

Atividade enzimática da amilase e fosfatase ácida no sistema solo-planta

Enzymatic activity of amylase and acid phosphatase in the soil-plant system

Actividad enzimática de la amilasa y la fosfatasa ácida en el sistema suelo-planta

Recebido: 15/07/2025 | Revisado: 31/07/2025 | Aceitado: 01/08/2025 | Publicado: 02/08/2025

Marília Layse Alves da Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7282-9617>

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Brasil

E-mail: marilialayse237@gmail.com

Sivaldo Soares Paulino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5173-6462>

Universidade Federal de Alagoas, Brasil

E-mail: sivaldo.paulino@arapiraca.ufal.br

Aldenir Feitosa dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6049-9446>

Centro Universitário Cesmac, Brasil

E-mail: aldenirfeitosa@gmail.com

Mabel Alencar do Nascimento Rocha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7769-5002>

Universidade Estadual de Alagoas, Brasil

E-mail: mabelalencar@hotmail.com

Gabriel Maurício Peruca de Melo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1634-4145>

Universidade Brasil, Brasil

E-mail: Gabriel.melo@ub.edu.br

Wanderley José de Melo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2683-0347>

Universidade Brasil, Brasil

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Brasil

E-mail: wanderley.melo@ub.edu.br

Liandra Maria Abaker Bertipaglia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5811-7816>

Universidade Brasil, Brasil

E-mail: Liandra.bertipaglia@ub.edu.br

Resumo

Bioindicadores, também conhecidos como indicadores biológicos, são ferramentas vitais para a avaliação da qualidade do solo. Eles atuam de forma eficaz, ajudando a mitigar impactos negativos na biota edáfica. Este estudo teve como objetivo principal destacar a atividade enzimática das amilases e das fosfatases ácidas no solo, investigando e esclarecendo sua atuação crucial. A metodologia empregada foi uma revisão integrativa quantitativa, com buscas realizadas nas bases de dados Google Acadêmico e SciELO. Foram considerados estudos publicados entre 2020 e 2025, em português e inglês. Compreender a atividade dessas enzimas é fundamental. A amilase, por exemplo, é notável por sua alta resistência a condições adversas como elevadas concentrações de sais, variações de pH e temperatura, além da presença de solventes orgânicos. Ela apresenta excelente estabilidade e atividade catalítica eficiente, sendo agrupada em α -amilase e β -amilase, que se diferenciam principalmente na síntese do amido. As fosfatases, por sua vez, são responsáveis pela catalisação da hidrólise de ésteres e anidridos de ácido fosfórico. Elas podem ser subdivididas em fosfatases ácidas e alcalinas, distinguindo-se pelo pH de atuação. As fosfatases ácidas são as mais estudadas, especialmente no Brasil, dada a natureza tipicamente ácida dos solos no país. Em síntese, o conhecimento sobre a atividade enzimática permite uma tomada de decisões mais informada no manejo do solo. Essas enzimas são excelentes contribuições para o gerenciamento da velocidade das reações e favorecem o enriquecimento da matéria orgânica, desempenhando um papel essencial no funcionamento do solo.

Palavras-chave: Bioindicadores; Enzimas; Solos brasileiros.

Abstract

Bioindicators, also known as biological indicators, are vital tools for assessing soil quality. They act effectively, helping to mitigate negative impacts on soil biota. This study's main objective was to highlight the enzymatic activity of amylases and acid phosphatases in soil, investigating and clarifying their crucial role. The methodology employed was a quantitative integrative review, with searches conducted in the Google Scholar and SciELO databases. Studies published between 2020 and 2025, in Portuguese and English, were considered. Understanding the activity of these

enzymes is crucial. Amylase, for example, is notable for its high resistance to adverse conditions such as high salt concentrations, pH and temperature variations, and the presence of organic solvents. It exhibits excellent stability and efficient catalytic activity, being grouped into α -amylase and β -amylase, which differ primarily in starch synthesis. Phosphatases, in turn, are responsible for catalyzing the hydrolysis of phosphoric acid esters and anhydrides. They can be subdivided into acid and alkaline phosphatases, distinguished by their pH. Acid phosphatases are the most studied, especially in Brazil, given the typically acidic nature of the country's soils. In short, knowledge of enzymatic activity enables more informed soil management decisions. These enzymes make excellent contributions to managing reaction rates and promote the enrichment of organic matter, playing an essential role in soil function.

Keywords: Bioindicators; Enzymes; Brazilian soils.

Resumen

Los bioindicadores, también conocidos como indicadores biológicos, son herramientas vitales para evaluar la calidad del suelo. Actúan eficazmente, ayudando a mitigar los impactos negativos en la biota del suelo. El objetivo principal de este estudio fue destacar la actividad enzimática de las amilasas y las fosfatasa ácidas en el suelo, investigando y aclarando su papel crucial. La metodología empleada fue una revisión integrativa cuantitativa, con búsquedas realizadas en las bases de datos Google Scholar y SciELO. Se consideraron estudios publicados entre 2020 y 2025, en portugués e inglés. Comprender la actividad de estas enzimas es crucial. La amilasa, por ejemplo, destaca por su alta resistencia a condiciones adversas como altas concentraciones de sal, variaciones de pH y temperatura, y la presencia de disolventes orgánicos. Presenta una excelente estabilidad y una eficiente actividad catalítica, agrupándose en α -amilasa y β -amilasa, que difieren principalmente en la síntesis de almidón. Las fosfatasa, a su vez, son responsables de catalizar la hidrólisis de los ésteres y anhídridos del ácido fosfórico. Se pueden subdividir en fosfatasa ácidas y alcalinas, que se distinguen por su pH. Las fosfatasa ácidas son las más estudiadas, especialmente en Brasil, dada la naturaleza típicamente ácida de los suelos del país. En resumen, el conocimiento de la actividad enzimática permite tomar decisiones más informadas sobre el manejo del suelo. Estas enzimas contribuyen de manera excelente a la gestión de las velocidades de reacción y promueven el enriquecimiento de la materia orgánica, desempeñando un papel esencial en la función del suelo.

Palabras clave: Bioindicadores; Enzimas; Suelos brasileños.

1. Introdução

O solo possui inúmeras contribuições para o funcionamento e a manutenção dos ecossistemas. Sua saúde é crucial para que esses ecossistemas operem de forma resiliente, especialmente diante das adversidades que tendem a provocar alterações diretas nele. Exemplos dessas adversidades incluem o acelerado crescimento populacional, a escassez hídrica, a insegurança alimentar, a elevada liberações de gases poluentes e outras atividades que demonstram práticas insustentáveis e conversão de terras. Tais fatores têm resultado essencialmente em processos erosivos e, conseqüentemente, podem ocasionar a áreas desertificadas com intensas degradações dos ecossistemas vitais e perda da biodiversidade (Nolan et al., 2021).

Manter a integridade do solo caracteriza-se em uma alternativa crucial para a conservação e proteção de todo o sistema edáfico. Há um tempo, a discussão sobre a qualidade do solo apresenta-se relevante, principalmente sobre a sua definição e ao conjunto de indicadores capazes de mensurar a sustentabilidade desses solos. Isso visa a subsidiar a tomada de decisões para a sua reestruturação e manejo (Silva et al., 2021).

Indicadores de qualidade do solo podem ter origem física, química ou biológica. Os indicadores físicos e químicos tendem a ser mais resistentes a variações ambientais em comparação com os biológicos. Estes últimos, por sua vez, são altamente sensíveis a mudanças no solo e possuem ligação direta com outros atributos, tornando-se ferramentas indispensáveis na análise da qualidade do solo. Entre os indicadores biológicos, destacam-se as análises enzimáticas, que participam ativamente da ciclagem de nutrientes, como as fosfatases, arilsulfatase, urease, beta-glucosidase e amilase (Figueiredo Vasconcelos & de Pádua Ferreira, 2018; Nolan et al., 2021).

As enzimas exercem um papel funcional crucial na manutenção do solo, devido suas atividades em catalisar diversas reações químicas. As análises enzimáticas de fornecerem dados reprodutivos relacionados ao manejo empregado sobre os microrganismos, além de indicar o desempenho deste na ciclagem de nutriente, nitrificação, oxidação e demais processos que se relacionam a fertilidade deste solo (Bombonato, 2014).

Este estudo teve como objetivo principal destacar a atividade enzimática das amilases e das fosfatases ácidas no solo, investigando e esclarecendo sua atuação crucial.

2. Metodologia

O presente estudo é de natureza qualitativa, do tipo revisão de literatura (Snyer, 2019) e do tipo específico de revisão narrativa de literatura (Casarin et al., 2020; Rother, 2007) no qual os artigos são selecionados de modo mais livre e sem muito rigor.

A busca científica ocorreu em bases de dados como Google acadêmico e SciELO, por meio dos descritores Amilase, fosfatase ácida e indicadores do solo. Os artigos selecionados foram na língua portuguesa e inglesa, correspondentes aos anos de 2020 a 2025. A exclusão de artigos ocorreu pelos critérios de repetição de temática, sem abordagem específicas ou não correspondentes ao ano.

3. Resultados e Discussão

3.1 Qualidade do Solo

O solo é um recurso natural importante para o funcionamento e equilíbrio dos ecossistemas da terra, devido seus atributos físicos, biológicos e químicos que lhe permite exercer inúmeras atividades relevantes para o meio, esse ambiente corresponde a porção viva com uma vasta biodiversidade e com atividade biológica relevante para a avaliação da fertilidade e estruturação, como também contribui na produção de fibras e alimentos (Silva et al., 2020; Melo et al., 2019).

Seus constituintes exercem influência na fertilidade, através da decomposição de resíduos orgânicos, resultando na incorporação de Matéria orgânica do solo (MOS), ciclagem de nutrientes, fluxo energético, armazenamento e liberação de carbono e nutrientes minerais que serão direcionados para as espécies vegetais predominantes, constituindo assim o sistema solo-planta e microrganismos (Carneiro et al., 2022; Bettiol et al., 2023).

Entretanto, o crescimento populacional, ocasionou na elevada demanda da geração de alimentos, além da intensificação de atividades antrópicas e práticas de manejos inadequados tem resultado gradativamente em danos para esse ambiente produtivo, comprometendo sua capacidade de regeneração de forma natural (Faria et al., 2021; Melo et al., 2021).

Desse modo, inúmeras são as discussões realizadas pela comunidade acadêmica relacionadas às questões ambientais, principalmente futuras, uma vez que as atividades conservacionistas e de preservação para essa microbiota, apresentam-se como um grande desafio, devido à complexidade desse meio (Oliveira et al., 2018; Faria et al., 2021).

Diversas são as definições atribuídas para a qualidade do solo (Tabela 1.), que apesar de haver formas diversas em descrever, observa-se que normalmente é conceituada como a capacidade desse meio funcionar objetivando sustentar e garantir qualidade de desenvolvimento das espécies biológicas e animais, porém, considera-se que a manutenção dos níveis satisfatórios para a qualidade do solo requer de fatores abióticos: clima, solo, planta, manejo e interações (Silva et al. 2021).

Tabela 1 - Definições relacionadas a qualidade do solo sob ponto de vista de diversas literaturas.

Definição	Referência Bibliográfica
A qualidade do solo dependerá da extensão em que o solo funcionará para o benefício humano, de acordo com a composição natural do solo, sendo também fortemente relacionada com as práticas intervencionistas do homem.	Araújo et al. (2012).
A qualidade do solo não se limita ao grau de poluição do solo, mas é comumente definida de forma muito mais ampla como “a capacidade de um solo de funcionar dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover as plantas” e saúde animal”.	Bünemann et al. (2018).
A definição de qualidade do solo como a capacidade de um tipo específico de solo operar, dentro dos limites dos ecossistemas naturais e manejados, na sustentação da produtividade vegetal e animal, na manutenção ou melhoria da qualidade ambiental e no apoio à saúde humana	Camacho et al. (2022).
A qualidade do solo é a capacidade inerente dos solos de funcionar em um ecossistema para manter a produtividade biológica, sustentar a saúde ambiental e promover a condição de vida de plantas e animais que dependem das propriedades do solo	Mirghaed e Souri (2022).

Fonte: Dados da Pesquisa (2022).

A principal forma de mensurar a sustentabilidade da qualidade do solo, se faz através de seus indicadores, que consistem nos químicos, físicos e biológicos, que são considerados uma ferramenta imprescindível para obtenção de informações relacionadas a essa microbiota e seus atributos, para que seja útil na tomada de decisões para a manter a integridade sustentável desse ambiente (Silva et al., 2021; Araújo et al., 2021).

3.2 Indicadores da Qualidade do Solo: Bioindicadores

Práticas intervencionistas para a restauração ativa mínima de ecossistemas tem se apresentado como abordagem de vários estudos, devido a relevância de buscar ferramentas que sejam fundamentais para esse processo, em que se enfatiza o uso de indicadores da qualidade do solo (QS) para promover a orientação das ciências e aplicação de práticas de manejo adequadas (Muñoz-Rojas, 2018).

Os indicadores da qualidade do solo são categorizados em químicos, físicos e biológicos conforme os atributos e processos existentes no sistema edáfico, relacionados a retenção hídrica, ciclagem de nutrientes, erodibilidade, lixiviação, atividade biológica e dentre outros processos que são importantes para o funcionamento e manutenção desse ecossistema (Silva et al., 2021).

O primeiro passo consiste em selecionar os indicadores da QS, a fim de avaliar qualitativamente e constituir o conjunto mínimos de dados (MDS), sendo uma etapa desafiadora, devido a relação de dependência existente entre os indicadores, a escolha baseia-se na sensibilidade, quantificação simples e de baixo custo, que após selecionados são transformados em um padrão de índice qualitativo de qualidade do solo (SQI) onde será possível identificar os fatores antropogênicos que estão ocasionando alterações na QS (Raiesi & Beheshti, 2022).

Os indicadores biológicos apresentam-se como uma ferramenta preciosa para a detecção de mudanças nas propriedades edáficas, devido a sua sensibilidade. São comumente conhecidos como bioindicadores, e suas respostas diante as alterações são identificadas por meio das modificações quantitativas de vegetais e animais, considerando a dinâmica populacional, etiológica e fisiológica (Camacho et al., 2022; Albuquerque et al., 2022).

Desse modo, define-se os bioindicadores como forma de obter informações sobre o ambiente que se encontram residindo, podendo ser micro e macro-organismos, onde qualquer modificação ocorrente nesse meio reflete nesses organismos (Silva & Ventura, 2022).

Dentre os bioindicadores do solo, os microrganismos apresentam-se com atividade fundamental na disponibilidade de nutrientes, além de exercer influência em sua dinâmica, processos de formação e desenvolvimento, onde níveis insatisfatórios desses organismos edáficos atua como indicador de degradações e melhorias (Morquillas et al., 2022).

Conforme Laroca et al. (2018), a MOS é considerada uma maneira de propiciar no aumento da qualidade do solo, decorrente sua ligação com a biomassa microbiana, respiração basal do solo, como também da atividade enzimática, essa última atualmente está sendo empregada na medição de processos catabólicos e dos constituintes orgânicos e minerais, as enzimas caracterizam-se por serem indicadores altamente sensíveis a qualquer tipo de alterações.

Corroborando a concepção do estudo anterior, Ghosh et al. (2020) ressalta a relevância dos indicadores biológicos no fornecimento de informações importantes da QS, devido à sensibilidade desses as variações do solo, dentre as enzimas listadas com ampla utilização enfatiza-se urease, protease, fosfatase, sulfatase, γ -glicosidase.

3.3 Enzimas: Origem e Atividade no Sistema Solo-Planta

Atualmente, o crescente avanço tecnológico tem apresentado contribuições diretas para o produto interno bruto (PIB), onde a aplicabilidade no setor agropecuário tem gerado uma maior produção a fim de promover a ascensão do país nesse setor. Através da aplicabilidade tecnológica nos setores agrícolas, estudos têm apresentado como método alternativo os microrganismos que apresentam inúmeros processos benéficos para o sistema solo-planta, essencialmente pelos grupos microbianos (Franco et al., 2022).

As enzimas são definidas como proteínas globulares especializadas, de origem microbiana, como também podem ser oriundas de plantas e animais, dentre suas responsabilidades no sistema solo-planta, as enzimas encontram-se atuantes essencialmente no controle da velocidade de reações químicas, sendo capazes de aumentar ou reduzir tais reações, no solo, sua funcionalidade destaque é na participação para a formação através da síntese da MOS e na ciclagem de nutrientes, sendo essa atividade relevante para as plantas principalmente (Soares, 2021; Rodrigues et al., 2022).

A atividade enzimática tem sido categorizada como um dos principais indicadores biológicos do solo, por encontrar-se relacionada com a biologia deste meio, decorrente sua origem primaria (microbiana), que depende da intensa liberação realizada pelos organismos edáficos, assim como apresentam relações diretas com manejos agrícolas, uma vez que os ciclos biogeoquímicos são influenciados pelos nutrientes que são disponibilizados para o crescimento e desenvolvimento das espécies vegetais (Rodrigues et al., 2022).

As transformações ocorrentes no solo, acontecem tanto por hidrólises como por oxirredutases, que participam dos processos de decomposição de materiais orgânicos e nas transformações de materiais inorgânicos, onde suas principais atuações consistem na hidrólise de ligações químicas, adição ou remoção de grupos químicos, com importante papel nas transformações de processos químicos no solo (Vieira, 2019).

Desse modo, para que a atividade enzimática seja beneficiada, torna-se necessário condições ótimas da biota, sendo as enzimas uma das indicadoras da qualidade do solo que apresentam respostas mais imediatistas quando comparada com a MOS, no decorrer das alterações dos manejos agrícolas (Januszkiewicz et al., 2019; Vanegas et al., 2018).

Para a realização de tais atividades, as enzimas tendem a constituir um complexo transitório que compreende na ligação dessas enzimas em áreas específicas nos substratos, que gera como resultado final a decomposição desse complexo, a fim de liberar a enzima que será reutilizada na catalisação de uma outra reação (Job, 2021).

3.4 Constituição e Grupos Enzimáticos

As enzimas apresentam uma grande variabilidade constitucional, pois são biomoléculas proteicas, com arranjos específicos para cada composto hidrolisado, como foi observado pelo estudo realizado por Kshirsagar et al. (2020), onde a composição bioquímica enzimática variou para a formação do complexo enzimático, sendo justificado pela composição das biomoléculas serem distintas, assim como seus substratos (Silva et al., 2021).

As enzimas microbianas são classificadas em dois grandes grupos, sendo eles, extracelulares ou intracelulares. As enzimas que se enquadram ao grupo extracelulares correspondem as que são liberadas ao meio, com atividade em processos biológicos no solo, a exemplo da degradação de compostos orgânicos, de mineralização e na ciclagem de nutrientes (nitrogênio, fósforo e enxofre), por essas razões são consideradas excelentes indicadores da qualidade microbiológica (Asadishad et al., 2018).

Enquanto as enzimas intracelulares, tem como função específica realizarem a catalisação das reações que acontecem no interior celular microbiana, ou seja, são aquelas enzimas que se encontram retidas no interior das células (Vieira, 2019; Kreling et al., 2022).

A nomenclatura enzimática caracteriza-se com a colocação do sufixo –ase ao nome do substrato, como também podem ser descritas por uma frase referente a sua atividade catalítica (Tabela 2.), sendo essas duas formas normalmente utilizadas para descrever e diferenciar as enzimas (Job, 2021).

Tabela 2 - Classificação enzimática segundo as realizadas.

Classificação	Reação catalizada pela enzima
Oxirredutases	Processos de reações de oxirredução
Transferases	Transferências de grupos funcionais
Hidrolases	Processos de hidrólises
Líases	Eliminação de grupo para formação de ligações duplas
Isomerases	Processos de Isomerização
Ligases	Formação de ligação associada com reações de hidrólise de ATP
Translocases	Reações de translocações

Fonte: Job (2021).

No solo, as enzimas são conhecidas pelas atividades bioquímicas e ciclagem de nutrientes realizadas, tendo atualmente utilidade para o monitoramento de contaminantes, a exemplo dos metais pesados, hidrocarbonetos ou pesticidas. Dentre as enzimas existentes, enfatiza-se arilsulfatase, amilase, celulasas, γ -glicosidase, quitinases, desidrogenase, fosfatases e urease (Maurya et al., 2020).

3.5 Amilase

As amilases são enzimas derivadas de microrganismos halófilos, o que lhe conferem uma elevada resistência em concentrações altas de sais, pH, temperatura e a presença de solventes orgânicos, com excelente estabilidade e com atividade catalítica eficiente, e com precisa aplicação biotecnológica (Ahmed et al., 2020).

Além de sua aplicação biotecnológica atualmente, sua origem desperta interesse pelas indústrias, o que a destaca como as mais relevantes nesse setor, pelos inúmeros benefícios e utilizações, nas indústrias químicas e farmacêuticas, com

finalidade têxteis, couro, papel, celulose, cervejas, bebidas destiladas, panificação, detergentes, liquefação, cereais, ração animais e sacarificação do amido (França et al., 2021).

Quimicamente, a amilase se divide em dois tipos principais: α e β . A distinção entre elas reside na origem da síntese — enquanto a α -amilase é produzida por animais, plantas e microrganismos, a β -amilase é exclusiva das plantas. Ambas desempenham papel essencial na conversão do amido: a primeira transforma-o em glicose, e a segunda em maltose. Esse processo é influenciado por fatores como o tipo de cultura, as características do solo e as práticas de manejo (Maurya et al., 2020).

Alguns estudos, citam além desses dois grupos de enzimas amilolíticas, um terceiro, conhecido como γ -amilase ou glicoamilase que atuam como exoamilase na clivagem do substrato em áreas não redutoras, tendo como produto final os monossacarídeos de glicose (Espínola, 2020).

As amilases podem ser classificadas em endoamilases ou exoamilase, a depender da atividade desempenhada dessas enzimas na cadeia polissacarídica do amido, desse modo, as endoamilases como é caso das α -amilases hidrolisam as ligações glicosídicas α -1,4 situadas na região interna das amiloses ou amilopectina tendo como produto final oligossacarídeos, ao contrário das exoamilases que são responsáveis pela hidrólise pela extremidade das cadeias, das ligações α -1,4 a exemplo das β -amilases ou α -1,4 e α -1,6 realizadas pelas glicoamilases (Bones, 2021).

E dentre os grupos das enzimas amilolíticas enfatiza-se as α -amilases devido sua atividade de conversão do amido em produtos de glicose de baixo peso molecular, possuem capacidade de exercer atividade catalítica em elevadas temperaturas ambientes, a exemplo dos processos de liquefação e gelatinização do amido, além de poder reutilizar os produtos glicosídicos por demais enzimas do mesmo grupo (Bones, 2021).

Desse modo, é perceptível que o principal substrato dessas enzimas é o amido, que se caracteriza como um polímero que se encontra abundantemente no ambiente, composto por moléculas de amilose e amilopectina que estruturalmente são polímeros de D-glicose com ligações de pontes de hidrogênio (Simoës, 2021).

3.6 Fosfatase Ácida

As enzimas fosfatases caracterizam-se por serem responsáveis pela catalização da hidrólise de ésteres e anidridos de ácido fosfórico, por essa razão o Comitê de Nomenclatura da União Internacional de Bioquímica e Molecular as classifica em cinco grupos, sendo eles: monoéster fosfórico hidrolases ou fosfomonoesterases, hidrolases de diéster fosfórico ou fosfodiesterases, hidrolases de diéster fosfórico ou fosfodiesterases, hidrólise de monoéster trifosfóricos, e enzimas que apresentam atividades em ligações P-N e anidridos compostos por fosforil (Eivazi e Tahatahai, 1977).

Conforme a atividade de regulação, as condições requeridas pelos cátions metálicos e sensibilidade, as fosfomonoesterases podem ser subdivididas em fosfomonoesterases ácidas e alcalinas, ambas não são capazes de promoverem a hidrólise de fosfatos de fiticos, porém as fosfatases ácidas são consideradas as mais importantes, e com amplo estudo pelo fato dos solos brasileiros serem tipicamente ácidos, em contrapartida pouco se consta sobre as alcalinas, decorrente as dificuldades apresentadas em medir a atividade das fosfatases no sistema edáfico (Nannipieri et al., 2011).

Uma das diferenças entre as fosfatases ácidas e alcalinas, refere-se a sua origem, onde a primeira é produzida por microrganismos e espécies vegetais, enquanto as fosfatases alcalinas têm origem exclusivas da atividade microbiana, diferenciando-se essas também, pelo pH ideal (Debiasi, 2025).

A fosfatase ácida (ACP) encontra-se presente tanto em animais como em espécies vegetais, caracterizando-se como um tipo de hidrolase, com função de propiciar a hidrólise do fosfato monoéster, que tem como produto final a formação do fosfato e moléculas com hidroxilas (Gan et al., 2021).

Devido a sua natureza, essa enzima é relevante em diversas atividades biológicas, podendo ser evidenciada em eritrócitos, próstata, plaquetas, fígado, baço, leucócitos e rins, além disso, constatou-se que os fungos expressam uma maior produção de fosfatase ácida no solo, quando comparado com as bactérias, onde estas possuem uma maior produção de fosfatase alcalina, outro fator importante é que estudos têm revelado que as fosfatases ácidas, em sua maioria, de origem microbiana, não possuem especificidade ao tipo de substrato, além do seu pH na região ácida, essa é alterada de acordo com o teor e o tipo de substrato utilizado na reação (Nakagi, 2007).

O elemento fósforo (P) é fundamental para o crescimento vegetativo, onde consiste sua atividade desde os processos de estruturação das membranas (fosfolipídeos) até reações consistentes de transferência energética, a exemplo de sua composição na estrutura do DNA e RNA, assim como unidade metabólica de Adenosina Trifosfato (ATP) (Vengavasi et al., 2021; Jiang et al., 2019).

Além de constituir demais moléculas energéticas, como é o caso guanosina trifosfato, citidina trifosfato, uridina trifosfato, fosfenol piruvato e demais compostos fosforilados, essenciais para processos metabólicos e fisiológicos, como é o caso da fotossíntese e respiração (Malhotra et al., 2018).

O P destaca-se como o segundo nutrientes mais requerido pelas plantas, seguido do nitrogênio e potássio, estando disponível no solo tanto em sua forma orgânica como inorgânica, porém essa última tende a se associar com cátions (alumínio, ferro, magnésio e cálcio) do solo, gerando estresse e resposta pela deficiência de P, como dificuldade no crescimento e desenvolvimento das culturas, desequilíbrio nos sistemas antioxidantes e homeostase osmótica, conduzindo em altas concentrações de espécies reativas (EROS), sendo desenvolvido mecanismos adaptativos perante o estresse como modificações na arquitetura e crescimento radicular, maior formação de fosfatases e secreção de ácidos orgânicos (Vengavasi et al., 2021; Zhang et al., 2021).

4. Conclusão

As enzimas são amplamente enfatizadas em estudos como indicadores biológicos devido ao seu papel crucial no solo. Elas atuam controlando reações químicas, acelerando ou reduzindo sua velocidade, além de serem fundamentais na síntese de matéria orgânica do solo (MOS) e na ciclagem de nutrientes. Sua importância para os solos brasileiros é ainda mais relevante, considerando as características químicas e físicas que demandam manejo cuidadoso.

Nesse contexto, amilases e fosfatases ácidas são exemplos de enzimas com atividades específicas e de grande valor no solo. Elas participam ativamente da ciclagem de nutrientes e são eficazes no monitoramento de contaminantes como metais pesados, hidrocarbonetos ou pesticidas. Por essas razões, são consideradas excelentes indicadores biológicos.

Agradecimentos

Agradecimento ao apoio financeiro da ofertado pela Capes.

Referências

Ahmed, M.M.M.; Khan, M. M. A.; Al- Garni, S. M. S.; Bora, R. S.; Kabli, S. A. (2020). Comparative molecular studies of halophilic bacteria from saline water and soil in the Saudi environment. *Bioscience Journal*, 36, (3), p. 1024-1031.

- Albuquerque, M. G.; De Sousa, S. S. O.; De Arruda, V. C. M.; El-deir, S. G. (2022). Uso de bioindicadores como auxílio no monitoramento de rios com presença de dejetos de animais: revisão de literatura. *REVISTA AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, 15, (1), 245-257.
- Araújo, E. A.; Ker, J. C.; Neves, J. C. L.; Lani, J.L. (2012). Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia*, 5, (1), p. 187-206.
- Asadishad, B.; Chahal, S.; Akbari, A.; Ciaciarelli, V.; Azodi, M.; Ghoshal, S.; Tufenkji. (2018). Amendment of Agricultural Soil with Metal Nanoparticles: Effects on Soil Enzyme Activity and Microbial Community Composition. *Environmental Science & Technology*, 52, (4).
- Bettiol, W.; Silva, C. A.; Cerri, C. E. P.; Martin-Neto, L.; De Andrade, C. A. (2023). Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Embrapa. <file:///home/marilia/Downloads/Bettiol-Entendendo-materia-organica-2023-1.pdf>.
- Bombonato, A. K. G. (2014). Uso de enzimas como indicadores biológicos da qualidade de solos do Cerrado com cultivo de cana-de-açúcar. (Trabalho de Conclusão de Curso - Graduação (Licenciatura em Química - Câmpus Central - Sede: Anápolis - CET - Henrique Santillo, Universidade Estadual de Goiás). Repositório UEG. <https://repositorio.ueg.br/jspui/handle/riueg/6619>.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., De Goede, R., ... & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil biology and biochemistry*, 120, 105-125.
- Camacho, A., Mora, C., Picazo, A., Rochera, C., Camacho-Santamans, A., Morant, D., ... & Boluda, R. (2022). Effects of soil quality on the microbial community structure of poorly evolved Mediterranean soils. *Toxics*, 10(1), 14.
- Carneiro, C. J., Prochnow, D. A., Thesing, N. J., Nogueira, T. P., & Klockner, L. M. (2022). Impacto da produção de olerícolas em sistema de base agroecológica na qualidade química do solo. *Research, Society and Development*, 11(1).
- Debiasi, L. (2025). Efeito da cama de aves na atividade enzimática do solo e na produtividade da soja. (Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Agronomia - Universidade Tecnológica Federal do Paraná). <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/36361/1/efeitocamaavesatividadeenzimatica.pdf>.
- Eivazi, F., & Tabatabai, M. A. (1977). Phosphatases in soils. *Soil biology and biochemistry*, 9(3), 167-172.
- Espínola, M. V. P. D. C. (2020). Identificação e caracterização fisiológica de bactérias termofílicas e termotolerantes isoladas do solo da caatinga do cariri paraibano. Tese (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. <https://www.suino.com.br/solo-degradado-conceito-causas-e-impactos-da-degradacao/>.
- Faria, V. L., Melloni, R., & Melloni, E. G. P. (2021). Qualidade do solo sob cultivo de banana em sistemas de produção orgânico e convencional em Gonçalves (MG). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(3), 1206-1219.
- Figueiredo Vasconcellos, R. L., & de Pádua Ferreira, R. V. (2018). Relatório sobre efeito do BacSol sobre a qualidade do solo. Itatijuca Biotech. https://rsa.ind.br/midia/pdf/relatorio%20bacsol_qualidade_solo.pdf
- França, Í. B., & Silva, C. A. A. (2021). Utilização de resíduos agroindustriais na produção de amilase por *Aspergillus niger* UCP 1095 através de fermentação submersa. *Brazilian Journal of Development*, 7(5), 51331-51345.
- Franco, T. C., Oliveira, T. É., Mantovani, J. R., & Florentino, L. A. (2022). Seleção de bactérias promotoras do crescimento vegetal produtoras de enzima: Efeito na decomposição de resíduos orgânicos. *Research, Society and Development*, 11(3).
- Gan, X., Qiu, F., Jiang, B., Yuan, R., & Xiang, Y. (2021). Convenient and highly sensitive electrochemical biosensor for monitoring acid phosphatase activity. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 332, 129483.
- Ghosh, A., Singh, A. B., Kumar, R. V., Manna, M. C., Bhattacharyya, R., Rahman, M. M., ... & Misra, S. (2020). Soil enzymes and microbial elemental stoichiometry as bio-indicators of soil quality in diverse cropping systems and nutrient management practices of Indian Vertisols. *Applied Soil Ecology*, 145., 103304.
- Januszkiewicz, E. R., Raposo, E., Martins, B. M. P. R., Magalhães, M. A., Panosso, A. R., Melo, G. M. P., & Ruggieri, A. C. (2019). Atividade enzimática do solo de pastos de *Brachiaria* manejados sob ofertas de forragem. *Boletim de Indústria Animal*, 76, 1-12.
- Job, M. T. (2021). Otimização do protocolo de determinação da atividade enzimática da β -Glicosidase no solo. Tese (Bacharel em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia) - Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Santa Cruz do Sul.
- Kshirsagar, S., Waghmare, P., Saratale, G., Saratale, R., Kurade, M., Jeon, B. H., & Govindwar, S. (2020). Composition of synthesized cellulolytic enzymes varied with the usage of agricultural substrates and microorganisms. *Applied biochemistry and biotechnology*, 191(4), 1695-1710.
- Laroca, J. V. D. S., Souza, J. M. A. D., Pires, G. C., Pires, G. J. C., Pacheco, L. P., Silva, F. D. D., ... & Souza, E. D. D. (2018). Soil quality and soybean productivity in crop-livestock integrated system in no-tillage. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(11), 1248-1258.
- Malhotra, H., Vandana, Sharma, S., & Pandey, R. (2018). Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. In *Plant nutrients and abiotic stress tolerance* (pp. 171-190). Singapore: Springer Singapore.
- Maurya, S., Abraham, J. S., Somasundaram, S., Toteja, R., Gupta, R., & Makhija, S. (2020). Indicators for assessment of soil quality: a mini-review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(9), 604.

- Melo, D. M. A., dos Reis, E. F., do Nascimento Coaracy, T., Silva, W. A. O., & Araújo, A. E. (2019). Cromatografia de Pfeiffer como indicadora agroecológica da qualidade do solo em agroecossistemas. *Revista craibeiras de agroecologia*, 4(1), e7653-e7653.
- Mirghaed, F. A., & Souri, B. (2022). Spatial analysis of soil quality through landscape patterns in the Shoor River Basin, Southwestern Iran. *Catena*, 211, 106028.
- Morquillas, L. A. N.; et al. (2022). Qualidade do solo nos diferentes usos e manejos aplicando a microflora (bactérias, fungos e actinomicetos) como indicador biológico. *Revista Brasileira de Pesquisa Animal e Ambiental*, Curitiba, v.5, n.1, p. 985-995.
- Muñoz-Rojas, M. (2018). Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5, 47-52.
- Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L.; Ranella, G. (2011). Papel das Enzimas Fosfatase no Solo. Capítulo 9: Soil Biology 26.
- Nakagi, V. S. (2007). Caracterização da atividade da fosfatase ácida de *Penicillium implicatum*. (Dissertação Mestrado em Microbiologia - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal). Repositório UNESP.
<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/328545b0-f8e4-472d-80d8-0e565bb921e9/content>.
- Oliveira, J. L., Lima, A. C., Minini, D., & Silva, E. (2018). Usos, efeitos e potencial tóxico dos agrotóxicos na qualidade do solo. *Agrarian Academy*, 5(09).
- Oliveira Silva, M., dos Santos, M. P., da Paz Sousa, A. C., Silva, R. L. V., de Moura, I. A. A., Silva, R. S., & Silva Costa, K. D. (2021). Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. *Brazilian Journal of Development*, 7(1), 6853-6875.
- Pereira A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [free e-book]. Ed.UAB/NTE/UFSM. Casarin, S. T. et al. (2020). Tipos de revisão de literatura: considerações das editoras do Journal of Nursing and Health. *Journal of Nursing and Health*. 10(5).
<https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/enfermagem/article/view/19924>.
- Raiesi, F., & Beheshti, A. (2022). Evaluating forest soil quality after deforestation and loss of ecosystem services using network analysis and factor analysis techniques. *Catena*, 208, 105778.
- Rodrigues, R. N., Reis Junior, F. B. D., Lopes, A. A. D. C., Rocha, O. C., Guerra, A. F., Veiga, A. D., & Mendes, I. D. C. (2021). Soil enzymatic activity under coffee cultivation with different water regimes associated to liming and intercropped brachiaria. *Ciência Rural*, 52, e20200532.
- Rother, E. T. (2007). Revisão sistemática x revisão narrativa. *Acta Paul. Enferm.* 20(2). <https://doi.org/10.1590/S0103-21002007000200001>.
- Silva, F. E. F. L.; Ventura, R. F. (2022). Bioindicadores como método de observação do impacto ambiental. (Trabalho de conclusão de curso no curso de Biologia - Centro Universitário Brasileiro – UNIBRA). Repositório GrupoUnibra.
<https://www.grupounibra.com/repositorio/CBIOLO/2022/bioindicadores-como-metodo-de-observacao-do-impacto-ambiental-14.pdf>
- Da Silva, P. C., dos Santos Souza, W., da Cunha, J. G., Maia, E. P. V., & Neto, M. R. H. (2021). Chemical and biological indicators of soil quality in cultivation areas of the Cerrado. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 12(6), 60-73.
- Da Silva, T. A. C., Melloni, R., Melloni, E. G. P., Ramos, P. P., & de Moraes Pereira, J. (2020). Avaliação da qualidade de solo de área de lixão desativado: uma revisão de literatura. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(2), 630-640.
- Simões, A. L. D. C. C. (2021). Produção de amilases por cultivo em estado sólido e hidrólise enzimática de resíduos de mandioca. Tese (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal da Paraíba – João Pessoa.
- Soares, D. D. A. (2021). Dinâmica da matéria orgânica e qualidade do solo em sistemas de produção agropecuários. Tese (Doutorado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira –SP.
- Vanegas, J. J. C., Zambrano, K. B. M., & Avellaneda-Torres, L. M. (2018). Effect of ecological and conventional managements on soil enzymatic activities in coffee agroecosystems. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 48(4), 420-428.
- Vengavasi, K., Pandey, R., Soumya, P. R., Hawkesford, M. J., & Siddique, K. H. (2021). Below-ground physiological processes enhancing phosphorus acquisition in plants. *Plant Physiology Reports*, 26(4), 600-613.
- Vieira, B. A. R. D. M. (2019). Atributos microbianos do solo sob cultivo de cana-de-açúcar com diferentes níveis de palha (Doctoral dissertation, Instituto Agrônomo), Campinas –SP.
- Zhang, Y., Chen, H., Liang, Y., Lu, T., Liu, Z., Jin, X., ... & Ahammed, G. J. (2021). Comparative transcriptomic and metabolomic analyses reveal the protective effects of silicon against low phosphorus stress in tomato plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 78-87.