et al.* Characterization of potential liquid fertilizers obtained by hydrothermal treatment of chicken feathers. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 375–382, 2018. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ep.12688>

NURDIAWATI, Anissa *et al.* Nitrogen mineralization dynamics of liquid feather hydrolysates obtained by hydrothermal treatment. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], 2019.

PALECKIENE, R; SVIKLAS, A; ŠLINKŠIENE, R. Physicochemical properties of a

microelement fertilizer with amino acids. **Russian Journal of Applied Chemistry**, [s. l.], v. 80, n. 3, p. 352–357, 2007.

PAUL, Tanmay *et al.* Exploitation of chicken feather waste as a plant growth promoting agent using keratinase producing novel isolate *Paenibacillus woosongensis* TKB2. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 50–57, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2012.10.001>

ROS, Roc; MUÑOZ-BERTOMEU, Jesús; KRUEGER, Stephan. Serine in plants: biosynthesis, metabolism, and functions. **Trends in plant science**, [s. l.], v. 19, n. 9, p. 564–569, 2014.

SEO, Shigemi *et al.* L-Histidine induces resistance in plants to the bacterial pathogen *Ralstonia solanacearum* partially through the activation of ethylene signaling. **Plant and Cell Physiology**, [s. l.], v. 57, n. 9, p. 1932–1942, 2016.

SHARMA, Swati; GUPTA, Arun. Sustainable management of keratin waste biomass: applications and future perspectives. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, [s. l.], v. 59, 2016.

SINGH, SK *et al.* Greenhouse Gas Emissions from Landfills: A Case of NCT of Delhi, India. **Journal of Climatology & Weather Forecasting**, [s. l.], v. 04, n. 01, p. 1–6, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4172/2332-2594.1000157>

SOBUCKI, Lisiane *et al.* Feather hydrolysate as a promising nitrogen-rich fertilizer for greenhouse lettuce cultivation. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 493–499, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40093-019-0281-7>

STEPANSKY, A; LEUSTEK, Thomas. Histidine biosynthesis in plants. **Amino acids**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 127–142, 2006.

STIBOROVA, Hana *et al.* Transformation of raw feather waste into digestible peptides and amino acids. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, [s. l.], v. 91, n. 6, p. 1629–1637, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jctb.4912>

TAMREIHAO, K *et al.* Biofertilizing potential of feather hydrolysate produced by indigenous keratinolytic *Amycolatopsis* sp. MBRL 40 for rice cultivation under field conditions. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [s. l.], v. 10, p. 317–320, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.04.010>

THURIÈS, L *et al.* Kinetics of added organic matter decomposition in a Mediterranean sandy

soil. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 33, n. 7, p. 997–1010, 2001. Disponível em:

[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00003-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00003-7)

TIMM, Stefan *et al.* Serine acts as a metabolic signal for the transcriptional control of photorespiration-related genes in Arabidopsis. **Plant physiology**, [s. l.], v. 162, n. 1, p. 379–389, 2013.

USDA FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE. Livestock and poultry: world markets and trade. **United States Department of Agriculture and Foreign Agricultural Service**, [s. l.], p. 31, 2022. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/livestock-and-poultry-world-markets-and-trade>

VERMA, Amit *et al.* **Production of Thermostable Organic Solvent Tolerant Keratinolytic Protease from Thermoactinomyces sp. RM4: IAA Production and Plant Growth Promotion** . [S. l.: s. n.], 2016. Disponível em:

<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2016.01189>

WADITEE, Rungaroon *et al.* Metabolic engineering for betaine accumulation in microbes and plants. **Journal of Biological Chemistry**, [s. l.], v. 282, n. 47, p. 34185–34193, 2007.

WINTER, Gudrun *et al.* Physiological implications of arginine metabolism in plants. **Frontiers in plant science**, [s. l.], v. 6, p. 534, 2015.