



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS – CECA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA – BACHARELADO

HEBERTH GUSTAVO FERREIRA ALVES

ACTINOBACTÉRIAS: FATORES ABIÓTICOS E PRODUÇÃO DE ENZIMAS

RIO LARGO – AL

2025

HEBERTH GUSTAVO FERREIRA ALVES

ACTINOBACTÉRIAS: FATORES ABIÓTICOS E PRODUÇÃO DE ENZIMAS

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC apresentado a Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA, como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Zootecnia.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Tania Marta Carvalho dos Santos.

Coorientadora: M^ª. Paula Cibelly Vilela da Silva.

RIO LARGO – AL

2025

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

A474a Alves, Heberth Gustavo Ferreira.

Actinobactérias: fatores abióticos e produção de enzimas. / Heberth Gustavo Ferreira Alves. – 2025.

42 f.: il.

Orientadora: Tania Marta Carvalho dos Santos.
Coorientadora: Paula Cibelly Vilela da Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Zootecnia) – Graduação em Zootecnia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2025.

Inclui bibliografia

1. Enzimas Microbianas. 2. Fatores Abióticos na produção Microbiana. 3. Uso de enzimas em rações. I. Título.

CDU: 632.9


FOLHA DE APROVAÇÃO

HEBERTH GUSTAVO FERREIRA ALVES


ACTINOBACTÉRIAS: FATORES ABIÓTICOS E PRODUÇÃO DE ENZIMAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Federal De Alagoas para a obtenção do Título de Bacharel em Zootecnia, sob orientação da Prof^a. Dr^a. Tania Marta Carvalho dos Santos, apresentado em 12 de março de 2025.


Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 TANIA MARTA CARVALHO DOS SANTOS
Data: 13/03/2025 10:56:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientadora: Prof^a Dr^a Tania Marta Carvalho dos Santos
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 YAMINA COENTRO MONTALDO
Data: 13/03/2025 11:05:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinadora Interna: Prof^a Dr^a Yamina Coentro Montaldo
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 PAULA CIBELLY VILELA DA SILVA
Data: 13/03/2025 11:20:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinadora Externa: MsC. Paula Cibelly Vilela da Silva
(RENORBIO/Universidade Federal de Alagoas)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e Nossa Senhora por me dar forças e esperança para seguir em frente mesmo diante a tantos obstáculos que surgiram ao longo do caminho, nunca me permitindo desistir dos meus sonhos.

Agradeço a meus pais Cícera Ferreira e José Alves, em especial a minha mãe, por não medir esforços para a realização deste sonho em meio a tantas dificuldades, sempre me motivando a prosseguir e por todo incentivo e apoio durante esta jornada e em todas as outras da minha vida.

As minhas orientadoras, Prof^ª. Dr^ª. Tania Marta Carvalho dos Santos e M^a. Paula Cibelly Vilela da Silva, por terem me acolhido no LMA, um verdadeiro lar que encontrei dentro da universidade, por toda paciência, compreensão, suporte e pela excelente orientação.

Aos colegas e Amigos do Laboratório de Microbiologia Agrícola por toda acolhida, comida, companheirismo, por todas as alegrias, estresses e ensinamentos construídos no decorrer dessa caminhada.

A todos os Docentes que contribuíram com meu aprendizado durante a graduação com ensinamentos para toda a vida, em especial a Professora e Coordenadora Dr^ª. Sandra Roseli Valerio Lana, por todo seu empenho e dedicação com o curso de Zootecnia.

Aos meus colegas e Amigos da turma de Zootecnia 2018.1, e todos os companheiros que foram se agregando, por tudo o que passamos desde a realização da matrícula até o momento de conclusão do curso.

Aos amigos de graduação Bianca Evellyn, Gesmiel Felipe, Gustavo Palheta, Henrique Araujo, Laíz Lins, Mylena Gonçalves, Paulo César, Pedro Roberto, Rafael Ancelmo, Tiago Santos, Valeria Dantas, Williams Valdevino por terem entrado na minha vida, mesmo que em momentos e situações distintas, fizeram parte da rotina cansativa e tornaram meus dias melhores nesses últimos anos.

Agradeço em especial ao meu Melhor Amigo de Graduação Henrique Santana Araujo, que é um irmão, pelos momentos vividos durante todos esses anos, pela convivência diária, por toda ajuda recebida, aos apuros que já passamos juntos, discursões, todas as risadas e desabafos, pela contribuição para o crescimento pessoal e profissional e por todo apoio recebido para que conseguisse caminhar até aqui, a ele meus mais sinceros agradecimentos.

A toda minha família e Amigos que sempre me dão forças para prosseguir e estão sempre me apoiando, e compreendem minha ausência física.

Aos membros da banca examinadora Prof.^a Dr.^a Yamina Coentro Montaldo, MsC Paula Cibely Vilela da Silva, e Prof.^a Dr.^a Tania Marta Carvalho dos Santos pelas valiosas colaborações e sugestões.

A Professora Dr.^a Tania Marta Carvalho pelo acolhimento no Laboratório de Microbiologia Agrícola durante esses últimos anos, por toda paciência, tempo e ensinamentos dedicados para com todos.

Quero também agradecer a mim, por ter suportado todo o processo, e só eu sei que não foi pouca coisa, por não ter desistido perante os obstáculos, que não foram poucos, e por sempre caminhar, mesmo que lentamente, em busca de crescimento pessoal e profissional.

Aos que contribuíram de forma direta ou indireta para que fosse possível a conclusão do curso de Bacharel em Zootecnia.

A Todos Meu Muito Obrigado!

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender o desconhecido.”

Albert Einstein

RESUMO

As actinobactérias possuem diversas propriedades fisiológicas e metabólicas, tais como a produção de compostos metabólitos secundários biologicamente ativos como a produção de sistemas enzimáticos, síntese de substâncias e antagonismo a outros microrganismos. Com destaque para produção de enzimas envolvidas na degradação de materiais orgânicos, na biotransformação de substratos e outras funções biológicas. Microrganismos adaptados aos mais diversos ambientes produzem uma série de metabólitos secundários que auxiliam na sua sobrevivência, podendo produzir compostos que resistem a elevadas condições térmicas e a escassez de água estas características despertam alto interesse da indústria biotecnológica. Objetivou-se identificar por meio de uma revisão informações sobre a produção enzimática de actinobactérias e a influência de fatores abióticos junto a seu potencial para aplicações biotecnológicas. Os resultados mostraram que as actinobactérias são capazes de produzir uma gama de enzimas, destacando-se amilase, celulase, lipase e protease. Também são capazes de manter a atividade enzimática sob estresse de fatores abióticos como diferentes pHs, níveis de NaCl e Temperaturas, potencializando a aplicação biotecnológica de suas enzimas extracelulares. Uma das principais aplicações dessas enzimas está na nutrição animal, onde proteases, amilases, celulases e outras enzimas têm sido empregadas para aumentar a digestibilidade dos ingredientes, melhorando o aproveitamento de nutrientes e reduzindo os impactos ambientais da produção pecuária.

Palavras-chave: Enzimas Microbianas; Fatores Abióticos na Produção Microbiana; Uso de Enzimas em Rações.

ABSTRACT

Actinobacteria have several physiological and metabolic properties, such as the production of biologically active secondary metabolite compounds, the production of enzymatic systems, the synthesis of substances and antagonism to other microorganisms. The production of enzymes involved in the degradation of organic materials, the biotransformation of substrates and other biological functions is particularly noteworthy. Microorganisms adapted to the most diverse environments produce a series of secondary metabolites that aid in their survival, and can produce compounds that resist high thermal conditions and water shortages. These characteristics arouse great interest in the biotechnology industry. The objective of this study was to identify, through a review, information on the enzymatic production of actinobacteria and the influence of abiotic factors along with their potential for biotechnological applications. The results showed that actinobacteria are capable of producing a range of enzymes, including amylase, cellulase, lipase and protease. They are also capable of maintaining enzymatic activity under stress from abiotic factors such as different pHs, NaCl levels and temperatures, enhancing the biotechnological application of their extracellular enzymes. One of the main applications of these enzymes is in animal nutrition, where proteases, amylases, cellulases and other enzymes have been used to increase the digestibility of ingredients, improving the use of nutrients and reducing the environmental impacts of livestock production.

Keywords: Microbial Enzymes; Abiotic Factors in Microbial Production; Use of Enzymes in Animal Feed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição das actinobactérias no ambiente	15
Figura 2. Desenvolvimento de actinobactérias	17
Figura 3. Aplicação industrial das enzimas	18
Figura 4. Representação esquemática da ação das enzimas amilolíticas	19
Figura 5. Representação esquemática do grupo das celulasas	20
Figura 6. Mecanismo de reação de transferência catalisado por lipase	22
Figura 7. Ação de proteases sobre cadeias polipeptídicas	23
Figura 8. Enzimas e outros metabolitos produzidos por actinobactérias	24
Figura 9. Aplicações da protease	27
Figura 10. Representação da produção de metano entérico por bovinos	32

LISTA DE GRÁFICOS E TABELAS

Gráfico 1- Participação no mercado global de enzimas por aplicação	28
Gráfico 2. Gráfico do mercado global de enzimas	29
Gráfico 3. Gráfico do Mercado global de enzimas para ração animal	30
Tabela 1. Aplicações da amilase	26
Tabela 2. Aplicações da celulase	26
Tabela 3. Aplicações da lipase	27

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. MATERIAL E MÉTODOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Biologia de Actinobactérias	15
3.2 Produção de Enzimas	17
3.2.1 Amilases	19
3.2.2 Celulases	20
3.2.3 Lipases	21
3.2.4 Proteases	22
3.3 Fatores Abióticos	23
3.4 Aplicação Biotecnológica	25
3.5 Mercado Enzimático	28
3.6 Aplicação Biotecnológica na Alimentação Animal	31
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

As actinobactérias, também denominadas actinomicetos, são um grupo de bactérias gram-positivas, com alta concentração de citosina e guanina em seu DNA, algumas assemelham-se a fungos devido a formação hifas e de esporos assexuados. São encontradas com maior frequência no solo, mas também podem habitar outros ambientes, são produtoras de Geosmina, composto que confere o aroma característico de terra molhada e outros metabolitos secundários de importância biotecnológica. A diversidade metabólica das actinobactérias é um dos fatores que possibilita o crescimento e sobrevivência desse grupo nos mais diferentes habitats.

Entre os metabolitos secundários produzidos pelas actinobactérias estão as enzimas extracelulares, que hidrolisam macromoléculas complexas, disponibilizando energia e nutrientes necessários, para entre outras funções, as interações metabólicas entre organismos do solo. As enzimas e outros metabolitos bioativos produzidos por microrganismos tem elevado potencial para possuir propriedades bioquímicas únicas. Devido à facilidade de produção e abundância, as enzimas mais estudadas e utilizadas industrialmente são obtidas de microrganismos.

Fatores abióticos podem influenciar a atividade enzimática, tais como disponibilidade de nutrientes, disponibilidade hídrica, pH e salinidade o que influencia os microrganismos a desenvolverem características únicas para sobreviverem, todos estes parâmetros fisiológicos muito variáveis em solos rizosférico, principalmente da região do semiárido, o que contribui para a produção de moléculas com propriedades únicas e específicas as quais podem ser uteis aos processos biotecnológicos e industriais.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo identificar e analisar na literatura por meio de uma revisão o conhecimento publicado em plataformas de dados acerca da produção enzimática de actinobactérias, e a influência diante a exposição a fatores abióticos, assim como também seu potencial para aplicações industriais e biotecnológicas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa decorreu entre Novembro de 2024 e Março de 2025, com uma abordagem qualitativa descritiva (PEREIRA et al., 2018).

2.1 Pesquisa Bibliográfica

Foram realizadas pesquisas nas bases de dados Pubmed, Scielo, Google, Google Scholar, e repositórios institucionais. Também foi realizada uma busca recursiva, usando as bibliografias de artigos obtidos. Referências de anos anteriores foram citadas de acordo com a sua relevância para o trabalho. Uma busca eletrônica foi realizada usando as seguintes palavras-chave pertinentes ao tema, em combinações variadas, também pesquisadas na versão em inglês:

Actinobactérias;

Enzimas em rações;

Enzimas industriais;

Enzimas microbianas;

Fatores abióticos;

Mercado e produção enzimática;

Foram incluídos estudos publicados em periódicos revisados por pares, priorizando a similaridade e adequação do título do documento com o objetivo do levantamento bibliográfico junto aos termos chaves pesquisados. Os artigos de texto completo publicados entre 2000 a 2025 foram compilados e combinados aos resultados da pesquisa e as duplicatas foram removidas. Inicialmente foi realizada a seleção dos títulos e dos resumos, sendo escolhidos os mais relevantes e atuais. Posteriormente, foram obtidos os textos integrais daqueles que cumpriram os critérios de elegibilidade.

Os artigos foram recuperados do Pubmed, Google Academico, Scielo e periódicos individuais. Foram excluídos documentos que se apresentaram de forma repetida e que não se enquadravam nos critérios de seleção por meio da análise inicial das informações. Os principais aspectos encontrados e discutidos incluem o potencial biotecnológico das actinobactérias, a influência de fatores abióticos na produção enzimática destes microrganismos e suas aplicações biotecnológicas, destacando sua utilização na nutrição animal.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

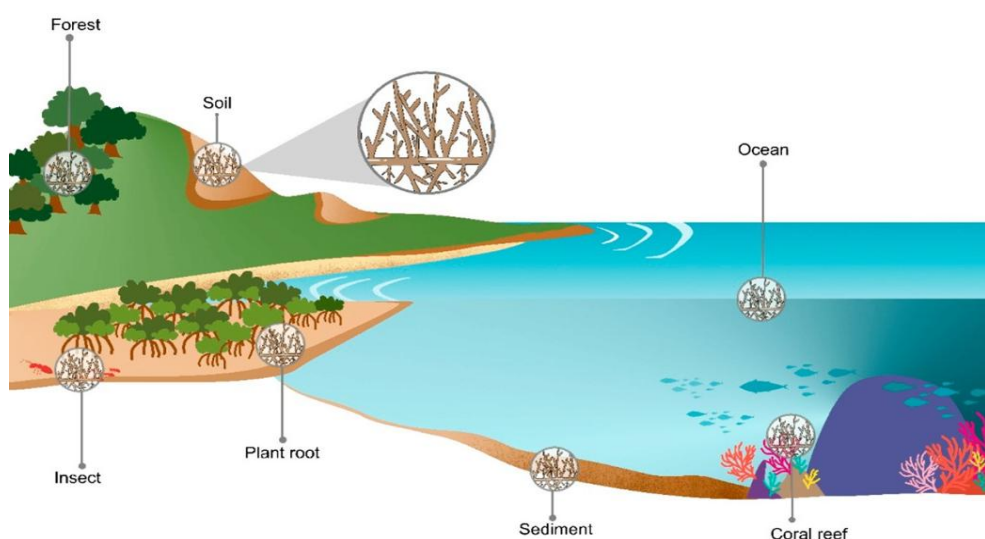
3.1 Biologia de Actinobactérias

A microbiota do solo possui representantes dos três domínios: Archaea, Bacteria e Eucarya. Chegam a ocupar 5% do espaço poroso do solo e constituem somente 1 a 4 % do carbono total. Apesar da grande quantidade e da diversidade bastante elevada dos microrganismos presentes nesse reservatório da diversidade biológica, somente 15% a 30% das bactérias e 10% dos fungos encontram-se ativos metabolicamente, pois normalmente o solo é um ambiente bastante estressante e limitante nutricionalmente para estes microrganismos (Lambais, 2005; Andreola, 2007).

Actinobactéria é um filo de bactérias gram-positivas filamentosas com elevada quantidade de ligações Guanina+Citosina em seu DNA, superior a 50%. denominadas também como actinomicetos ou actinobactérias representam um dos maiores filios dentro do domínio das bactérias. O termo “Actinobactérias” tem origem do grego “aktin” (raio) e “mukês” (fungos) sendo usado para denominar bactérias filamentosas que possuem ramificações a qual formam hifas (Barka, 2016, Salam et al, 2020; Cavalcante et al., 2022).

Podem ser encontradas nos mais diversos ecossistemas, como oceanos, solos, ambientes extremos, tecidos vegetais, excretas animais, algas e líquens (figura 1), além de pele, trato pulmonar e trato gastrointestinal de humanos, sendo o solo seu habitat mais comum (Garg, 2013; Velayudham & Murungan, 2012).

Figura 1. Distribuição das actinobactérias no ambiente.



Fonte: Ngamcharungchit, (2023).

As actinobactérias terrestres detêm de significativas habilidades antimicrobianas e suas enzimas produzidas estão envolvidas na decomposição de moléculas orgânicas e na mineralização de nutrientes. Essas capacidades permitem a degradação de resíduos de plantas, animais e outros microrganismos (Torres, 2015; Ngmcharungchit et al, 2023).

Apresentam mais de 200 gêneros distribuídos em cerca de 52 famílias, 25 ordens e 6 classes, compondo o maior grupo conhecido de bactérias (Alvarez et al., 2017; Sathya et al., 2017), essa diversidade no entanto, baseia-se na capacidade desses seres se desenvolverem nos variados habitats e o papel que desempenham nos mesmos, podendo então serem classificadas como termofilíficas (extremófila), acidofilíficas (extremófila), halofilíficas (extremófila), endofíticas, simbióticas, endosimbióticas e intestinais e patógenos de plantas ou animais (Ranjani et al., 2016; Ngmcharungchit et al, 2023).

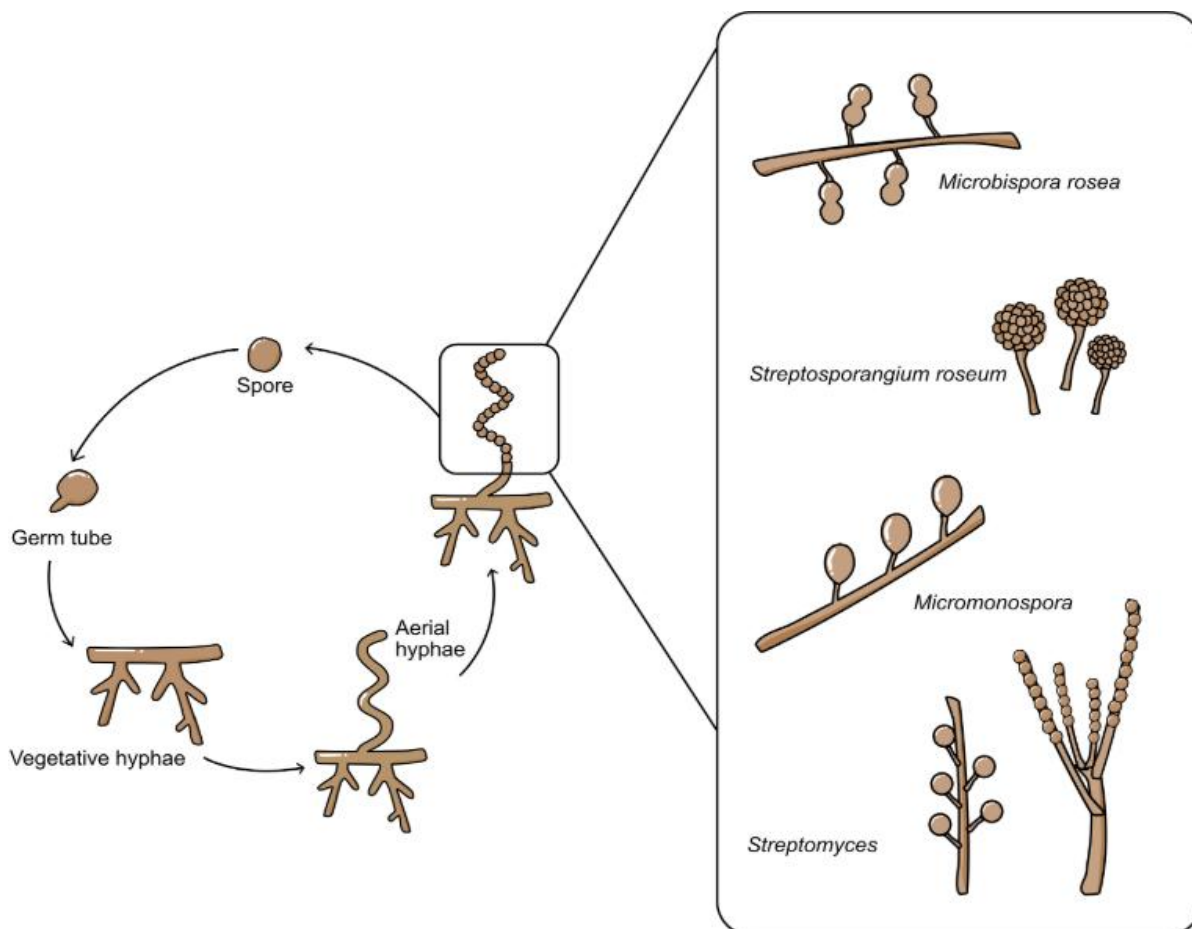
Este grupo também possui diversidade morfológica, apresentam variadas formas como coco-bacilos (*Arthrobacter*), cocos (*Micrococcus*), hifas curtas e rudimentares (*Nocardia* spp.) e micélio ramificado (*Streptomyces* spp.), tais características morfológicas, juntamente com a produção de esporos vem servindo de base há mais de um século para a identificação e estudo em nível de gênero desse grupo de bactérias (Selim et al., 2021).

As actinobactérias apresentam ciclo de vida saprofítico e a maioria é aeróbica, entretanto alguns gêneros são anaeróbios facultativos ou obrigatórios, como o gênero *Actinomyces* (Bernado, 2012). Apesar de serem procariontes, em sua grande parte, assemelham-se aos fungos quanto a produção de micélio e ao crescimento filamentosos (Rodrigues, 2019).

Diferentemente das demais bactérias, o crescimento das actinobactérias é caracterizado pela formação de hifas ramificadas que dão origem a um micélio vegetativo o qual se desenvolve no interior do substrato e sua principal função é a absorção de nutrientes para o crescimento da actinobactéria (Li et al., 2016).

O cheiro característico de “terra molhada” é proveniente também das actinobactérias, que produzem “Geosmina”, composto aromático volátil, que é o que confere esse odor (Salwan; Sharma, 2020). O ciclo de crescimento de algumas actinobactérias está voltado principalmente para as fases de esporulação, após a germinação de esporos, o micélio vegetativo (substrato) cresce na superfície e interior do meio de cultura com ágar, até que se diferencia em micélio reprodutivo (aéreo) onde ocorre a formação de esporos (Yague et al., 2013).

Figura 2. Desenvolvimento de actinobactérias.

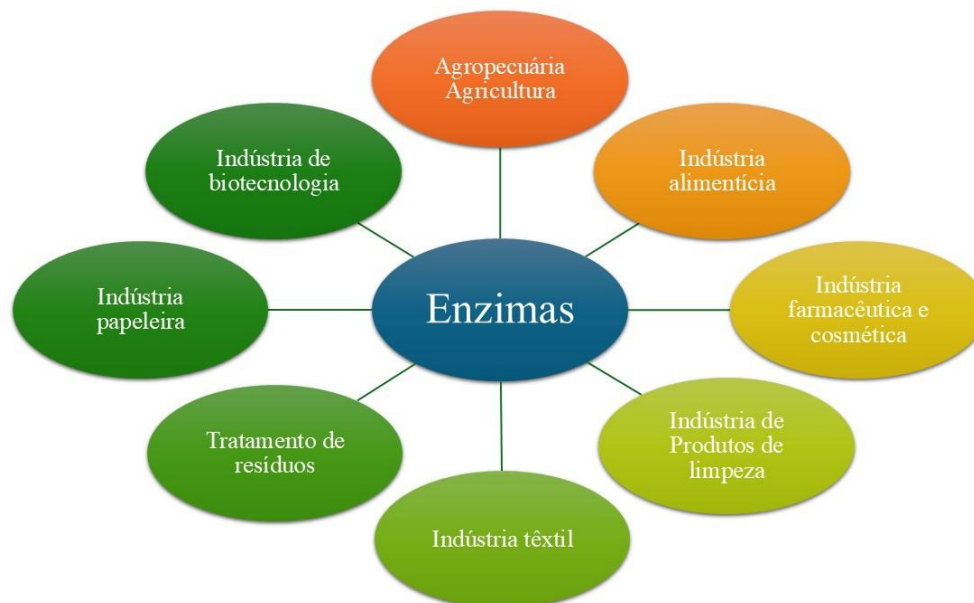


Fonte: Ngamcharunghit, (2023).

3.2 Produção de Enzimas

As enzimas são moléculas que atuam de forma a acelerar reações químicas, como catalisadores, isso ocorre por meio da redução da energia de ativação necessária para que a reação se proceda, permitindo com que esta aconteça mais rapidamente (Nelson, 2014). As indústrias as utilizam em diversos processos buscando sempre aprimorá-los, e garantir uma melhor qualidade ao produto.

Figura 3. Aplicação industrial das enzimas.



Fonte: Autor, (2025).

As enzimas são obtidas de três grandes fontes: vegetais; animais e micro-organismos, onde, as de origem microbiana são mais utilizadas devido apresentarem um elevado rendimento na produção. As bactérias são responsáveis por 30% da produção enzimática. Mesmo assim, as enzimas obtidas de fontes vegetais e animais são utilizadas (Monteiro & Silva, 2009; Rigo, et al. 2021).

A substituição de catalisadores químicos por catalisadores bioquímicos, e o crescente interesse industrial pela implementação de processos sustentáveis e hábeis, levou a um aumento na quantidade de pesquisas e produção de enzimas, a maioria delas são produzidas por microrganismos que foram selecionados na natureza e, geralmente, modificados geneticamente para uma produção mais eficiente para aplicação em processos industriais e biotecnológicos (Santos, 2022; Ejaz, et al., 2023).

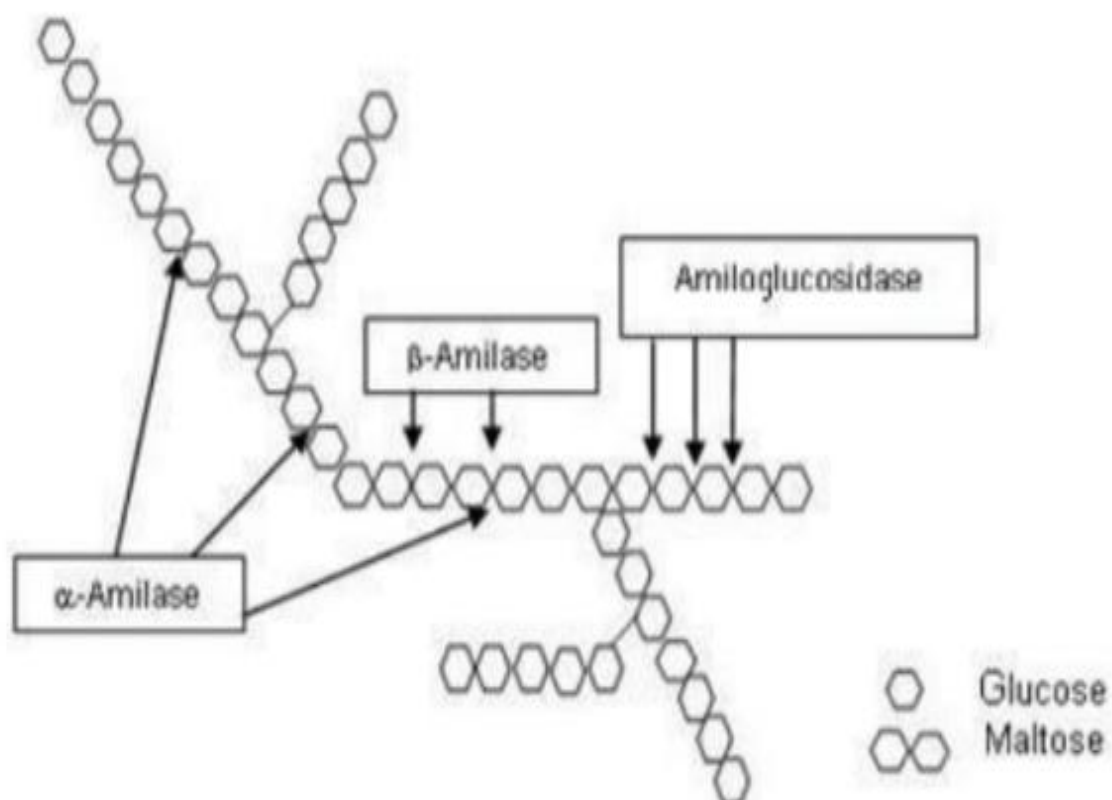
As enzimas e outros metabólitos bioativos produzidos por microrganismos oriundos do solo têm o potencial de possuir propriedades bioquímicas únicas, que podem ser exploradas em muitos segmentos da indústria, farmacologia, cosméticos e agricultura (Melo, 2014; Tanvir et al., 2014; Tan, 2018). Dentre as enzimas produzidas de grande interesse e demanda, podemos destacar as proteases, lipases, celulases e amilases, (Selim; Abdelhamid; Mohamed, 2021).

3.2.1 Amilases

As amilases são um grupo de enzimas que catalisam a hidrólise do amido em diversos produtos e progressivamente em polímeros menores, compostos de unidades de glicose. Estas enzimas se classificam em três subgrupos, α -amilase, β -amilase e glicamilase, a depender do tipo de ligação em que são capazes de atuar (Liu e Kokare, 2017).

A ação conjunta deste grupo de enzimas é essencial para promover a hidrólise completa da molécula do amido em glicose. O principal substrato das amilases é o amido. Ele é um dos polímeros mais abundantes na natureza sendo a principal reserva energética das plantas superiores e o principal carboidrato empregado na alimentação humana (Cereda, et al., 2001). É constituído de moléculas de amilose e amilopectina, que são polímeros de D-glicose, ligadas entre si por pontes de hidrogênio (Souto, 2011).

Figura 4. Representação esquemática da ação das enzimas Amilolíticas.



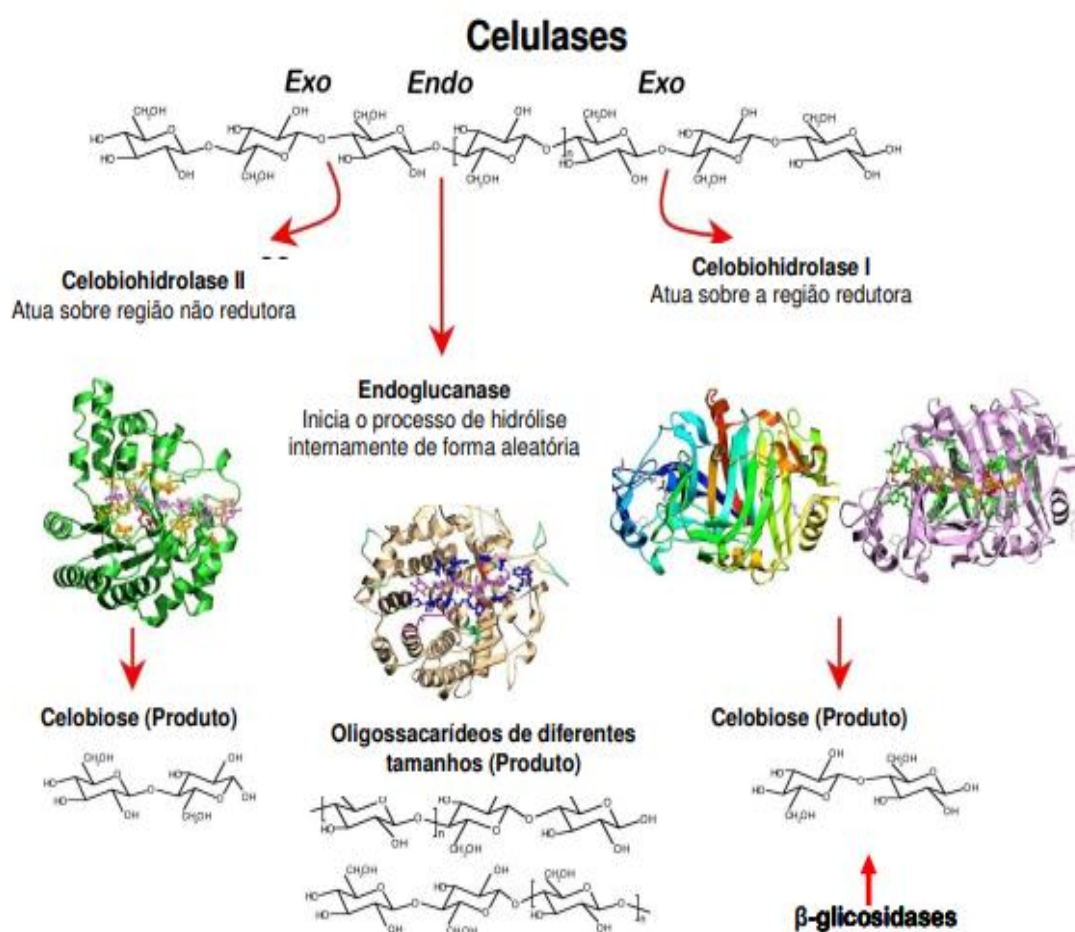
Fonte: Spier, (2005)

3.2.2 Celulases

As celulases são enzimas hidrolíticas que degradam a celulose, a celulose é o principal polissacarídeo estrutural das plantas pois pode representar até 30% em paredes celulares primárias e de 50 a 80% em secundárias (Castro; Pereira, 2010).

O grupo das celulases é subdividido em três tipos enzimas, as endoglucanases, as exoglucanases e as beta-glicosidases. essas atuam sobre diversos materiais celulósicos liberando açúcares como produtos, a glicose, desperta maior interesse industrial devido à possibilidade de sua conversão em etanol. Para a hidrólise completa da celulose é necessária uma ação sinérgica dessas enzimas (Sharma, S.; Sharma, V.; Kuila, 2016; Wang et al., 2018).

Figura 5. Representação esquemática do grupo das celulases.



Fonte: Santana, (2010).

Essas hidrolases possuem aplicações biotecnológicas diversas, sendo passíveis de aplicação na indústria de alimento, na indústria de conversão de amido, na indústria de detergentes e na indústria de papel e celulose (Farooq et al., 2021, Matos Neto, 2022). agricultura (Silva et al., 2019) Além disso o subproduto de hidrólise do amido possui diversas aplicações, sobretudo na indústria alimentícia, onde são utilizados como adoçantes, espessantes, géis e controladores de textura (Whistler; Daniel, 2000).

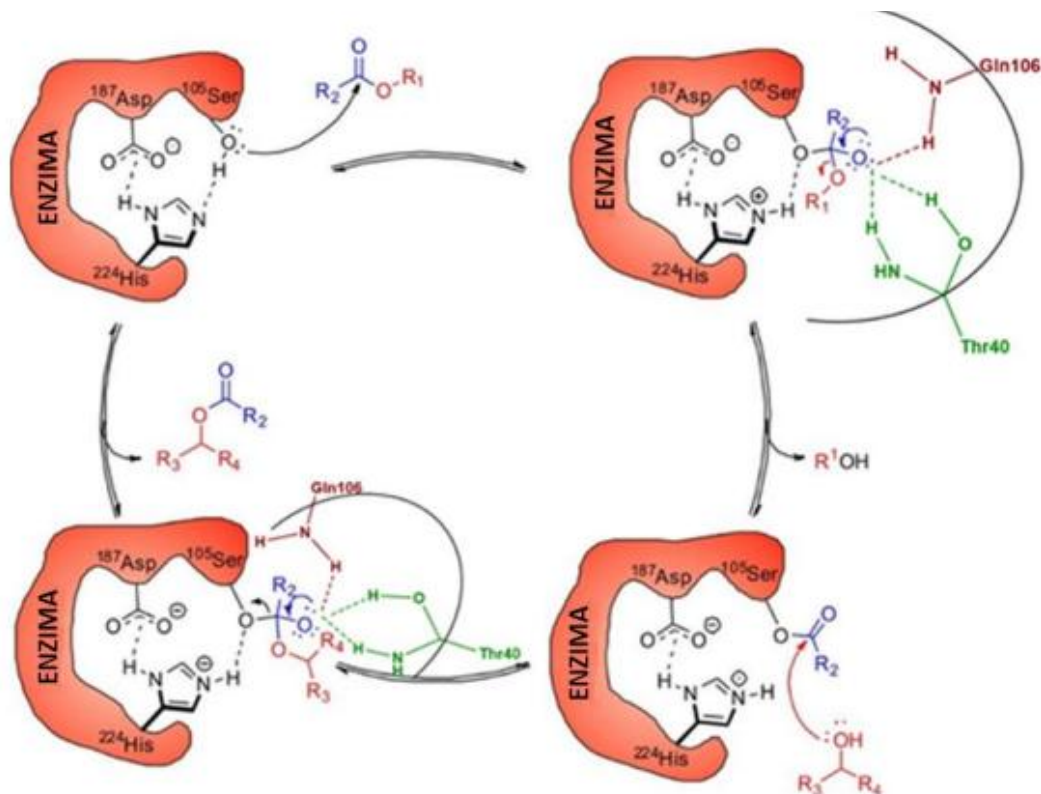
Porém, as aplicações das celulasas são limitadas devido a perda de atividade enzimática a elevadas temperaturas nas práticas industriais. A elevação de alguns graus acima da temperatura ideal leva a mudanças conformacionais afetando sua funcionalidade. Assim as características de estabilidade térmica da enzima são dados importantes para avaliação da eficiência em aplicação biotecnológica (Bashirova et al., 2019; Saini; Aggarwal, 2019).

3.2.3 Lipases

Lipases, são enzimas capazes de degradar esta diversa classe de biomoléculas. O mecanismo de ação associado à reação de hidrólise de triacilgliceróis mediado por lipases e um exemplo estrutural de lipase.

Essas enzimas hidrolisam regiões esterificadas, trans-esterificadas e inter-esterificadas, sendo extremamente versáteis e aplicáveis do ponto de vista biotecnológico, podendo ser utilizadas na produção de biocombustíveis (Constantini; Califano, 2021; Rachmadona et al., 2022), como biosensores (Hasanah et al., 2019), na indústria de couro (Moujehed et al., 2022; Li et al., 2020), no tratamento de efluentes industriais (Rachmadona et al., 2022), na indústria têxtil (El Menoufy et al., 2022), na indústria de óleos, de aromas e sabores, farmacêuticas (Vanleeuw et al., 2019), além de muitas outras.

Figura 6. Mecanismo de reação de transferência catalisado por lipase.



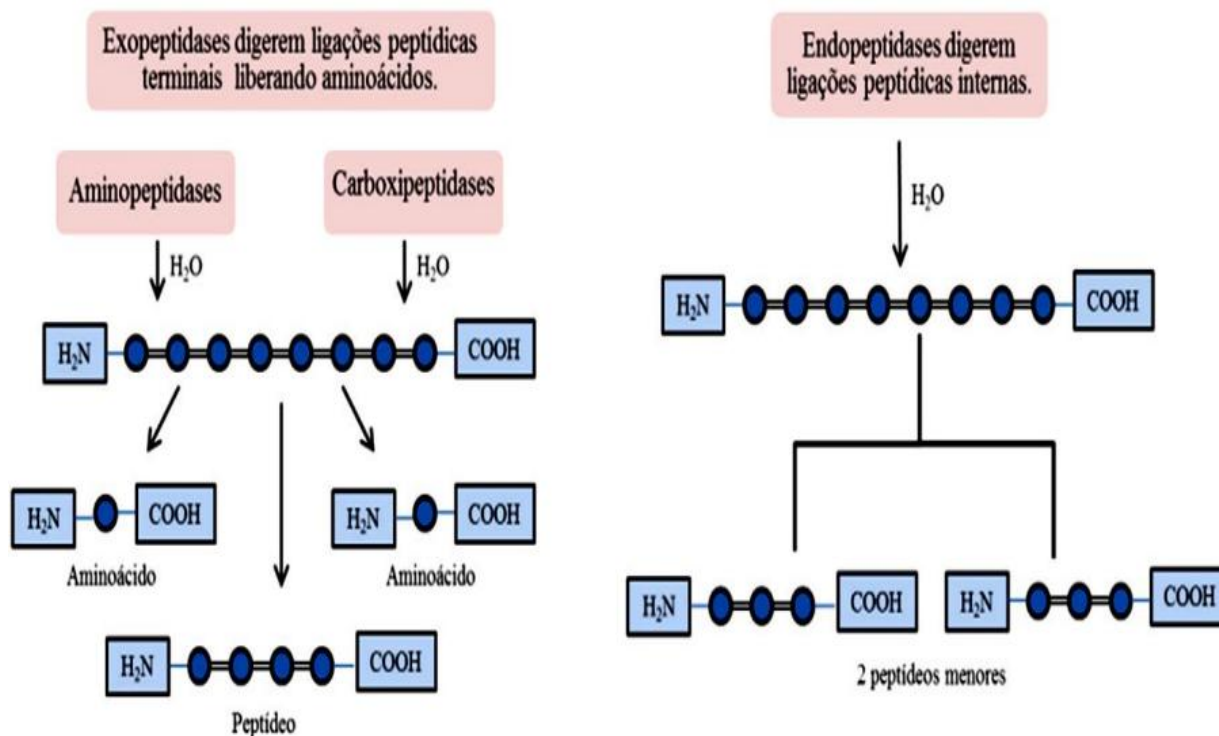
Fonte: Vega, (2020), adaptado de Bandeira et. al., (2017).

3.2.4 Proteases

As proteases ou peptidases são uma subclasse enzimática pertencentes à classe das hidrolases onde hidrolisam ligações peptídicas. As proteases que detêm capacidade de clivar ligações peptídicas nas porções carboxi e amino terminais são denominadas exopeptidases, já aquelas responsáveis por clivar ligações internas das proteínas são denominadas endopeptidases (Rawlings; Bateman, 2019).

A protease bacteriana é uma enzima que quebra proteínas em peptídeos e aminoácidos, facilitando a absorção pelas células, é aplicada em três segmentos do mercado: enzimas técnicas (para aplicação em produtos de limpeza, têxtil, couros, álcool como combustível e papel); mercado de alimentos e bebidas; e enzimas para a ração animal. sendo sua maior aplicação na indústria de detergentes, laticínio e couro (Souza et al., 2015).

Figura 7. Ação de proteases sobre cadeias polipeptídicas.



Fonte: Adaptado de Mótyan; Tó; Tózsér (2013) por Oliveira (2016).

3.3 Fatores Abióticos

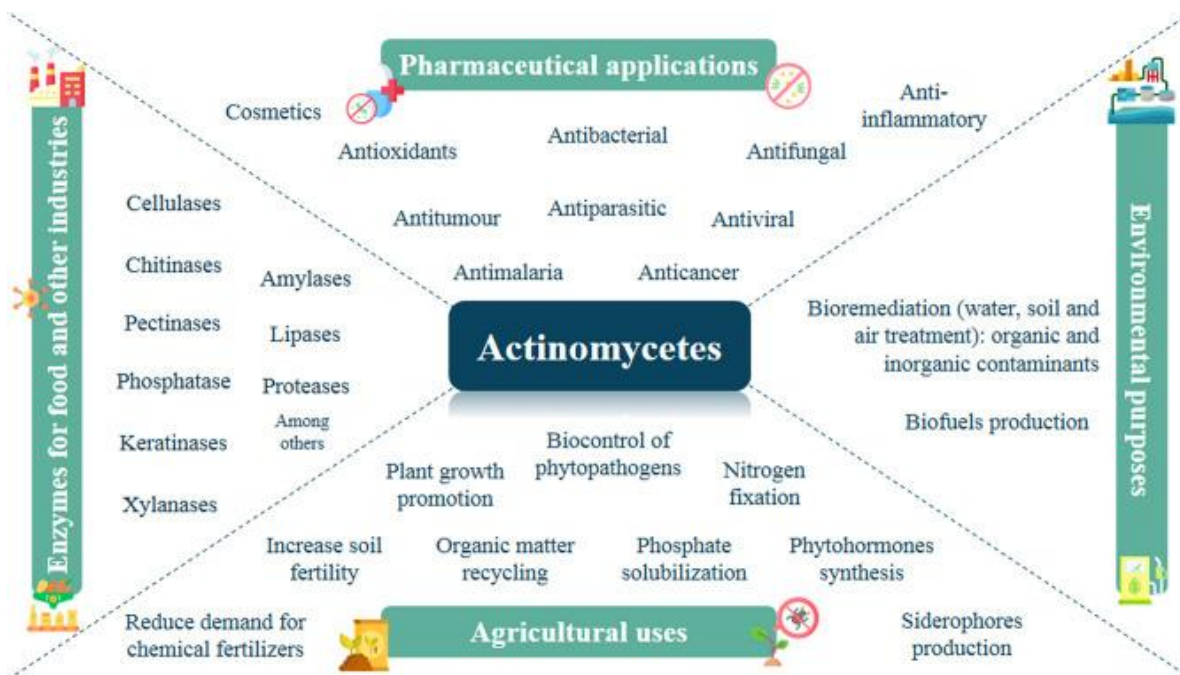
As actinobactérias produzem uma diversidade de enzimas com diferentes atividades e especificidades, sendo aplicadas na produção de novas substâncias bioativas que podem ser utilizadas em processos industriais (Bon; Ferrara; Corvo, 2008).

Os fatores abióticos são componentes não-vivos do meio ambiente que influenciam a vida podem ser: temperatura, luz, água, vento, solo, pH, umidade, nutrientes, salinidade. Tais fatores influenciam a atividade enzimática sendo todos estes parâmetros fisiológicos muito variáveis em solos rizosférico, principalmente da região do semiárido (Gupta et al., 2003; Souza, et al., 2010).

As actinobactérias são adaptadas a condições de estresse abiótico características de alguns biomas tais como baixa disponibilidade hídrica, período de estiagem prolongado, temperaturas elevadas, alto índice de radiação solar e limitação de recursos (Munoz-Rojas et al., 2016).

As actinobactérias são conhecidas por aumentarem a sua produção enzimática extracelular em resposta a exposição ao estresse ambiental (Vieira, 2021).

Figura 8. Enzimas e outros metabolitos produzidos por actinobactérias.



Fonte: Nazari, (2022).

Em estudo Marques (2022), observou atividade enzimática para amilase em 100% das 28 cepas analisadas, Alves et. al., (2016) determinou que 92,3% das 39 actinobactérias estudadas apresentaram atividade amilolítica e Silva et. al., (2015) obteve 82% das cepas bacterianas da região semiárida com atividade amilolítica, Matos Neto (2022), relatou 97,78% das 45 cepas avaliadas capazes efetivamente de produzir amilase.

Marques (2022) observou atividade celulolítica em 60,71% das 28 actinobactérias, Silva et. al., (2025) avaliando a mesma quantidade de cepas reportou atividade celulolítica em 75% dos isolados, Matos Neto (2022) avaliando a atividade celulolítica de 45 cepas de actinobactérias obteve 77,78% de actinobactérias com atividade positiva..

Matos Neto (2022) postula que das 45 cepas avaliadas em seu estudo 71,11% foram capazes de produzir enzimas lipolíticas extracelulares, Romeu et. al., (2021) concluiu que 73% das cepas de actinobactérias isoladas da mesma região eram capazes de produzir lipase.

Das 45 cepas avaliadas por Matos Neto (2022), 91,11% foram positivas quanto a produção de enzimas proteolíticas.

Rocha (2022), investigando o efeito da temperatura e pH sobre atividade enzimática de actinobactérias do semiárido brasileiro ressalva que as atividades enzimáticas quanto ao número de isolados tiveram comportamentos diversos diante os fatores a quais foram expostos.

Romeu et. al., (2021) estudando 26 cepas de actinobactérias quanto a atividade lipolítica verificou um montante de 19 isolados capazes de formar halo lipolítico, e seus resultados mostram que a variação das condições abióticas afeta de maneira variada a atividade lipolítica.

Ramos et. al., (2017) estudando efeito de fatores abióticos sobre a atividade enzimática de actinobactérias, também verificou diferença quanto ao índice enzimático quando comparados a variação dos efeitos abióticos de pH e concentrações salinas (NaCl).

3.4 Aplicação Biotecnológica

Actinobactérias são conhecidas por serem grandes produtoras de metabólitos secundários, com destaque para enzimas (Lopes, 2018; Silva, 2019) e antibióticos (Weber, 2015; Elbendary, 2018), o que justifica a exploração do seu potencial para uso nas áreas biotecnológicas (Qin, 2011) e agronômicas (Silva, 2019).

Sua diversidade metabólica, lhes concede também um importante papel nas indústrias médicas e farmacêuticas, como a produção de compostos bioativos com atividades antitumoral, anti-inflamatória, antibacteriana, antioxidante e produtos naturais como corantes, fármacos e fragrâncias (Goodfellow; Fiedler, 2010; Janardhan, 2014).

O uso de enzimas na indústria traz vários de benefícios: funcionam em baixas temperaturas quando comparadas com químicos, dispensam o uso de ácidos ou bases agressivos, apresentam alta especificidade pelo substrato e fácil escalabilidade e uso (Bajaj; Mahajan, 2019).

De acordo com Bhatia & colaboradores (2021), os micro-organismos são considerados a melhor fonte de enzimas, além de destacar que as propriedades únicas dessas enzimas podem ser obtidas a partir de uma abordagem metagenômica.

Tabela 1. Aplicações da amilase.

Campos de aplicação	Enzima	Benefícios Técnicos
Aplicações Técnicas	Indústria de celulose e papel	Clivando moléculas de amido para reduzir a viscosidade para colagem superficial em revestimento, mas não utilizado para aditivo de agente de resistência a seco
	Indústria textil	Desengorduramento eficientemente sem efeitos nocivos sobre o tecido
	Detergentes para roupas	Remove os resíduos de amido resistente
Processamento de alimentos	Indústria de Panificação	Degradação do amido em farinhas, controle do volume e estrutura do miolo em pães
	Indústria de sucos	Quebra o amido em glucose Clareamento de sucos, especialmente sucos de maçã
	Processamento de amido	Clivam as ligações glicosídicas α -1,4 na região interior do amido Causa uma diminuição rápida no peso molecular e na viscosidade do substrato
	Indústrias de bebidas	Hidrolizar o amido e reduzir viscosidade Liquefação de amido de cereais Aumento no conteúdo de maltose e glucose
	Indústria de alimentação animal	Digestão do amido

Fonte: Silva, (2017)

Tabela 2. Aplicações da celulase.

Indústria	Função	Aplicação
Alimentos	Hidrólise de componentes da parede celular.	Extração de suco de frutas; Alteração das propriedades sensoriais de frutas, legumes, azeite e sopas; Redução da deterioração dos alimentos; Extração de pigmentos aplicáveis como corantes naturais de alimentos; Estabilidade e clarificação de vinhos.
Ração Animal	Hidrólise parciais dos materiais lignocelulósicos.	Melhoria na qualidade nutricional da alimentação animal; Melhoria na digestibilidade do alimento; Ganho de peso em frangos de corte; Diminuição da colonização de bactérias patogênicas do intestino grosso.
Têxtil	Atua no tecido de algodão e rompimento das pequenas extremidades da fibra do tecido de algodão.	Aplicadas na lavagem do jeans e de outros tecidos para obtenção de aspecto envelhecido; Produção de tecidos de alta qualidade.
Farmacêutica/ Cosmética	Digestão da fibra de celulose.	Preparação de digestina; Hidrólise rápida da celulase; auxiliar digestão/carboidrase.
Biocombustíveis	Conversão de material celulósico em glicose e em outros açúcares fermentescíveis.	Produtos de fermentação como o etanol.

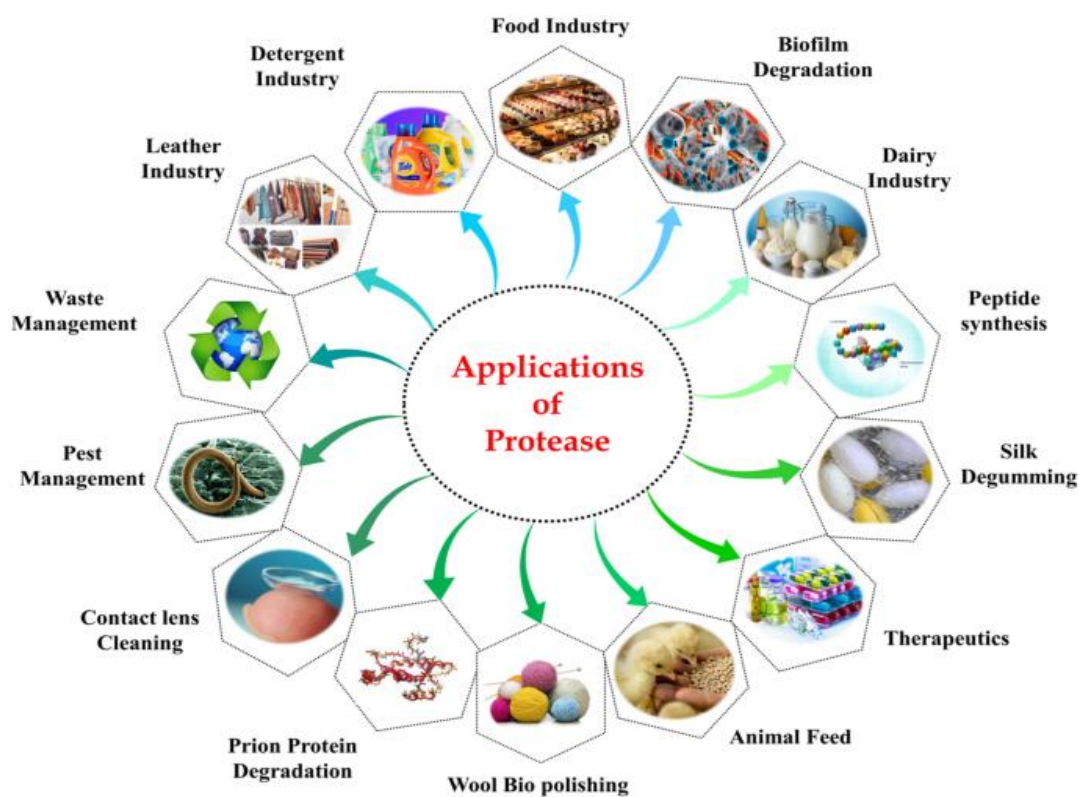
Fonte: Oliveira, 2020 Adaptado de Gaete; Teodora; Martinazo, (2020).

Tabela 3. Aplicações da lipase.

INDÚSTRIA	AÇÃO	PRODUTO OU APLICAÇÃO
Detergentes	Hidrólise de gorduras	Remoção de óleos
Derivados de laticínios	Hidrólise da gordura do leite, maturação de queijos, modificações de manteigas	Desenvolvimento de agentes flavorizantes em leite, queijos e manteiga
Panificação	Melhorador de sabores	Prolongar a vida de prateleira
Bebidas	Aromas	Bebidas
Carnes e peixes	Desenvolvimento de sabores	Remoção de gordura, produtos de carnes e peixes
“Health foods”	Transesterificação	Produção de alimentos com apelo nutricional
Gorduras e óleos	Transesterificação, hidrólise	Manteiga de cacau, margarinas, ácidos graxos, glicerol, mono e diglicerídios
Química	Enantiosseletividade, síntese	Construção de blocos quirais
Farmacêutica	Transesterificação, hidrólise	Lipídios específicos, digestivos
Cosméticos	Síntese	Emulsificantes, umidificantes
Papel	Hidrólise	Melhoria da qualidade de papel
Limpeza	Hidrólise	Remoção de gorduras
Couro	Hidrólise	Produtos de couro

Fonte: Colla, 2012. Adaptado de Sharma; Chisti; Banerjee (2001).

Figura 9. Aplicações da protease



Fonte: Solanki (2021)

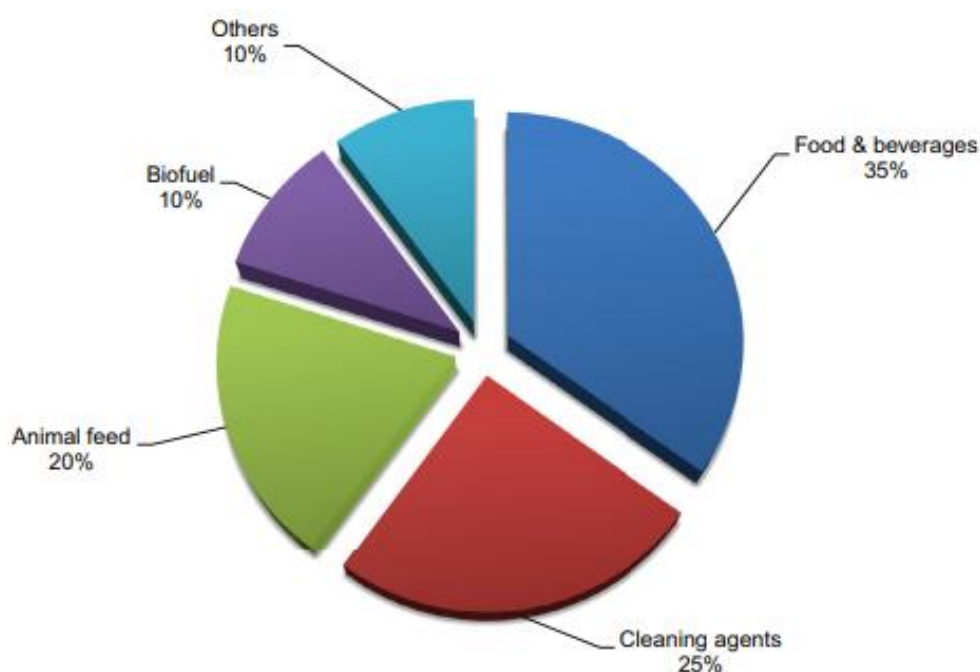
3.5 Mercado Enzimático

O mercado de enzimas biotecnológicas está dividido em dois grupos: enzimas industriais e enzimas especiais. A principal diferença entre os dois é o grau de pureza das preparações enzimáticas, o que interfere no seu preço final, tornando as enzimas especiais com valor de mercado superior às industriais (Bon, E.; Corvo et al., 2008).

O mercado global de enzimas foi avaliado em US\$ 7,1 bilhões em 2017 e deverá chegar a mais de US\$ 10,5 bilhões em 2024, com uma taxa de crescimento anual de 5,7% de 2018 a 2024, estimou-se que cerca de 70% da quota de mercado de enzimas era produzida por microrganismos (Papadaki et al., 2020).

Alimentos e bebidas são a maior aplicação para enzimas industriais. A demanda global por alimentos processados combinada com um tremendo aumento na renda per capita da população está impulsionando a demanda por alimentos e bebidas, levando a indústria alimentícia a buscar a otimização de sua produção. Em muitas aplicações no processamento de alimentos, o uso de enzimas melhora significativamente o rendimento e a qualidade do produto obtido (Guerrand, 2017).

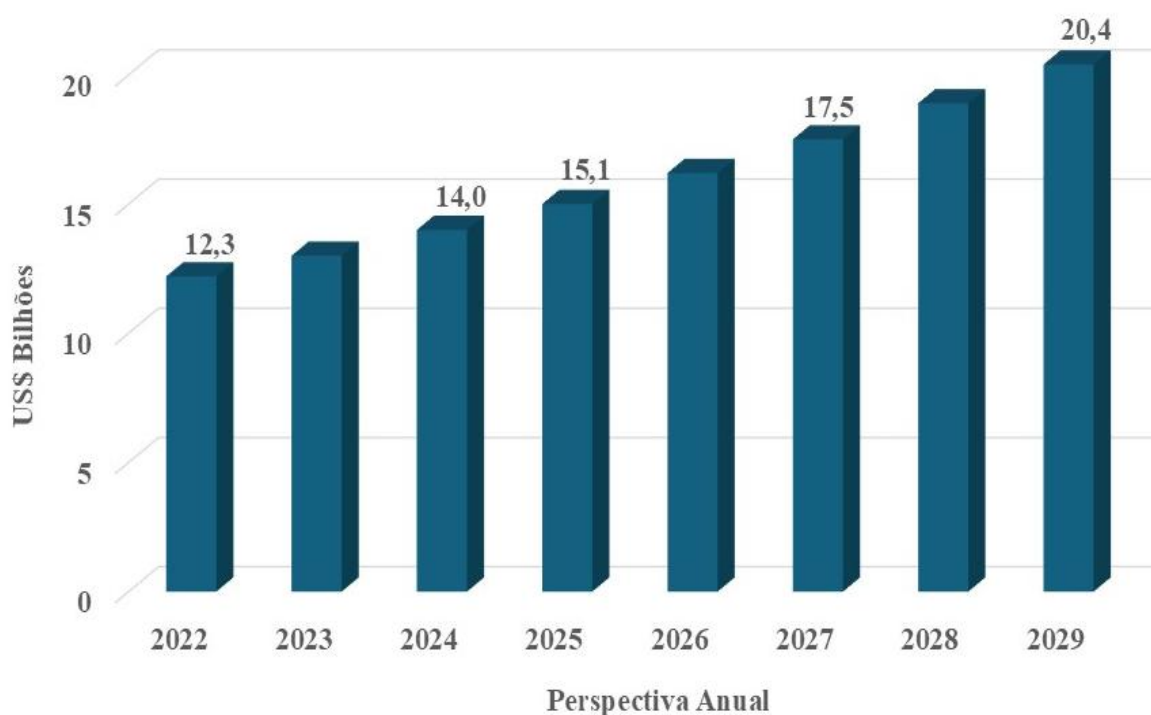
Gráfico 1- Participação no mercado global de enzimas por aplicação.



Fonte: Guerrand (2017)

No total, as aplicações em alimentos e rações respondem por 55 a 60% do mercado global de enzimas, e o mercado é crescente Guerrand (2017). De acordo com a Grand View Research (2023) o valor econômico gerado pela indústria de enzimas foi estimado em aproximadamente US\$ 12,28 bilhões em 2022. Essa produção econômica é uma fusão de categorias de enzimas industriais e enzimas especiais. Markets and Markets (2024), previu que o tamanho do mercado global de enzimas é estimado em US\$ 14,0 bilhões até 2024 e deve atingir US\$ 20,4 bilhões até 2029, com uma taxa de crescimento anual composta de 7,8%.

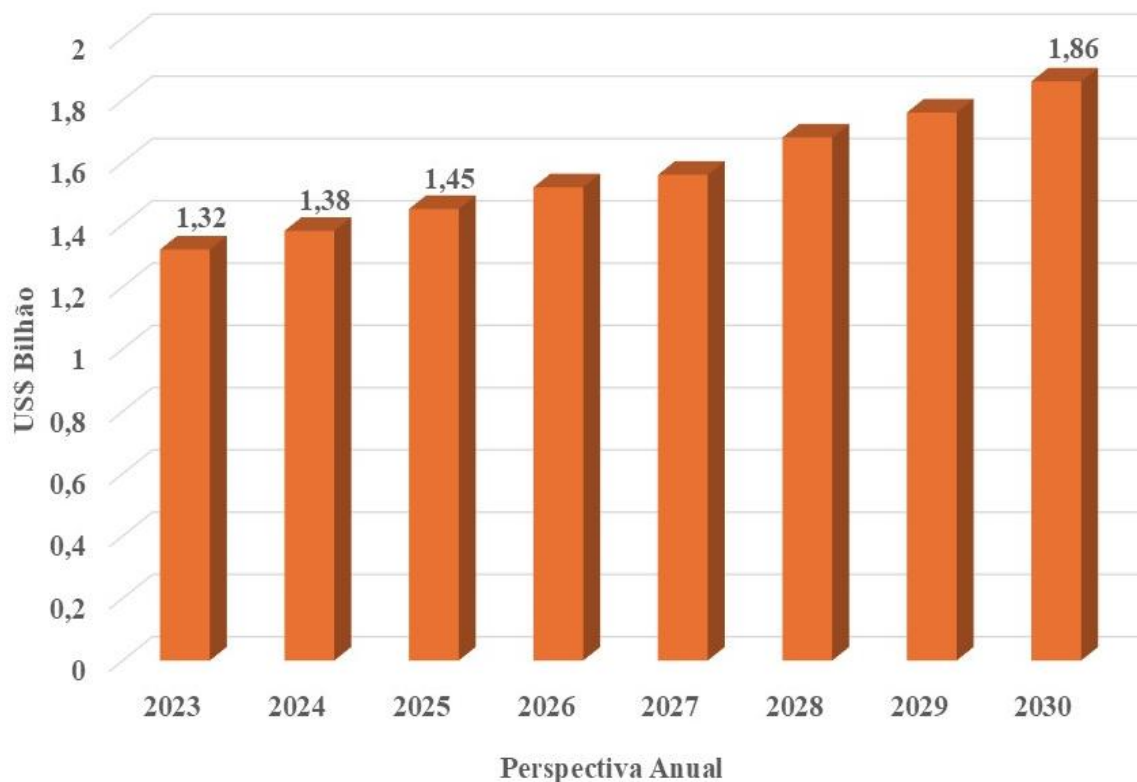
Gráfico 2. Gráfico do mercado global de enzimas.



Fonte: Adaptado de Grand View Research (2023) e Markets and Markets (2024).

Grand View Research (2024) relata que o tamanho do mercado global de enzimas para ração animal foi avaliado em US\$ 1,32 bilhão em 2023 e está projetado para crescer a uma taxa de crescimento anual composta de 5,0% de 2024 a 2030, devido à rápida expansão do setor pecuário que impulsiona a demanda por aprimoramento nutricional e eficiência de digestão.

Gráfico 3. Gráfico do Mercado global de enzimas para ração animal.



Fonte: Adaptado de Grand View Research (2024).

Segundo Kocabaş e Grumet (2019), a América do Norte e a Europa respondem juntas por 70% do mercado de enzimas industriais. As enzimas hidrolíticas respondiam por 75% do mercado mundial desses biocatalizadores, sendo que 70% das vendas mundiais são de carboidrases, proteases e lipases (LI et al., 2012).

Dentre essa gama de enzimas usadas pela indústria ganham importância as amilases, celulases, pectinases e xilanases. Essas hidrolases, têm diversas aplicações e podem funcionar de forma sinérgica na bioconversão de material lignocelulósico (Agrawal; Yadav; Mahajan, 2016; Li et al., 2014).

Desde a década passada, a celulase é a terceira enzima mais utilizada na indústria em vários processos, atrás apenas das proteases e amilases, e é a segunda maior enzima industrial em volume de dólar, cuja demanda está aumentando por aplicações industriais (Gaete; Teodoro; Martizano, 2020).

3.6 Aplicação Biotecnológica na Alimentação Animal

As pesquisas sobre uso de enzimas na alimentação animal são realizadas há décadas, relatadas a quase um século, em 1925 por Hervey, mostrando benefícios no peso corporal de galinhas da linhagem leghorns (Bedford, 2018). Há registro na literatura de que aditivos enzimáticos alimentares para ruminantes começaram a ser usados na década de 1960 (Burroughs et al., 1960). E comercialmente quase há 40 anos (Bedford, 2018). O uso foi se intensificando nos últimos anos, tornando o seu uso comum nas empresas (Mireles-Arriaga et al., 2015)

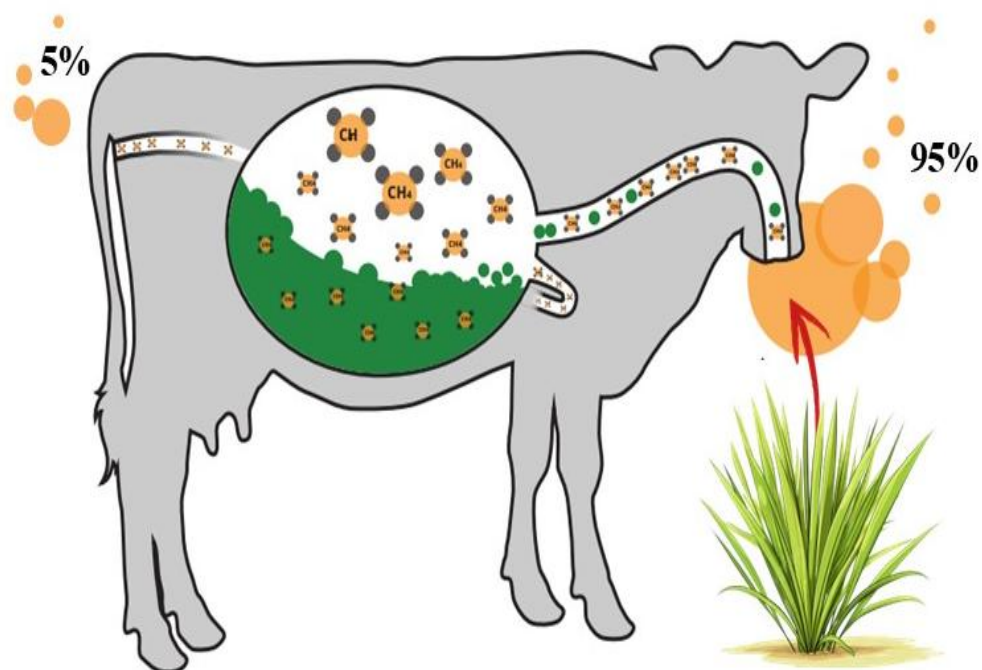
Devido ao aumento da população mundial, a insegurança alimentar é um problema cada vez mais palpável e faz-se necessária a criação de alternativas para uma alimentação mais efetiva de animais e humanos. Assim, os complementos alimentares para animais surgem como uma das alternativas que dialogam com a construção de uma economia circular e sustentável (Jihene et al., 2022; Plouhinec et al., 2022).

Os custos com ração na produção animal são altos, desta forma é essencial o uso de compostos, como aditivos, que possam reduzir tal situação. Os aditivos alimentares são compostos que podem melhorar o desempenho animal (Dalólio, et al, 2016), destacando-se as enzimas que melhoram a digestão de nutrientes. As enzimas exógenas são classificadas como aditivos zootécnicos e estão no grupo de aditivos digestivos (Brasil, 2004).

A avicultura é a maior utilizadora de enzimas auxiliando a melhorar a digestão dos nutrientes (Alagawany, et al., 2018). Além disso, o uso de enzimas exógenas, reduz suplementação de fósforo inorgânico, (Delmachio, 2018) melhoram a eficiência de crescimento, produção de ovos, previnem doenças (Pirgozliev, et al., 2019) também diminuem a excreção de nutrientes e excesso de nitrogênio, zinco e cobre no ambiente e reduz a excreção de fósforo nas excretas (Alagawany et al., 2018).

Os benefícios que os aditivos enzimáticos têm apresentado nos animais são: melhora na produção e no rendimento do leite e diminuição de gordura (Savela et al., 2022); maior capacidade de digestão de fibras e disponibilidade de nutrientes; ganho de peso (Jihene et al., 2022; Savela et al. 2022; Plouhinec et al., 2023); maior eficiência do processo fermentativo no rúmen (Mendowski et al., 2020); menor utilização de antibióticos e modulação da microbiota intestinal na diminuição de inflamações (Plouhinec et al., 2023); menor gasto de energia (Savela et al., 2022); e diminuição na produção de gás metano entérico (Vallejo-Hernández et al., 2018).

Figura 10. Representação da produção de metano entérico por bovinos.



Fonte: Adaptado Sustainable Dairy, 2017.

Bhasker et al. (2013), pesquisando ovelhas, registraram as seguintes melhorias: maior digestibilidade, conservação do fluido ruminal e despolimerização de compostos recalcitrantes, como lignina, que incentivou o crescimento microbiano pela maior disponibilidade de açúcares. Todos os aumentos foram notados sob suplementação de celulases e xilanases, porém o rebanho não apresentou ganho de peso.

Búfalos mostraram uma melhora na ingestão de massa seca e, conseqüentemente, uma evolução na digestão e uma produção de leite vantajosa e com maior presença de ácidos graxos considerados saudáveis (Morsy et al., 2016; Azzaz et al., 2021).

As principais metas da suplementação enzimática para os animais são: Remover ou destruir os fatores antinutricionais dos alimentos, principalmente grãos; aumentar a digestibilidade total da ração; potencializar a ação das enzimas endógenas e diminuir a poluição ambiental causada pelo excesso de nutrientes excretados nas fezes.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou a influência dos fatores abióticos sobre a atividade enzimática de actinobactéria, ressaltando seu potencial biotecnológico em diversos setores industriais. Dentre as aplicações abordadas, destaca-se a crescente utilização desses microrganismos na produção de enzimas e metabólitos secundários que podem ser empregados na alimentação animal.

A biotecnologia aplicada à nutrição animal tem avançado significativamente com a exploração de microrganismos do solo, como as actinobactérias, para a produção de enzimas que melhoram a digestibilidade de ingredientes vegetais, aumentam a eficiência alimentar e reduzem a excreção de compostos nitrogenados no ambiente. Enzimas como celulasas, amilases, proteases e fitases, produzidas por actinobactérias, têm sido incorporadas em rações para otimizar a absorção de nutrientes e promover um crescimento mais sustentável dos animais. Além disso, a produção de prebióticos e promotores de crescimento microbianos derivados dessas bactérias contribui para a modulação da microbiota intestinal, fortalecendo a saúde e o desempenho zootécnico dos rebanhos.

Portanto, a exploração de actinobactérias na alimentação animal representa uma estratégia promissora para o desenvolvimento de soluções sustentáveis na produção animal. O avanço das pesquisas nesse campo pode contribuir para a redução do uso de antibióticos como promotores de crescimento, minimizando impactos ambientais e garantindo maior segurança alimentar. Assim, recomenda-se o aprofundamento de estudos sobre a viabilidade econômica e os mecanismos de ação das enzimas microbianas no metabolismo animal, consolidando o papel da biotecnologia na inovação do setor agropecuário.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, S.; YADAV, R. D.; MAHAJAN, R. Synergistic effect of xylanopectinolytic enzymes produced by a bacterial isolate in bleaching of plywood industrial waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 118, p. 229-233, 1 abr. 2016.
- ALAGAWANY, M.; ELNESR, S.S.; FARAG, M.R. The role of exogenous enzymes in promoting growth and improving nutrient digestibility in poultry. **Iranian Journal of Veterinary Research**, v.19, n.3, p.157–164, 2018.
- ALVAREZ, A. et al. Actinobacteria: current research and perspectives for bioremediation of pesticides and heavy metal. **Chemosphere**, v. 166, p. 41-62, 2017.
- Alves, D., Silva, V. M., Garcia, F., Martins, S. C., & Martins, C. Produção de celulase e amilase por actinobactérias do semiárido brasileiro. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 24, 2016.
- ANDREOLA, F.; FERNANDES, S. A. P. Microbiota do solo e qualidade ambiental. A **Microbiota do Solo na Agricultura Orgânica e no Manejo das Culturas**. Campinas: Instituto Agronômico, p. 21, 2007.
- AZZAZ, H. H.; ABD ELTAWAB, A. M.; KHATTAB, M. S. A.; SZUMACHER-STRABEL, M.; CIESLAK, A.; MURAD, H. A.; KIELBOWICZ, M.; EL-SHERBINY, M. Effect of cellulase enzyme produced from *Penicillium chrysogenum* on the milk production, composition, amino acid, and fatty acid profiles of Egyptian buffaloes fed a high-forage diet. **Animals**, v. 11, n. 11, p. 3066, 2021
- BAJAJ P; MAHAJAN R. Cellulase and xylanase synergism in industrial biotechnology. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 103, p. 8711–8724, 2019.
- Barka EA, Vatsa P, Sanchez L, et al. Taxonomia, fisiologia e produtos naturais de actinobactérias. **Microb Mol Biol Sci**. 2016; 80:1–43.
- BARKA, E. A., VATSA, P., SANCHEZ, L., GAVEAU-VAILLANT, N., JACQUARD, C. Taxonomy, physiology, and natural products of Actinobacteria. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v.80, n.1, p.1-43, 2016.
- BASHIROVA A; PRAMANIK S; VOLKOV P; ROZHKOVA A; SCHWANEBERG U; DAVARI M. Disulfide Bond Engineering of an Endoglucanase from *Penicillium*

verruculosum to Improve Its Thermostability. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 7, p. 1602, 2019.

BEDFORD, M.R. The evolution and application of enzymes in the animal feed industry: the role of data interpretation. **British Poultry Science**, v.59, n.5, p.486- 493, 2018.

BERNARDO, G. R. B. “Atividade Antifúngica de Actinobactérias Da Rizosfera de Terminalia fagifolia (Bioma Caatinga) Ativas Contra Candida Spp.” Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Pernambuco. 2012.

BHASKER, T. Vijay; NAGALAKSHMI, D.; RAO, D. Srinivasa. Development of Appropriate Fibrolytic Enzyme Combination for Maize Stover and Its Effect on Rumen Fermentation in Sheep. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 26, n. 7, p. 945–951, 2013.

Bhatia, S.K.; Vivek, N.; Kumar, V.; Chandel, N.; Thakur, M.; Kumarf, D.; Yang, Y.; Pugazendhi, A.; Kumar, G.; Molecular biology interventions for activity improvement and production of industrial enzymes. **Bioresource Technology**, 324 (2021). Acesso em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124596>.

BON, E. & CORVO, LUISA & VERMELHO, ALANE & PAIVA, C.L.A. & FERRARA, MARIA & COELHO, ROSALIE & ALENCASTRO, RICARDO. Enzimas em Biotecnologia: Produção, Aplicações e Mercado. Rio de Janeiro: **Interciência Ltda**, 2008.

BON, E.P.S.; FERRARA, M.A.; CORVO, M.L. Enzimas em biotecnologia – produção, aplicações e mercado. Rio de Janeiro: **Editora Interciência**, 506p, 2008.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução Normativa nº 13 de 30 de novembro de 2004**. Disponível em:<<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-pecuarios/alimentacao-animal/arquivos-alimentacao-animal/legislacao/instrucao-normativa-no-13-de-30-de-novembro-de-2004.pdf/view>> Acesso em: 12 Dez. 2024.

CASTRO, A. M.; PEREIRA JR, N. Produção, propriedades e aplicação de celulases na hidrólise de resíduos agroindustriais. **Química Nova**, v. 33, n. 1, p. 181–188, 2010.

CAVALCANTE, F et al. Actinobactérias Benéficas do Solo: Potencialidades De Uso Como Promotores De Crescimento Vegetal. **Enciclopedia Biosfera**, [S. l.], v. 19, n. 40, 2022.

CEREDA, M.P.; VILPOUX, O.; DEMIATE, I.M. Amidos Modificados. In: CEREDA, M.P. Tecnologia, usos e potencialidades de tuberosas amiláceas Latino Americanas. :Fundação Cargill, 2001. p.246-333.

Colla LM, Reinehr CO, Costa JAV. 2012. Aplicações e produção de lipases microbianas. **Revista CIATEC**.

COSTANTINI, A.; CALIFANO, V. Lipase immobilization in mesoporous silica nanoparticles for biofuel production. **Catalysts**, v. 11, n. 5, p. 629, 2021. DOI: 10.3390/catal11050629.

DALÓLIO, F.S.; MOREIRA, J.; VAZ, D.P.; ALBINO, L.F.T.; VALADARES, L.R.; PIRES, A.V.; PINHEIRO, S.R.P. Enzimas exógenas em dietas para frangos de corte. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.17, n.2, p.149-161, 2016

DELMASCHIO, I.B. Enzimas na alimentação de animais monogástricos. **Revista Científica de Medicina Veterinária - UNORP**, v. 2, n. 1, p.6-20, 2018.

EJAZ U., MOIN S. F., SOHAIL M., MERSAL G. A. M., IBRAHIM M. M., EL-BAHY S. M., Characterization of a novel end product tolerant and thermostable cellulase from *Neobacillus sedimentimangrovi* UE25, **Enzyme and Microbial Technology**, Volume 45 162, 2023, 110133, ISSN 0141-0229, <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2022.110133>.

EL MENOIFY, H. A.; GOMAA, S. K.; HAROUN, A. A.; FARAG, A. N.; SHAFEI, M. S. et al. Comparative studies of free and immobilized partially purified lipase from *Aspergillus niger* NRRL-599 produced from solid-state fermentation using gelatincoated titanium nanoparticles and its application in textile industry. **Egyptian Pharmaceutical Journal**, v. 21, n. 2, p. 143, 2022.

ELBENDARY, A. A. et al. Isolation of antimicrobial producing actinobacteria from soil samples. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 25, n. 1, p. 44-46, 2018.

GAETE, A. V.; TEODORO, C. E. S.; MARTINAZO, A. P. Utilização de resíduos agroindustriais para produção de celulase: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, 2020.

GARG, A. et al. Low molecular weight thiols: glutathione (GSH), mycothiol (MSH) potential antioxidant compound from actinobactéria. **Journal of Applied Pharmaceutical Science**, v. 3, n. 9, p. 117-120, 2013.

GOODFELLOW, M.; FIEDLER, H. A guide to successful bioprospecting: informed by actinobacterial systematics. **Antonie Van Leeuwenhoek**, v. 98, n. 2, p. 119-142, 2010.

GRAND VIEW RESEARCH. **Animal Feed Enzymes Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Phytases, Proteases) By Formulation, By Application (Poultry, Pigs), By Region And Segment Forecasts, 2024 – 2030**. 2024. Disponível em: < <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/animal-feed-enzymes-industry>> Acesso em 12 jan. 2025.

GRAND VIEW RESEARCH. **Enzymes Industry Data Book - Industrial Enzymes and Specialty Enzymes Market Size, Share, Trends Analysis, And Segment Forecasts, 2023 - 2030**. 2023. Disponível em: < <https://www.grandviewresearch.com/sector-report/enzymes-industry-data-book#>> Acesso em 19 nov. 2024.

GUERRAND, David. Lipases industrial applications: focus on food and agroindustries. **OCL Oilseeds and fats crops and lipids**, v. 24, n. 4, p. D403, 2017.

GUPTA, R; MOHAPATRA, H; GOSWAMI, V.K.; CHAUHAN, B. Microbial α Amylases: a biotechnological perspective. **Process Biochemistry**, v. 38, n. 11, p. 1- 18, 2003.

HASANAH, U.; SANI, N. D. M.; HENG, L. Y.; IDROES, R.; SAFITRI, E. Construction of a hydrogel pectin-based triglyceride optical biosensor with immobilized lipase enzymes. **Biosensors**, v. 9, n. 4, p. 135, 2019. DOI: 10.3390/bios9040135.

JANARDHAN, A., KUMAR A.P., VISWANATH, B., SAIGOPAL, D.V.R., NARASIMHA, G. Production of bioactive compounds by Actinomycetes and their antioxidant properties. **Biotechnology Research International**, p. 1-8, 2014.

JIHENE, J.; KHALIL, A.; SAMIA, B. S.; HELA, Y.; ATEF, M.; JAMEL, R.; MOHAMED, K. Effect of fibrolytic enzyme supplementation of urea-treated wheat straw on nutrient intake, digestion, growth performance, and blood parameters of growing lambs. **Small Ruminant Research**, v. 217, Article 106840, 2022.

KOCABAŞ, D. S.; GRUMET, R. Evolving regulatory policies regarding food enzymes produced by recombinant microorganism. **GM crops & food**, v. 10, n. 4, p. 191- 207, 5 ago. 2019.

LAMBAIS, M.R; CURY, J.C.; MALUCHE-BARETTA, C.R.D.; BÜLL, R.C. Diversidade microbiana nos solos: definindo novos paradigmas. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, v. 4, p. 43-84, 2005.

Li S, Yang X, Yang S, Zhu M, Wang X. 2012. Thechnology Prospecting on Enzymes: Application, Marketing and Engineering. **Computational and Structural Biotechnology Journal**. e201209017.

LI, J. et al. Synergism of cellulase, xylanase, and pectinase on hydrolyzing sugarcane bagasse resulting from different pretreatment technologies. **Bioresource Technology**, v. 155, p. 258-265, mar. 2014.

LI, Qinyuan et al. Morphological Identification of Actinobacteria. *Actinobacteria - Basics and Biotechnological Applications*, [s.l.], p.59-86, 2016.

LIU, X.; KOKARE, C. Chapter 11 - Microbial Enzymes of Use in Industry. **Biotechnology of Microbial Enzymes**, p. 267 – 298, 2017.

LOPES, J. B. A. C., SILVA, V. M. A., CAVALCANTE, F. G., MARTINS, S. C. S., MARTINS, C. M. produção de enzimas hidrolíticas extracelulares por actinobactérias oriundas do solo e serrapilheira de região semiárida. **Enciclopédia Biosfera**. v.15, n.27, p.35-50, 2018.

MARKETS AND MARKETS. **Enzymes Market by Procuct Type (Industrial Enzymes and Specialty Enzymes), source (Microorganism, plant, and animal), Type, Industrial Enzyme Application, Specialty Enzyme Application, Reaction Type and Region – Global Forecast to 2029.** 2024. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/enzyme-market-46202020.html>> Acesso em: 22 Fev. 2025.

MARQUES, Jéssyca da Silva. **Caracterização cultural, morfológica e enzimática de actinobactérias de áreas cultivadas de Ubajara.** 2022. 68 f. Monografia (Graduação em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

MATOS NETO, João Moreira de. **Bioprospecção de enzimas de interesse biotecnológico a partir de actinobactérias isoladas do semiárido nordestino.** 2022. 128 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Biotecnologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

MELO, I. S. **Biodiversidade e Bioprospecção de micro-organismos da Caatinga.** In: FÓRUM DE APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS DE PESQUISA: AVANÇOS E OPORTUNIDADES, Campinas. Anais. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2014. RE014, 4 p.

MENDOWSKI, S.; CHAPOUTOT, P.; CHESNEAU, G.; FERLAY, A.; ENJALBERT, F.; CANTALAPIEDRA-HIJAR, G.; GERMAIN, A., NOZIÈRE, P. Effects of pretreatment with reducing sugars or an enzymatic cocktail before extrusion of fava bean on nitrogen metabolism and performance of dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 103, n. 1, p. 396-409, 2020.

MIRELES-ARRIAGA, A.I.; ESPINOSA-AYALA, E.; HERNANDEZ-GARCIA, P.A.; MARQUEZ-MOLINA, O. Use of exogenous enzyme in animal feed. **Life Science Journal**, v. 12, n. 2, p. 23-32, 2015.

Monteiro VN, Silva RN. 2009. Aplicações Industriais da Biotecnologia Enzimática. **Processos Químicos**. 1981-8521.

MORSY, Tarek A.; KHOLIF, Ahmed E.; KHOLIF, Sobhy M.; et al. Effects of Two Enzyme Feed Additives on Digestion and Milk Production in Lactating Egyptian Buffaloes. **Annals of Animal Science**, v. 16, n. 1, p. 209–222, 2016.

MOUJEHED, E.; ZARAI, Z.; KHEMIR, H.; MILED, N.; BCHIR, M. S. et al. Cleaner degreasing of sheepskins by the *Yarrowia lipolytica* LIP2 lipase as a chemical-free alternative in the leather industry. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 211, p. 112292, 2022. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2021.112292.

MUNOZ-ROJAS M.; ERICKSONA, T. E.; MARTINIA, D. DIXONA, K. W.; MERRITTA, D. J. Soil physicochemical and microbiological indicators of short-, medium- and long-term post-fire recovery in semi-arid ecosystems. **Ecological Indicators**, v. 63, p. 14–22, 2016.

Nazari, Mateus Torres et al. “Use of soil actinomycetes for pharmaceutical, food, agricultural, and environmental purposes.” **3 Biotech vol.** 12,9 (2022): 232. doi:10.1007/s13205-022-03307-y

NELSON, D. L.; COX, M. M. Princípios de Bioquímica de Lehninger. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2014. 1298p. il. color.

Ngamcharungchit C, Chaimusik N, Panbangred W, Euanorasetr J, Intra B. Metabólitos bioativos de actinomicetos terrestres e marinhos. **Moléculas**. 2023; 28(15):5915. <https://doi.org/10.3390/molecules28155915>.

OLIVEIRA, T. **Avaliação da produção de enzimas celulolíticas por fungos isolados da região dos campos gerais**. 2020. 70 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Biotecnologia, Universidade Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.

- PAPADAKI, E. et al. Feasibility of multi-hydrolytic enzymes production from optimized grape pomace residues and wheat bran mixture using *Aspergillus niger* in an integrated citric acid-enzymes production process. **Bioresource Technology**, v. 309, p. 123317, ago. 2020.
- PEREIRA, A. S. et al. Metodologia da pesquisa científica. Santa Maria: UFSM, NTE, 2018.
- PIRGOZLIEV, V.; ROSE, S.P.; IVANOVA, S. Feed additives in poultry nutrition. **Bulgarian Journal of Agricultural Science**, v.25, p.8-11, 2019.
- PLOUHINEC, L.; NEUGNOT, V.; LAFOND, M; BERRIN, J.-G..Carbohydrate-active enzymes in animal feed. **Biotechnology Advances**, v. 65, article 108145, 2022.
- QIN, S.; XING, K.; JIANG, J. H.; XU, L. H.; LI, W. J. “Biodiversity, Bioactive Natural Products and Biotechnological Potential of Plant-associated Endophytic Actinobacteria.” **Applied Microbiology and Biotechnology**, 89 (3): 457–73. 2011.
- RACHMADONA, N.; HARADA, Y.; AMOAH, J.; QUAYSON, E.; AZNURY, M. et al. Integrated bioconversion process for biodiesel production utilizing waste from the palm oil industry. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 3, p. 107550, 2022. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107550.
- RAMOS, Karoline Alves. Efeito de fatores abióticos sobre a atividade enzimática de actinobactérias do semiárido. 2017. 38 f. TCC (Graduação em Ciências Biológicas) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- RANJANI, A.; DHANASEKARAN, D.; GOPINATH, M. An Introduction to Actinobacteria. **Actinobacteria - Basics and Biotechnological Applications**, [s.l.], p.3-37, 2016.
- Rawlings, N. D., & Bateman, A. Origins of peptidases. **Biochimie**, v. 166, p. 4-18, 2019.
- RAWLINGS, Neil D.; BATEMAN, Alex. Origens das peptidases. **Biochimie** , v. 166, p. 4-18, 2019.
- RIGO, D.; GAYESKI, L.; TRES, G. A.; CAMERA, F. D.; ZENI, J.; VALDUGA, E.; CANSIAN R. L.; BACKES, G. T. Produção Microbiológica de Enzimas: uma Revisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 9232-9254, 2021.
- ROCHA, Igor Ferreira da. Efeito da temperatura e pH sobre a atividade enzimática em cepas de actinobactérias com potencial uso industrial. 2022. 44 f. Monografia (Graduação em Biotecnologia) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

RODRIGUES, J. G. C. et al. Production of cellulases by actinobacteria cultivated on different substrates. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 10636-10646, 2019.

Romeu, Erika & Cavalcante, Fernando & Martins, Claudia & Martins, Suzana. (2021). ATIVIDADE LIPOLÍTICA IN VITRO DE ACTINOBACTÉRIAS EM GRADIENTE DE PH, SALINIDADE E TEMPERATURA. **Enciclopédia Biosfera**. 18. 10.18677/EnciBio_2021D7.

SAINI, A.; AGGARWAL, N. K. Environmental Effects Enhanced endoglucanase production by soil inhabiting *Streptomyces* sp. strain NAA9 using lignocellulosic biomass. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 41, n. 13, p. 1630–1639, 2019.

SALWAN, R.; SHARMA, V. Molecular and biotechnological aspects of secondary metabolites in actinobacteria. **Microbiological Research**, [s. l], v. 231, p. 126374, jan. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micres.2019.126374>

SANTANA, M., S. Produção, caracterização, aplicação e determinação estrutural de celulase de *Moniliophthora perniciosa*. **Dissertação: Universidade Estadual de Feira de Santana**. Programa de Pós-graduação em Biotecnologia, 2010.

SANTOS G., FILHO Á., RODRIGUES J., SOUZA R. (2022). Cellulase production by *Aspergillus niger* using urban lignocellulosic waste as substrate: Evaluation 53 of different cultivation strategies. *Journal of Environmental Management*. 305. 114431.

SATHYA, A.; VIJAYABHARATHI, R.; GOPALAKRISHNAN, S. Plant growth-promoting actinobacteria: a new strategy for enhancing sustainable production and protection of grainlegumes. **3 Biotech**, v. 7, n. 2, p. 102, 2017.

SAVELA, M. F. B.; NOSCHANG, J. P.; BARBOSA, A. A.; FEIJÓ, J. de O.; RABASSA, V. R.; SCHMITT, E.; PINO, F. A. B. D.; CORRÊA, M. N.; BRAUNER, C. C. Supplementation of a dried, fungal fermentation product with fibrolytic enzymatic activity in the diet of dairy cows on feeding behavior, metabolic profile, milk yield, and milk composition. **Livestock Science**, v. 260, article 104945, 2022.

SELIM, M.S.M et al. Secondary metabolites and biodiversity of actinomycetes. **Journal of Genetic Engineering and biotechnology**, v. 19, n. 1, p. 72, 2021.

SHARMA, S.; SHARMA, V.; KUILA, A. Cellulase production using natural medium and its application on enzymatic hydrolysis of thermo chemmically preteated biomass. **3 Biotech**, v. 6, n. 2, p. 139, 2016.

SILVA, E. C. **Produção, purificação e formulação de amilase e sua aplicação em panificação**. 2017, 165 f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SILVA, V. M. A. et al. Cross-Feeding among soil bacterial populations: selection and characterization of potential bio-inoculants. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 5, p.23-34, 2019.

SILVA, V. M. A.; BRITO, F. A. E.; RAMOS, K. A.; SILVA, R. M.; MARTINS, C. M.; MARTINS, S. C. S. Atividade enzimática de actinobactérias do semiárido. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 560-572, 2015.

SOUSA, C. A. “Solubilização de Fósforo Por Bactérias Endofíticas”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2010.

SOUTO, L. R. F. **Utilização do amido da casca de mandioca na produção de vinagre: características físico-químicas e funcionais**. Goiânia, 128 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

SOUZA, L. H.; FERREIRA NOVAIS, R.; ALVAREZ V, V. H.; ALBUQUERQUE VILLANI, E. M. D. Efeito do pH do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na absorção de boro, cobre, ferro, manganês e zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1641- 1652, 2010.

SOUZA, P. M. D. et al. A biotechnology perspective of fungal proteases. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 46, n. 2, p. 337-346, 2015. ISSN 1517-8382.

SPIER, M.R. **Produção de enzimas amilolíticas fúngicas α -amilase e amiloglucosidase por fermentação em estado sólido**. 2005. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Alimentos, Programa de Pós- Graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SUSTAINABLE DAYRE. **Mitigation of Enteric Methane Emissions from Dairy Cows**. 2017. Disponível em:

<<http://www.sustainabledairy.org/publications/Documents/Mitigation%20of%20enteric%20methane%20emissions%20from%20dairy%20cows.pdf>> Acesso em: 05 jan. 2025.

TAN, L. T. H. et al. Antioxidative Potential of a *Streptomyces* sp. MUM292 Isolated from Mangrove Soil. **BioMed research international**, v. 2018, 2018.

TANVIR, R.; SAJID, I.; HASNAIN, S. Biotechnological potential of endophytic actinomycetes associated with Asteraceae plants: isolation, biodiversity and bioactivities. **Biotechnology letters**, v. 36, n. 4, p. 767-773, 2014

TORRES, Maria Alejandra Ferreira. **Análise genômica de *Streptomyces olindensis* DAUFPE 5622 e de suas vias crípticas para a obtenção de novos metabólitos secundários de interesse biotecnológico**. Dissertação (Tese de Doutorado). Universidade de São Paulo, 2015.

VALLEJO-HERNÁNDEZ, L. H.; ELGHANDOUR, M. M. Y.; GREINER, R.; ANELE, U. Y.; RIVAS CÁCERES, R. R.; BARROS-RODRÍGUES, M.; ABDELFATTAH, Z. M. Environmental impact of yeast and exogenous xylanase on mitigating carbon dioxide and enteric methane production in ruminants. **Journal of cleaner production**, v. 189, p. 40-46, 2018.

VANLEEuw, E.; WINDERICKX, S.; THEVISSen, K.; LAGRAIN, B.; DUSSELIER, M. et al. Substrate-specificity of *Candida rugosa* lipase and its industrial application. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 7, n. 19, p. 1582815844, 2019. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b03257.

VELAYUDHAM, S.; MURUNGAN, K. Diversity and antibacterial screening of actinomycetes from javadi hill forest soil, Tamilnadu, India. **Journal of Microbiology Research**. v. 2, n.2, p. 41- 46, 2012.

Vieira, Filipe & Cavalcante, Fernando & Santos, Franciandro & Martins, Suzana & Martins, Claudia. (2021). EFEITO DA QUEIMADA SOBRE A ATIVIDADE ENZIMÁTICA EXTRACELULAR DE CEPAS DE ACTINOBACTÉRIAS ISOLADAS DE SOLO DA REGIÃO SEMIÁRIDA DO CEARÁ. **Enciclopédia Biosfera**. 18. 10.18677/EnciBio_2021D23.

WANG X; PEI D; TENG Y; LIANG J. Effects of enzymes to improve sensory quality of frozen dough bread and analysis on its mechanism. **Journal of Food Science and Technology**, v. 55, n. 1, p. 389–398, 2018

WEBER, T. et al. Metabolic engineering of antibiotic factories: new tools for antibiotic production in actinomycetes. **Trends in Biotechnology**, v. 33, n. 1, p. 15-26, 2015.

WHISTLER, R. L.; DANIEL, J. R. Starch. Kirk Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2000. DOI: 10.1002/0471238961.1920011823080919.a01

YAGUE, P.; LÓPEZ-GARCÍA, M. T.; RIOSERAS, B.; SÁNCHEZ, J.; MANTECA, Á. “Pre-Sporulation Stages of Streptomyces Differentiation: State-of-the-Art and Future Perspectives.” **FEMS Microbiology Letters**, 342 (2): 79–88. 2013.