

 INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA
PARAÍBA
DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO DE ENSINO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DOS RECURSOS
AMBIENTAIS DO SEMIÁRIDO

ADOLF HITLER CARDOSO DE ARAÚJO

**BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS: UMA ALTERNATIVA PARA O
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

**PICUÍ – PB
2023**

ADOLF HITLER CARDOSO DE ARAÚJO

BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS: UMA ALTERNATIVA PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Gestão dos Recursos Ambientais do Semiárido, do Instituto Federal da Paraíba – Campus Picuí, em cumprimento às exigências parciais para a obtenção do título Especialista.

ORIENTADOR: Montesquieu da Silva Vieira

**PICUÍ – PB
2023**

Dados Internacionais de Catalogação
Biblioteca – IFPB, Campus Picuí

A663b Araújo, Adolf Hitler Cardoso de.

Biorremediação de solos salinizados: uma alternativa para o semiárido brasileiro. / Adolf Hitler Cardoso de Araújo. – Picuí, 2023.

36 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização - Gestão em Recursos Ambientais do Semiárido – GRAS) – Instituto Federal de Educação Tecnológica da Paraíba, IFPB – Campus Picuí/Coordenação de Pós Graduação em Gestão dos Recursos Ambientais do Semiárido, 2023.

Orientador: Montesquieu da Silva Vieira.

1. Solos - degradação. 2. Biotecnologia ambiental. 3. Biorremediação. 4. Semiárido nordestino. I. Título.

CDU 631.452

Elaborada por Alini Casimiro Brandão – CRB 000701

ADOLF HITLER CARDOSO DE ARAÚJO

BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS: UMA ALTERNATIVA PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Gestão dos Recursos Ambientais do Semiárido, do Instituto Federal da Paraíba – Campus Picuí, em cumprimento às exigências parciais para a obtenção do título Especialista.

Aprovado em 26/05/2023.

Banca Examinadora

**Prof. Montesquieu da Silva Vieira
Orientador (IFPB)**

**Prof. Joab Josemar Vitor Ribeiro do Nascimento
Examinador**

**Prof. Jandeilson Alves de Arruda
Examinador**

RESUMO

O solo é um recurso extremamente necessário para a manutenção ambiental e para a sobrevivência dos seres vivos, de modo que e a sua degradação acarreta em impactos diretos para a sociedade. A degradação irreversível de recursos como o solo suscita a necessidade do emprego de técnicas economicamente viáveis que sejam ecologicamente adequadas para que se possa existir um equilíbrio ambiental e uma manutenção na qualidade de vida. Diante da necessidade da aplicação de tecnologias limpas e sustentáveis, a biotecnologia ambiental oferece como técnica a biorremediação para o tratamento de áreas degradadas, que vem se destacando por sua eficiência e eficácia. Com isso, mediante revisão bibliográfica buscou-se compreender a técnica de biorremediação, evidenciar a sua potencialidade na aplicação em solos salinizados do semiárido nordestino e fazer um levantamento de espécies com potencial biorremediador. Para isto foi realizada uma revisão qualitativa em 20 artigos, utilizando os descritores: solos salinizados, biorremediação, fitorremediação e semiárido. Com os resultados da pesquisa, pode-se observar que a biorremediação se apresenta como uma técnica em desenvolvimento, mas já é considerada proficiente em relação ao custo, ao rendimento e a sustentabilidade. Em decorrência disso, é preciso enfatizar a viabilidade da técnica para a recuperação de áreas salinizadas e a sua relevância para um desenvolvimento mais produtivo e sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Biotecnologia ambiental; degradação de solos; recuperação ambiental.

ABSTRACT

Soil is an extremely necessary resource for environmental maintenance and for the survival of living beings, so that its degradation leads to direct impacts on society. The irreversible degradation of resources such as soil raises the need to use economically viable techniques that are ecologically appropriate so that there can be an environmental balance and maintenance of quality of life. Faced with the need to apply clean and environmental technologies, environmental biotechnology offers bioremediation as a technique for the treatment of degraded areas, which has been standing out for its efficiency and effectiveness. Thus, through a bibliographical review, we sought to understand the bioremediation technique, highlight its potential for application in salinized soils in the semi-arid northeast and make a survey of species with bioremediation potential. For this, a qualitative review was carried out in 20 articles, using the descriptors: salinized soils, bioremediation, phytoremediation and semiarid. With the results of the research, it can be observed that bioremediation is presented as a technique in development, but it is already considered proficient with regard to cost, yield and sustainability. As a result, it is necessary to emphasize the viability of the technique for the recovery of salinized areas and its relevance for a more productive and sustainable development.

KEYWORDS: Environmental biotechnology; soildegradation; environmentalrecovery.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 SALINIZAÇÃO DOS SOLOS	10
2.1.1 Principais Causas De Salinização No Semiárido.....	11
2.1.2 Impactos gerados pela salinização.....	13
2.1.2 Recuperação de Solos Salinizados	14
2.2 O PROCESSO DE BIORREMEDIAÇÃO	15
3. METODOLOGIA	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 BIORREMEDIAÇÃO APLICADA A SOLOS SALINIZADOS	25
4.2 ESPÉCIES UTILIZADAS NA BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS	27
4.3 APLICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	30
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
REFERÊNCIAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

As ações antrópicas provocam inúmeros impactos no meio ambiente, com diversas conseqüências para os ecossistemas e, portanto, trazendo preocupações para a humanidade. A contaminação contínua do meio ambiente com compostos e produtos nocivos acarreta na necessidade de uma eficaz e frequente gestão acerca das atividades geradoras de impactos com a finalidade de manter a sustentabilidade e de remediar alterações negativas para o meio ambiente (PEREIRA; FREITAS, 2012).

O solo é um recurso extremamente necessário para a manutenção ambiental e para a sobrevivência dos seres vivos, por realizar funções como o suporte de nutrientes para a produtividade das plantas e dos animais, para o ciclo hidrológico e para a reciclagem contínua de nutrientes que são despejados pelas atividades humanas, atuando eficazmente na redução ou na degradação de compostos nocivos ao meio ambiente (TOMASSONI et al., 2014).

A degradação do solo pode atingir diferentes ecossistemas e diversos seres vivos. Por isso, torna-se necessário o monitoramento de impactos e o emprego de medidas remediadoras. Assim, é preciso buscar técnicas eficientes que possam auxiliar na remediação e no controle de áreas contaminadas (ARAÚJO; SOUSA; RODRIGUES, 2017).

A degradação do solo pode ser ocasionada em decorrência de diversos processos, dentre estes se tem a salinização. A salinização é um processo que impacta de forma significativa o meio ambiente, a economia, a produção agrícola e a sociedade em geral (COUTINHO et al., 2015).

A classificação dos solos em normais, salinos, sódios e salino-sódicos é baseada no pH, na condutividade elétrica da pasta de saturação (CE) e na porcentagem de sódio trocável (PST) (RICHARDS, 1969). Esta classificação leva em consideração as práticas de manejo e o comportamento das culturas nestes solos. O solo é considerado salino quando apresenta condutividade elétrica superior a 4 dSm^{-1} , pH menor que 8,5 e PST menor que 15%. No Brasil, os solos salinos são comuns no semiárido nordestino, abrangendo uma área de aproximadamente 155 milhões de hectares. Mas também presente em áreas litorâneas sob influência marinha (RICHARDS, 1969; FREITAS, 2016).

A salinização do solo é um processo que pode ser decorrente de fenômenos naturais ou antrópicos. Fatores naturais como a baixa precipitação pluvial, a elevada evapotranspiração e a presença de impermeabilidade nas camadas do solo potencializam o desenvolvimento de solos salinos. O uso inadequado de terras, o manejo inadequado da irrigação e do solo, o uso de fertilizantes, ou seja, o uso de práticas agrícolas inadequadas é a principal causa antrópica de salinização do solo (GHEYI; DIAS; LACERDA, 2010).

Uma das áreas que apresentam uma gama de metodologias acerca do tratamento de áreas contaminadas é a biotecnologia. Esta utiliza processos biológicos com a finalidade de melhorar serviços através de diversas atividades naturais. Dentre as diversas técnicas existentes acerca do controle de áreas contaminadas, tem-se a biorremediação que está sendo evidenciada com inúmeras vantagens, e consiste na redução, eliminação ou transformação de diversos poluentes através da atividade de determinados agentes biológicos que degradam várias substâncias com a finalidade de obter energia (PEREIRA; FREITAS, 2012).

Para o tratamento de solos degradados existem variadas tecnologias, porém torna-se necessário a análise de diversos fatores para o emprego de um método eficaz. Questões como o tamanho da área contaminada, o custo, a eficácia e a taxa de degradabilidade do poluente necessitam ser analisadas e a biorremediação se apresenta com proficiente acerca desses pontos devido ser um processo biológico natural e que apresenta elevada potencialidade (TOMASSONI et al., 2014).

O solo é constituído por uma alta variabilidade de microrganismos que se adaptam e evoluem constantemente, e pela sua habilidade de sobreviver a condições ambientais adversas, estes organismos são considerados extremamente eficientes na remediação de áreas contaminadas. Por isso, tornam-se foco de inúmeras pesquisas que buscam compreender a sua atividade biológica e utilizar esta para a resolução de problemas ambientais (REGINATTO; COLLA; THOMÉ, 2011).

A biorremediação aplicada na recuperação de áreas degradadas pela salinização apresenta bastante potencialidade, pois os agentes biológicos utilizados funcionam como um extrator de sais e, além disso, apresentam tolerância a salinidade e elevada produção de biomassa (ARORA; SINGH; SINGH, 2017).

Em vista da intensa atividade agrícola, do desenvolvimento contínuo de solos salinizados e dos diversos impactos ambientais nocivos que podem ser gerados,

torna-se necessário estudar e conhecer novas tecnologias que sejam eficientes na eliminação e/ou redução da salinização dos solos. Este trabalho têm como finalidades: compreender a técnica de biorremediação, evidenciar a sua potencialidade na aplicação em solos salinizados do semiárido nordestino e fazer um levantamento de espécies com potencial biorremediador.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SALINIZAÇÃO DOS SOLOS

O contínuo crescimento populacional e o conseqüente aumento na demanda da produção de alimentos influenciam diretamente no equilíbrio dos ecossistemas, pois a exploração dos recursos naturais ocasiona alterações físicas, químicas e biológicas no meio ambiente (RODRIGUES et al., 2018).

A exploração, o uso e o manejo inadequado dos recursos naturais impactam significativamente os âmbitos da saúde, do meio ambiente, da economia, enfim da sociedade em geral. Atualmente, um dos principais problemas ambientais que atingem todo o mundo é a degradação dos solos. O solo é degradado quando ocorre modificações em suas características e isto pode acontecer em decorrência de esgotamento, erosão, salinização, desmatamento, compactação, desertificação, entre outros (CARREIRO; LEITE, 2017).

A degradação do solo provoca inúmeros impactos ambientais, políticos e sociais, isto em decorrência de atingir diretamente a produção agrícola e o meio ambiente. Os solos degradados acarretam na perda da fertilidade e na conseqüente redução das áreas de plantio e de remanescentes florestais, no aumento da exploração de terras marginais e frágeis, na elevação da poluição dos recursos hídricos e na emissão de gases do efeito estufa (PEDROTTI et al., 2015).

Um dos grandes desafios da atualidade acerca da exploração dos solos é o processo de salinização, o qual se trata de uma condição que pode ocorrer de forma natural ou antrópica. Alguns solos apresentam maior suscetibilidade a ocorrência de salinização, pois se encontram em regiões áridas e semiáridas. Nessas regiões, a alta concentração de sais nos solos é bastante comum, pois há a incidência de fatores como a baixa precipitação pluvial, o menor grau de intemperismo, a drenagem deficiente, a utilização de recursos hídricos de baixa qualidade, entre outros (SILVA et al., 2011).

Os solos salinos são solos caracterizados pela presença de sais solúveis e sódio trocável em camadas próximas a superfície. Esses tipos de solos são desenvolvidos em cenários de drenagem inadequada e com isso a concentração de sais acaba se elevando e tornando assim o solo salinizado (GHEYI; DIAS; LACERDA, 2010).

A formação dos solos está diretamente relacionada ao processo de salinização, pois os sais decorrentes do intemperismo dos minerais primários são transportados, armazenados e acumulados nos solos. Porém, os sais solúveis liberados posteriormente a esses processos raramente atingem níveis prejudiciais ao desenvolvimento vegetal (PEDROTTI et al., 2015).

O acúmulo de sais solúveis para que atinjam níveis prejudiciais depende de fatores como: a evapotranspiração, o índice pluviométrico, a capacidade de lixiviação dos sais, a elevação do lençol freático, a presença de impermeabilidade, a irrigação com águas salinizadas, o excesso de água de irrigação, o uso desenfreado de agroquímicos, entre outros (COUTINHO et al., 2015).

Os principais sais solúveis acumulados nos horizontes do solo são compostos principalmente por íons de: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Estando associados à ânions como cloreto, nitrato, carbonato e bicarbonato. Os cloretos e sulfatos de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} são encontrados em maiores quantidades, enquanto os carbonatos e nitratos são encontrados em menores quantidades (RIBEIRO, 2010).

O processo de salinização pode ser classificado em salinização primária e salinização secundária. A salinização primária se caracteriza pela ocorrência natural nos solos, ou seja, ela é decorrente do intemperismo das rochas e pela deposição de sais oriundos dos oceanos. A salinização secundária é resultante de ações antrópicas como o desmatamento, o excesso de água de irrigação, o uso inadequado de práticas agrícolas, o uso excessivo de agroquímicos, entre outras (RIBEIRO; BARROS; FREIRE, 2009; MUNNS, 2012).

O acúmulo de sais nos solos acarreta inúmeros impactos ambientais, estes estando associados à qualidade das águas subterrâneas, ao processo de desenvolvimento das plantas e as modificações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (RIBEIRO; BARROS; FREIRE, 2009).

2.1.1 Principais Causas De Salinização No Semiárido

As regiões semiáridas apresentam diversos ambientes com características diferentes, principalmente quanto às condições de solo, clima, relevo, flora, fauna, recursos hídricos, entre outras. Essas regiões não se apresentam de forma homogênea e por isso existe uma grande diversidade de fatores que influenciam, direta ou indiretamente, no seu desenvolvimento (LEITE, 2022).

Essa diversidade de fatores resulta na presença de diversas classes de solos, as quais apresentam diferentes posições e características morfológicas. Essas diferentes classes de solos estão expostas a inúmeros processos que ocorrem continuamente nas regiões semiáridas, um desses processos é a salinização (LEITE, 2022).

O processo de salinização é diretamente influenciado por fatores climáticos como o baixo índice pluviométrico e a elevada taxa de evapotranspiração, tais fatores correspondem às causas naturais de salinização do solo. Como a evaporação é maior que a precipitação, a água que possui uma determinada concentração de sais evapora e estes ficam acumulados e retidos no solo (MUNNS, 2012).

Outra causa da salinização é decorrente da ação das chuvas e dos ventos, esta ocasiona o intemperismo das rochas e a deposição dos sais oriundos dos oceanos. As rochas e os oceanos são depósitos naturais de sais e quando sofrem essas influências climáticas, os sais são transportados por escoamento superficial até os pontos mais baixos, ficando assim acumulados no solo (PEDROTTI et al., 2015).

Os fatores edáficos também estão diretamente relacionados com as causas de salinização dos solos, por exemplo, a capacidade de lixiviação e a permeabilidade. Em locais com condições favoráveis de drenagem e precipitação, os sais são carregados por meio de percolação ou escoamento superficial (PEDROTTI et al., 2015; GHEYI; DIAS; LACERDA, 2010).

Nas regiões áridas e semiáridas, por exemplo, as condições que favorecem o processo de lixiviação dos sais são deficientes, isto em decorrência do déficit hídrico e das condições de drenagem serem imperfeitas. A formação de camadas impermeáveis também é uma das causas de salinização, pois nessas camadas há uma limitação na drenagem e por isso a água não consegue infiltrar (GHEYI; DIAS; LACERDA, 2010).

O manejo inadequado do solo é o principal fator causador do processo de salinização, isto em decorrência, por exemplo, da utilização de águas com alta concentração de sais na irrigação ou de águas que não atendem aos padrões de qualidade. Quando há um manejo inadequado de irrigação ocorre a elevação do nível do lençol freático, isto devido a água atingir a zona radicular de forma

ascendente e por capilaridade. Essa água vai sendo evapotranspirada e com isso os sais ficam retidos na superfície do solo (COUTINHO et al., 2015).

A utilização incorreta, indiscriminada e excessiva de agroquímicos também é um elemento indutor do processo de salinização do solo, pois esses compostos apresentam concentrações de sais elevadas como cloreto de potássio, nitrato de amônia, entre outros (RIBEIRO; BARROS; FREIRE, 2009).

O descarte de águas residuárias, rejeitos ou subprodutos de dessalinizadores sem nenhum tratamento prévio também pode ocasionar o desenvolvimento de solos salinos. Pois, ocorre a liberação de uma alta concentração de sais nos cursos d'água ou nas camadas superficiais do solo (RIBEIRO, 2010).

2.1.2 Impactos gerados pela salinização

O processo de salinização ocasiona impactos em diversos âmbitos da sociedade como o meio ambiente, a saúde humana e animal, a economia, a produção agrícola, entre outros. A salinização está diretamente relacionada a produtividade e esta é conseqüentemente afetada pelas alterações que ocorrem nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (ARORA; SINGH; SINGH, 2017).

A redução da produção agrícola ocasiona comumente o abandono da terra afetada pela salinização. Isto faz com que ocorram impactos na vivência da população local e no desenvolvimento regional. Como ocorrem modificações nas propriedades do solo que afetam diretamente sua fertilidade e produtividade, o custo da produção agrícola torna-se bastante elevado e isto é outro fator que afeta diretamente a sociedade local (SANTOS, 2016).

Com a salinidade, os solos sofrem alterações nas suas propriedades físicas, tais como, estabilidade dos agregados, permeabilidade, estrutura do solo, infiltração e densidade das partículas. Essas modificações estão diretamente relacionadas com a acumulação de sais solúveis que podem tornar o solo flocoado friável e bem permeável, e também de sódio trocável que pode tornar o solo adensado, compacto em condições secas e pegajoso em condições molhadas (SANTOS, 2012).

O aumento da salinidade do solo acarreta desequilíbrio do ecossistema, pois há uma maior dificuldade da retirada de água do solo pelos microrganismos e pelas plantas. Isto faz com que ocorra uma redução do desenvolvimento vegetal e, além

disso, pode ocasionar a perda da biodiversidade presente na área (ARORA; VANZA, 2017).

A salinidade afeta processos enzimáticos extremamente importantes que ocorrem no solo, isso faz com que haja elevadas perdas de produtividade e rentabilidade. A população microbiana torna-se bastante reduzida e a distribuição de fungos que formam importantes simbioses com as raízes das plantas também é diminuída (LEAL et al., 2008).

A salinização ocasiona o aumento do potencial osmótico do solo, isso faz com que os vegetais necessitem de um maior gasto de energia para absorver água e os nutrientes. As plantas ainda são afetadas em consequência de alguns elementos serem tóxicos para o seu desenvolvimento, o que acarreta distúrbios na sua fisiologia (SILVA, 2014).

Há ainda modificações significativas nos processos de absorção, transporte, assimilação e distribuição dos nutrientes nos vegetais. Em razão disso, ocorre um desequilíbrio nutricional, pois alguns nutrientes são inibidos ou mais assimilados que outros (SANTOS, 2012).

Por afetar completamente as características do solo e pelos efeitos diretos no desenvolvimento vegetal, a salinização causa sérios problemas econômicos e, como consequência, os solos se tornam inférteis ou inaptos para a produção agrícola. Com isso, esses solos acabam sendo descartados do sistema de produção e tornam-se desertos salinos (PEDROTTI et al., 2015).

2.1.2 Recuperação de Solos Salinizados

Diante da maior ocorrência de áreas com solos salinizados, torna-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias e o aprimoramento das já existentes para que possa reduzir e/ou eliminar de forma significativa a concentração dos sais solúveis e conseqüentemente para recuperar e reintroduzir esses solos no sistema de produção (COUTINHO et al., 2015).

Como o processo de recuperação convencional apresenta altos custos, os solos afetados pelo processo de salinização necessitam de metodologias especiais e práticas adequadas de manejo para que a remoção aconteça de forma eficiente. A recuperação desses solos salinos baseia-se principalmente nas técnicas de correção, pousio, drenagem, nivelamento, irrigação, utilização de plantas resistentes

a sais, lixiviação, gessagem, entre outras, que estão sempre associadas a boas condições de drenagem (PEDROTTI et al., 2015).

A recuperação de solos salinizados é dividida em técnicas fundamentais e auxiliares, nas primeiras ocorre o processo de lavagem de sais e a aplicação de compostos químicos. Enquanto as técnicas auxiliares focam nas propriedades do solo, agindo diretamente neste por meio de subsolagem, deposição de resíduos orgânicos e aração profunda (CAVALCANTE et al., 2010).

Algumas práticas agrícolas apresentam bastante potencialidade na recuperação de solos salinizados. Estão sendo utilizadas plantas com raízes profundas, a formação de cobertura morta na superfície do solo, a aplicação de matéria orgânica, a utilização de gramíneas que aumentem a porosidade do solo, a adubação verde, entre outras (PEDROTTI et al., 2015).

A aplicação de corretivos químicos juntamente com a lavagem dos solos é bastante utilizada na recuperação dos solos salinos, pois atuam diretamente nas necessidades e nos problemas dos solos com reflexos no desenvolvimento das plantas (RIBEIRO; BARROS; FREIRE, 2009).

Uma das alternativas de bastante relevância e que está apresentando alta potencialidade na remoção de sais é a biorremediação, a qual é uma técnica de baixo custo que pode proporcionar a reabilitação dos solos e o seu retorno ao processo produtivo (SILVA; SANTOS; GOMES, 2014).

Para que a recuperação dos solos possua maior eficiência é importante que se faça a combinação de duas ou mais técnicas simultaneamente ou sucessivamente. Essa junção pode potencializar o processo de recuperação e elevar a possibilidade de retorno dos solos ao sistema de produção (ARORA; VANZA, 2017).

2.2 O PROCESSO DE BIORREMEDIAÇÃO

A biorremediação é uma técnica que aproveita as características físicas, químicas e biológicas da área contaminada e oferece dependendo da técnica as condições necessárias para seres biológicos atuarem no tratamento. A escolha do tipo de biorremediação dentro de uma variabilidade de técnicas é realizada de acordo com as substâncias contaminantes, com o tipo de material biológico contaminado e com a especificidade da técnica (TOMASSONI et al., 2014).

A biorremediação por englobar diversos seres biológicos e por poder ser utilizada em vários tipos de ambientes acarreta na geração de diferentes tipos de processos biorremediadores que buscam justamente a melhor forma de tratar uma determinada área contaminada (SILVA; SANTOS; GOMES, 2014).

A biorremediação se caracteriza como um processo que ocorre naturalmente no meio ambiente através do consumo de substâncias por microrganismos e que pode ser aplicado e potencializado de diferentes formas, nas quais dependem da microbiota local, dos componentes contaminantes no meio, dos recursos que foram degradados, entre outros (FERREIRA et al., 2017).

As técnicas de biorremediação podem ser realizadas *in situ* ou *ex situ*. A primeira caracteriza-se pela biorremediação realizada na própria área contaminada e a segunda constitui-se na remoção do material da área contaminada e na transferência deste para um local de tratamento adequado. Essa escolha do local de onde será realizado o tratamento depende da necessidade da área contaminada, e esta pode passar por diferentes processos dependendo da situação local (SIMÃO et al., 2015).

A biorremediação por atenuação natural também é denominada biorremediação intrínseca ou passiva, e é caracterizada pelo processo natural de biodegradação dos poluentes pela ação dos microrganismos. Este processo não emprega nenhuma medida tecnológica, apenas acata a atividade microbiológica e aguarda a redução ou remoção dos poluentes. Em vista dessa dependência da naturalidade do processo, os autores revelam que a técnica apresenta uma grande limitação acerca do tempo de tratamento e recuperação, acarretando assim em um monitoramento mais longo e em uma necessidade do uso de outros processos (DEON et al., 2012; PEREIRA; FREITAS, 2012).

Em alguns casos, os microrganismos são afetados por vários fatores ambientais e devido a isso a biorremediação por bioestimulação necessita ser utilizada. Este tipo de técnica consiste no aumento da ação metabólica e reprodutiva dos microrganismos através da introdução de determinados estimulantes como biossurfactantes e nutrientes. Tal medida auxilia na maior biodegradação do poluente e oferece também alterações no ambiente contaminado favoráveis ao processo de tratamento (ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010).

A bioaugmentação é descrita como uma técnica que introduz microrganismos específicos à área contaminada para a estabilidade da degradação dos poluentes,

que ocorre pela alta potencialidade destes agentes biológicos que são selecionados e adicionados de acordo com os fatores locais e com a necessidade dos locais que carecem de organismos que realizem a biodegradação (DEON et al., 2012).

A bioaeração que é também conhecida como bioventilação é um tipo de bioestimulação e consiste na introdução de gases específicos na área contaminada que potencializam e estimulam a atividade decompositora dos microrganismos (SILVA; SANTOS; GOMES, 2014).

Os artigos evidenciam que no caso da biorremediação *ex situ*, existe a transferência do material da área contaminada para um local específico de tratamento, este podendo ser realizado através das técnicas que utilizam biopilhas e biorreatores, e as que são constituídas pelos processos de landfarming e compostagem. Esses tipos de biorremediação são aplicados quando existe a possibilidade do desenvolvimento de impactos nocivos aos seres humanos e ao meio ambiente em geral ou quando se faz necessário o emprego de técnicas que possam auxiliar os microrganismos de degradarem altas concentrações de substâncias contaminantes.

A biorremediação por biopilhas caracteriza-se pela introdução do material contaminado em pilhas ou em células construídas especificamente com a finalidade de estimular a atividade dos microrganismos através da aeração, da introdução de determinados nutrientes e pelo aumento da umidade local (ANDRADE; AUGUSTO; JARDIM, 2010).

A utilização de biorreatores na biorremediação ocorre da seguinte forma: o material coletado da área contaminada é acondicionado em determinados tanques que sofrem uma elevada agitação mecânica com a finalidade de estimular os microrganismos e de aumentar a disponibilidade das substâncias contaminantes. Esse tipo de técnica apresenta alta eficiência em decorrência do controle das condições ambientais no interior do biorreator, no qual existe um ajuste de pH, de nutrientes, de aeração e temperatura, podendo assim favorecer e potencializar a atividade microbiana presente (PEREIRA; FREITAS, 2012).

A técnica de *landfarming* fundamenta-se na disposição do material contaminado no solo para que o mesmo possa biodegradá-lo no decorrer do processo realizado pela microbiota presente nas camadas inferiores do solo. Este tipo de método necessita de um alto monitoramento devido à emissão de

determinados gases e também pela possível distribuição de substâncias contaminantes para águas subterrâneas (TOMASSONI et al., 2014).

Todos esses processos devem ser empregados de forma peculiar, ou seja, a sua aplicação deve ser realizada avaliando caso a caso, observando as necessidades existentes no meio, os tipos de microrganismos degradadores, os tipos de poluentes e o período de tempo que a área contaminada precisa ser remediada.

Diante dos diferentes métodos de biorremediação apresentados no trabalho, analisaram-se as suas características e determinaram-se propriamente suas vantagens e desvantagens. Na Tabela 1, pode-se observar e compreender que fatores como o custo, o tempo do processo e condicionantes ambientais, são extremamente importantes quando se refere à escolha da técnica que irá ser empregada para o tratamento de um solo contaminado. Nesse aspecto, a técnica pode ser extremamente eficaz, porém pode exigir um alto número de recursos para a sua implantação. Por isso é preciso analisar completamente a situação e agir de acordo com as características locais do ambiente.

Tabela 1 – Análise dos diferentes métodos de biorremediação aplicados em solos

	Vantagens	Desvantagens	
Biorremediação <i>in situ</i>	Atenuação natural	<ul style="list-style-type: none"> - Processo natural - Possibilidade de redução contínua e eficiente - Sem intervenções 	<ul style="list-style-type: none"> - Processo lento - Necessidade de outras técnicas - Longo monitoramento
	Bioestimulação	<ul style="list-style-type: none"> - Equilíbrio nutricional microbiano - Aumento quantitativo e qualitativo dos microrganismos 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de balanceamento e customização - Cálculos de dosagens
	Bioaugmentação	<ul style="list-style-type: none"> - Ocorrência do processo mesmo em condições baixas de oxigênio - Elevada redução do contaminante 	<ul style="list-style-type: none"> - Riscos ambientais pela adição de microrganismos alóctones - Necessidade de longos estudos de toxicidade

Biorremediação ex situ	Bioaeração	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil instalação - Impactos ambientais mínimos - Atuação em locais de difícil acesso 	<ul style="list-style-type: none"> - Eficiente apenas em meio aeróbio - Fatores ambientais afetam a eficiência
	Biopilhas	<ul style="list-style-type: none"> - Alto controle e simples manutenção - Baixo custo - Processo rápido 	<ul style="list-style-type: none"> - Remoção do material para o tratamento - Pode não ser eficiente no tratamento de altos volumes de contaminantes
	Biorreatores	<ul style="list-style-type: none"> - Não necessita de grandes áreas - Remoção completa dos contaminantes - Tratamento de elevados volumes de contaminantes - Processo rápido 	<ul style="list-style-type: none"> - Altas concentrações de metais pesados podem inibir a atividade microbiana - Alto custo - Remoção do material para o tratamento
	Landfarming	<ul style="list-style-type: none"> - Tratamento de elevados volumes de contaminantes - Baixo custo 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de ajuste no solo - Processo lento e incompleto - Alto monitoramento - Remoção do material para o tratamento
	Compostagem	<ul style="list-style-type: none"> - Tratamento de elevados volumes de contaminantes - Processo rápido - Ativação dos microrganismos do solo 	<ul style="list-style-type: none"> - Remoção do material para o tratamento - Necessidade de mão-de-obra ou equipamentos especializados

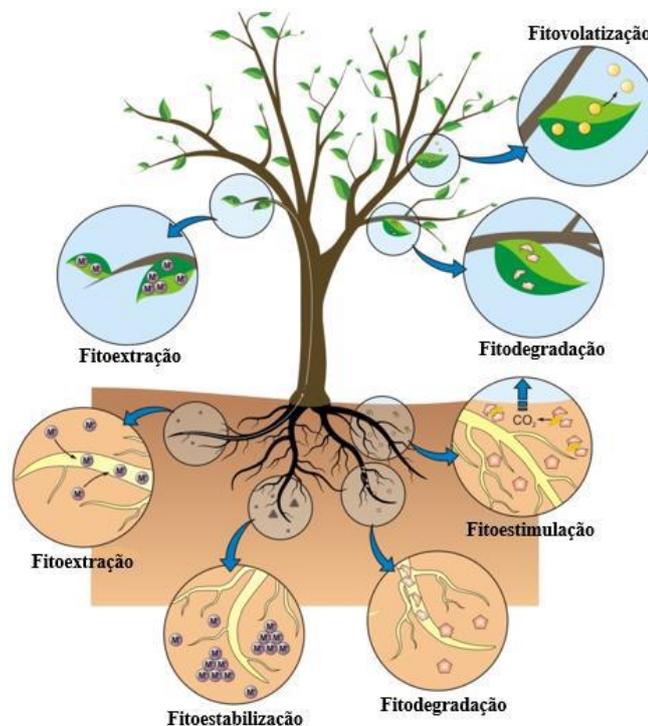
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentro da biorremediação insere-se ainda a fitorremediação, a qual se caracteriza como a utilização de plantas que possuem determinadas características que auxiliam na absorção e acumulação de substâncias, o que conseqüentemente

acarreta na redução e/ou remoção de compostos considerados contaminantes (RODRIGUES et al., 2016).

As plantas apresentam alta potencialidade na remoção de contaminantes, pois são organismos que necessitam de uma alta taxa de nutrientes e compostos para que possam alcançar seu crescimento. Em vista disso, reduzem a concentração de componentes inorgânicos, de metais pesados, de compostos tóxicos e de microrganismos patogênicos. Existem diversos processos para que a fitorremediação possa ocorrer, tais como fitoextração, rizofiltração, fitoestabilização, fitotransformação e fitoestimulação (Figura 1) (ASSUNÇÃO, et al., 2017; MENDOZA; PÉREZ; GALINDO, 2018; TAN; MORAD; OOI, 2016).

Figura 1 - Representação dos processos da fitorremediação



FONTE: Favas et al., 2014.

Dentre os processos citados anteriormente o mais utilizado é o de fitoextração, no qual as plantas realizam a extração das substâncias e as acumulam em seus tecidos. Através da colheita das plantas tem-se a fitorremediação do local. As plantas que empregam tal mecanismo se destacam, pois conseguem acumular níveis elevados de substâncias até tóxicas em sua biomassa, e por isso na pós-colheita as mesmas devem ser empregadas para fins não alimentares (FILHO et al., 2015; RODRIGUES et al., 2016).

A rizofiltração trata-se de uma técnica na qual as plantas realizam a fitorremediação através da capacidade de concentrar as substâncias contaminantes em suas raízes. Possui um processo similar a fitoextração, difere-se apenas do local de acúmulo. Enquanto na fitoestabilização, as plantas realizam a imobilização dos contaminantes existentes no meio, reduzindo assim uma possível dispersão desses compostos (RODRIGUES et al., 2016).

No processo de fitotransformação têm-se o emprego de determinadas espécies de plantas com capacidade metabólica eficiente para transformar compostos tóxicos em substâncias com menor ou nenhuma toxicidade. Já no caso da fitoestimulação, ocorre a estimulação da microbiota local utilizando plantas para que os microrganismos possam atuar na degradação dos poluentes (LIMA, 2018).

Utilizando mecanismos puramente biológicos, a fitorremediação é um processo considerado sustentável que apresenta inúmeros benefícios e diversas limitações como qualquer técnica de descontaminação (Quadro 1).

Quadro 1 – Principais benefícios e limitações do processo de fitorremediação

Benefícios	Limitações
Viabilidade e valorização econômicas	Tempo requerido indefinido
Degradação dos compostos orgânicos a CO ₂ e H ₂ O	Condições climáticas e ambientais
Facilidade no monitoramento	Dificuldade na seleção de plantas
Melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo	Possibilidade de transformação para planta daninha
Fornecimento de habitat para os animais	Desconhecimento da toxicidade e biodisponibilidade de alguns produtos da degradação
Diminuição na dispersão de contaminantes	Necessidade de retirada da biomassa vegetal, em alguns casos
Redução da infiltração de água contaminada no solo	Possibilidade de seleção do componente remediado
Contribuição estética	Alcance do componente pelo sistema radicular
Boa aceitação pública	Níveis elevados do contaminante
Útil em áreas extensas de solos	Potencial de contaminação da cadeia

contaminados	alimentar
Possibilidade de reciclagem	Tecnologia em desenvolvimento

FONTE: Adaptado de Procópio et al. (2009).

A fitorremediação se trata de um processo economicamente viável por apresentar baixo custo operacional e de manutenção em comparação com técnicas como adsorção, processos oxidativos avançados, ozonização, fotocatálise, entre outros. É uma técnica que pode ser valorizada economicamente, pois a biomassa coletada apresenta valiosas potencialidades (MENDOZA; PÉREZ; GALINDO, 2018; HOLANDA et al., 2015).

Os compostos que sofrem o processo de degradação pela fitorremediação podem ser reduzidos a compostos não tóxicos e mais simples, fazendo assim que não seja necessária a retirada das plantas fitorremediadoras da área. Isso acarreta na incorporação de matéria orgânica ao solo e conseqüentemente na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas (SOUZA et al., 2012).

A fitorremediação auxilia também na diminuição da dispersão de contaminantes através do controle do processo erosivo, eólico e hídrico. Contribui ainda para a redução do escoamento superficial e da lixiviação de contaminantes no solo, reduzindo assim a contaminação das águas subterrâneas (SILVA; CONTE, 2017).

Além das vantagens citadas acima, é bastante popular também por suas características estéticas, por poder ser aplicada em longos períodos de descontaminação, pelo seu emprego direto nos locais contaminados. Apresenta também maior facilidade de manejo devido as plantas necessitarem de baixa quantidade de nutrientes e por possuírem um rápido crescimento (TAN; MORAD; OOI, 2016).

A fitorremediação é uma tecnologia em desenvolvimento e por isso apresenta questões que ainda não foram respondidas como, por exemplo, o tempo requerido para a obtenção de uma descontaminação satisfatória. As condições climáticas e ambientais influenciam também na adaptação das plantas fitorremediadoras, as quais podem ter o seu crescimento restringido (PANDOLFI; MANCUSOA; SHABALAB, 2012).

Quando se tratam de compostos tóxicos, e estes são apenas fitoacumulados ou fitodegradados a um composto menos tóxico, as plantas necessitam ser retiradas da área e dispostas em um ambiente adequado (CLEMENTE, 2021).

A zona de alcance do sistema radicular é um dos principais fatores limitantes da fitorremediação, pois o contaminante deve estar dentro dessa zona. É uma técnica limitada a solos rasos ou onde a contaminação está localizada na superfície (<5m). Os níveis elevados dos contaminantes podem ser tóxicos e letais para as plantas, e, além disso, a contaminação pode se espalhar através da cadeia alimentar se as plantas acumuladoras forem ingeridas pelos animais (PROCÓPIO, 2009).

3. METODOLOGIA

Este trabalho foi elaborado a partir de um levantamento de dados realizado nas bases eletrônicas Google Acadêmico e Scientific Electronic Library Online (SCIELO), utilizando os descritores: solos salinizados, biorremediação, fitorremediação e semiárido.

A pesquisa englobou artigos, livros, teses, dissertações e os critérios de inclusão utilizados foram: pesquisas em português ou inglês, originais ou de revisão, que fossem referentes ao processo de biorremediação de solos, e que focassem em solos salinizados. Os critérios de exclusão estabelecidos foram: trabalhos repetidos e que não tratassem realmente do tema.

Foram encontrados 38 estudos nas diferentes bases de dados citadas, e diante dos critérios de exclusão estabelecidos foram descartados 18 estudos, os quais 8 trabalhos eram repetidos, e 10 não abordavam a temática.

Posteriormente, os resumos foram lidos e analisados mais detalhadamente e a partir disso, 20 trabalhos foram selecionados, pois compreenderam e preencheram os critérios de inclusão propostos inicialmente. Os estudos coletados oferecem informações relevantes cientificamente acerca do processo de biorremediação, das espécies com potencial biorremediador e da potencialidade da técnica no semiárido e na aplicação em solos salinizados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 BIORREMEDIAÇÃO APLICADA A SOLOS SALINIZADOS

A recuperação de solos salinizados apresenta alto custo e por isso é de extrema relevância a continuidade de estudos referentes a alternativas mais sustentáveis e econômicas. A biorremediação se encaixa dentre esses quesitos, pois o emprego de processos biológicos se apresenta como alternativa interessante para recuperação de áreas afetadas pela salinidade (ARORA; SINGH; SINGH, 2017).

Os métodos físicos e químicos para a redução da salinidade dos solos demandam maiores custos de implantação e condução e por isso os processos biológicos recebem uma maior atenção dos pesquisadores de todo mundo. A atividade microbiológica possui relação direta com o desenvolvimento e nutrição das plantas, por isso essa interação está sendo bastante estudada e aproveitada para uma maior eficiência na recuperação de solos afetados por sais (COUTINHO et al., 2015).

De acordo com Pandolfi, Mancusoa & Shabalab (2012), é de extrema importância o desenvolvimento de estudos e pesquisas focadas na identificação de organismos tolerantes aos sais. As condições desfavoráveis que a salinidade causa no solo ocasionam a restrição do crescimento de muitos organismos, e em vista disso algumas espécies desenvolvem mecanismos de adaptação e sobrevivência.

Plantas que são chamadas de halófitas são espécies que conseguem crescer e se reproduzir em solos salinos, e apesar de representarem apenas 2% das espécies de plantas terrestres, essas plantas halófitas se apresentam em uma ampla diversidade de formas. Mesmo diante da relevância e da potencialidade, os mecanismos e processos de desenvolvimento das plantas halófitas não foram totalmente esclarecidos (CLEMENTE, 2021).

A utilização de bactérias e fungos halofílicos apresenta alta potencialidade para a biorremediação de solos salinizados, pois proporciona benefícios como: a recuperação do solo salino, o estímulo ao crescimento das plantas, o aumento da tolerância das plantas ao sal, o aumento da produtividade (RAVINDRAN et al., 2007).

Por existir esse apoio direto dos microrganismos para o desenvolvimento das plantas, o aproveitamento dessa associação benéfica na biorremediação auxilia em uma maior eficácia para superar os problemas da salinidade. Esse tipo de manejo promove melhorias nas propriedades do solo, estimula e potencializa a atividade biológica, oferece uma maior produção de biomassa, entre outros fatores de bastante relevância ambiental (SILVA; FILHO; PEREIRA, 2015).

A aplicação de plantas para a recuperação de solos salinizados também é utilizada. Isso corresponde ao processo de fitorremediação. Para que esse processo apresente viabilidade em solos salinos (Quadro 2), é preciso que as plantas utilizadas sejam tolerantes aos teores de sais do solo e que consigam produzir biomassa suficiente para assimilar as concentrações dos sais (SILVA; CONTE, 2017).

Quadro 2 - Critérios para a seleção das plantas para a fitorremediação de solos salinizados.

Raízes profundas e densas.
Elevada taxa de crescimento.
Produção de biomassa.
Capacidade de evapotranspiração elevada.
Alta taxa de exsudação radicular.
Adaptação às condições climáticas e ambientais do local contaminado.
Fixação biológica de nitrogênio atmosférico.
Altas associações simbióticas com os fungos micorrízicos.
Facilidade no controle.
Facilidade em uma possível e futura erradicação.
Facilidade na remoção das plantas do local contaminado, quando necessária.
Ocorrência natural nos locais contaminados.

FONTE: Adaptado de Procópio et al. (2009)

No processo de fitorremediação de solos salinizados, as plantas se desenvolvem liberando alguns elementos dos minerais presentes no solo como cálcio e magnésio. E por isso, essas espécies contribuem para aumentar o percentual nos teores de nutrientes e também para estimular a atividade biológica (SILVA, 2016).

A fitorremediação é uma estratégia que realiza a absorção e acumulação dos sais por meio da extração e translocação dos íons para a parte aérea, reduzindo e/ou removendo assim a salinidade do solo. Esse mecanismo que é a fitoextração baseia-se na assimilação dos elementos pelas plantas e no metabolismo em seus tecidos (SILVA, 2015; SILVA; CONTE, 2017).

No processo de fitorremediação, as plantas absorvem o sódio e conseqüentemente reduzem a salinidade do solo. Mas esse não é o único benefício gerado pelo desenvolvimento das plantas, a maior atividade biológica na zona radicular estimula as propriedades do solo e isso faz com que ocorram elevações na concentração de CO₂ e na taxa de dissolução de carbonatos. Essas elevações atingem níveis suficientes para que parte do Na⁺ trocável seja removido, ficando assim livre na solução para que seja transportado por meio da lixiviação (SANTOS, 2012).

4.2 ESPÉCIES UTILIZADAS NA BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS

Várias espécies podem ser utilizadas na biorremediação (Quadro 3), porém quando se trata de solos salinos é preciso considerar a capacidade de tolerância e absorção dos sais e também a produção de biomassa. As espécies biológicas consideradas halófitas são as mais indicadas para a biorremediação de solos salinizados, isso em vista da capacidade de adaptação e sobrevivência mesmo diante dos elevados teores de sais.

Quadro 3 – Espécies aplicadas para a biorremediação de solos salinizados

Espécie	Efeito	Autores
<i>Suaeda marítima</i>	Redução da relação de adsorção de sódio (RAS) de 82%	RAVINDRAN et al. (2007)
<i>Sesuvium portulacastrum</i>	Redução da RAS de 75%	RAVINDRAN et al. (2007)
<i>Excoecaria agallocha</i>	Redução da RAS de 71%	RAVINDRAN et al. (2007)
<i>Clerodendron inerme</i>	Redução da RAS de 67%	RAVINDRAN et al. (2007)
<i>Ipomoea pescaprae</i>	Redução da RAS de 58%	RAVINDRAN et al. (2007)
<i>Heliotropium curassavicum</i>	Redução da RAS de 50%	RAVINDRAN et al. (2007)
<i>Atriplex numulária</i>	Dessalinização de 31%	LEAL et al. (2008)

<i>associada ao gesso</i>		
<i>Atriplex halimus</i>	Redução da condutividade elétrica de 65,3 dS m ⁻¹ para 3,8 dsm ⁻¹	GHARAIBEH; ELTAIF, ALBLASMEH (2011)
<i>Líquen Cladonia Verticillaris</i>	Redução nos teores de sódio de 87%	SILVA (2014)
<i>Heliotropium curassavicum</i>	26,5% na concentração de sais	HAN et al. (2015)
<i>Suaeda marítima</i>	71,4% na concentração de sais	HAN et al. (2015)
<i>Atriplex numulária</i>	Redução do sódio trocável de 65,65%	SANTOS (2016)
<i>Leucaena leucocephala</i>	Redução do sódio trocável de 10,84%	SANTOS (2016)
<i>Azadirachta indica</i>	Redução do sódio trocável de 26,75%	SANTOS (2016)
<i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>	Redução do sódio trocável de 30,36%	SANTOS (2016)
Cepa da bactéria CSSRY1	Redução do teor do sódio solúvel em até 31% na concentração de 4% de NaCl	ARORA & VANZA (2017)
Cepa da bactéria CSSRY1	Redução do teor do sódio solúvel em até 19% na concentração de 10% de NaCl	ARORA & VANZA (2017)

FONTE: Elaborado pelo autor.

A seleção das espécies na biorremediação de solos salinos é de extrema importância e deve se basear não só na capacidade de tolerância e assimilação dos sais, mas também na disponibilidade de um produto útil para a atividade agrícola. Outro fator importante é a tolerância à baixa concentração de oxigênio, pois esta é uma condição comumente encontrada em solos salinizados (SILVA, 2015).

Duas cepas de bactérias halofílicas se apresentam como promissoras para a redução da concentração de sais do solo, estas sendo a cepa CSSRO2 da bactéria *Planococcus maritimus* e a cepa CSSRY1 da bactéria *Nesterenkonia alba*. Os estudos realizados com as cepas bacterianas apresentam significativas diminuições nas concentrações de sais no solo e também em meio líquido (ARORA; VANZA, 2017).

A inoculação com esses isolados bacterianos auxilia ainda na promoção do desenvolvimento das plantas, pois ocorrem diversos processos como a produção de determinados hormônios que aumentam o crescimento radicular. Além disso, alguns

processos enzimáticos que ocorrem nas bactérias propiciam um alívio do estresse salino (ARORA; VANZA, 2017).

Em todo o mundo estão sendo realizados estudos de biorremediação com a finalidade de aumentar a produtividade no manejo de solos salinizados. Países como Índia e Austrália realizam diversas pesquisas acerca, respectivamente, do cultivo de plantas arbóreas tolerantes a sais e do cultivo de plantas halófitas em áreas semiáridas (ARORA; SINGH; SINGH, 2017).

No Brasil, existem poucos estudos com a finalidade de biorremediar os solos salinizados. As plantas do gênero *Atriplex* é a que se apresenta como predominante dentre as pesquisas que vêm sendo desenvolvidas. Essas plantas possuem uma alta eficiência na redução de sais, depositando estes em seus tecidos e apresentando assim um significativo crescimento vegetativo (SOUZA et al., 2012).

A planta *Atriplex nummularia*, espécie de erva-sal, é caracterizada como hiperacumuladora de sódio e por isso apresenta alta potencialidade para a remediação dos solos salinos. Estudos com de Leal et al. (2008) e Souza et al. (2011) evidenciam a eficiência dessa espécie na extração dos sais do solo, proporcionando assim reduções significativas que auxiliam na recuperação do solo.

De acordo com o estudo de Nasir (2009), as espécies *Tamarix aphylla*, *Atriplex nummularia* e *Atriplex halimus* são espécies que possuem uma alta capacidade de adaptação e sobrevivência em ambientes com concentrações elevadas de sais e com restrição hídrica. No estudo, o emprego das três espécies halófitas aplicado a um solo salino sódico ocasionou a diminuição da salinidade do solo.

Santos (2016) evidencia que o cultivo da *Atriplex nummularia* auxilia em melhorias no equilíbrio de cátions no solo, pois ocorre uma diminuição na concentração de sódio e um aumento nas concentrações de potássio e cálcio. Estes últimos sendo nutrientes de extrema importância para o desenvolvimento saudável das plantas.

A pesquisa de Silva (2015) evidencia que as espécies *Eleusine indica* e *Ipomoea asarifolia* podem ser utilizadas como alternativa para a recuperação de solos salinizados. Essas plantas apresentaram uma boa capacidade na absorção e assimilação dos sais presentes no solo e podem ser utilizadas para uma recuperação a ser realizada em curto espaço de tempo.

A pesquisa de Han et al. (2015) utilizou as espécies *Heliotropium curassavicum* e *Suaeda marítima*, estas são consideradas halófitas e apresentaram eficácia na diminuição do nível de salinidade do solo. O estudo de Silva et al. (2016) salienta que a espécie *Pennisetum glaucum* L. pode ser utilizada com a finalidade fitoextratora em sistemas de cultivo protegido.

As espécies *Batis marítima* L. e *Sesuvium portulacastrum* L. também apresentam potencialidade fitorremediadora, além disso, possui a capacidade de tolerar altos teores de salinidade (HAN et al., 2015).

A utilização do líquen *Cladonia verticillaris* também apresenta potencial na biorremediação de solos degradados pela salinização. As substâncias liberadas pelo *C. verticillaris* promovem a quelação e a complexação de compostos químicos presentes no solo. Esse processo de quelação acarreta uma recombinação química do solo que ocasiona a redução da salinidade e, além disso, o aumento nos índices de pH, cálcio e magnésio (SILVA et al., 2015).

Os estudos evidenciam que as espécies *Medicago sativa*, *Panicum turgidam*, *Suaeda fruticosa*, *Leucaena leucephala*, *Pennisetum americanum*, *Azadirachta indica* e *Mimosa caesalpinifolia* também apresentam potencialidade fitorremediadora de solos salinizados. Porém, também é evidenciada a necessidade do desenvolvimento de mais estudos para identificar os mecanismos e processos que ocorrem na absorção dos sais e no crescimento vegetativo.

4.3 APLICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

O semiárido brasileiro tem se tornado um dos principais focos de pesquisas voltadas para a preservação, conservação e restauração ambiental. A utilização de práticas agrícolas inadequadas é um dos processos que mais tem provocado o processo de salinização e conseqüentemente a degradação dos solos que provoca o surgimento de grandes áreas inutilizadas (SILVA, 2014).

As regiões semiáridas sofrem continuamente em decorrência de suas condições naturais serem caracterizadas como de alta aridez e elevadas taxas de salinidade. Em decorrência disso, a aplicação da biorremediação deve ser realizada primeiramente com a identificação e seleção de espécies que consigam se desenvolver e resistir a essas condições (CARREIRO, 2017).

De acordo com Souza et al. (2012), a planta halófito *Atriplex nummularia* apresenta alta potencialidade de sobrevivência em regiões semiáridas. Os padrões de desenvolvimento e as alterações anatômicas que a espécie apresenta conferem a ela a capacidade de ser cultivada em diferentes condições de restrição hídrica e de elevadas concentrações de sais. Por isso, esta planta pode contribuir de forma significativa para uma recuperação eficaz e uma gestão eficiente dos solos do semiárido brasileiro.

Além disso, Leal et al. (2008) salienta que a espécie se destaca ainda mais no semiárido pela produção constante de forragem e pela boa aceitação do gado. Por isso, pela alta digestibilidade e pelo seu valor nutritivo, a *Atriplex nummularia* pode ser considerada um recurso complementar na dieta de ruminantes. Os autores evidenciam ainda que a planta pode ser utilizada no paisagismo e na floricultura.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A biorremediação é uma tecnologia em desenvolvimento e por isso apresenta questões que ainda não foram respondidas. Ainda existe uma dificuldade na seleção dos organismos, pois há pouco conhecimento acerca da fisiologia, das doenças, da genética e da reprodução das espécies biorremediadoras.

Os estudos com a aplicação de vegetais visando a biorremediação de solos salinizados ainda são poucos e focados em poucas espécies. Por isso, é importante o desenvolvimento contínuo de estudos para compreender os mecanismos e aprimorar a técnica para que se torne mais viável.

Diante da análise de todos os estudos, pode-se observar e afirmar que as plantas do gênero *Atriplex* são as que se apresentam como predominante dentre as pesquisas que vêm sendo desenvolvidas. A fitorremediação apresenta ainda potencialidade na produção de biomassa, a qual pode ser colhida após a extração e aproveitada como fonte de alimento por exemplo.

É de extrema importância o desenvolvimento contínuo de estudos acerca da diversidade microbiana halofílica nos solos salinos, para que se possam utilizar essas espécies biológicas não só na recuperação de áreas salinizadas, mas também em outras áreas contaminadas. Como os estudos acerca dessa diversidade microbiana são escassos, existem grandes oportunidades e desafios para o futuro dentro dessa área.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. S. F. Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética química**, v. 35, n. 3, p. 17-43, 2010.
- ARAÚJO, M. M. ; SOUSA, G. M.; RODRIGUES, L. R. C. C. Técnicas utilizadas na recuperação de solos afetados por sais. **Revista de Agroecologia no Semiárido**, v. 1, n. 2, p. 1-11, 2017.
- ARORA, S.; SINGH, A. K.; SINGH, Y. P. Bioremediation of Salt A fected Soils: An Indian Perspective. 2017.
- ARORA, S.; VANZA, M. Microbial approach for bioremediation of saline and sodic soils. In: **Bioremediation of salt affected soils: an Indian perspective**. Springer, Cham, 2017. p. 87-100.
- ASSUNÇÃO, A. W. A. et al. Utilização de macrófitas aquáticas de três diferentes tipos ecológicos para remoção de Escherichia coli de efluentes de criação de pacu. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 657-663, 2017.
- CARREIRO, D. A.; LEITE, José Cleidimário Araújo. Fitorremediação de solos salinizados no semiárido brasileiro: Uma revisão de literatura. 2017. II CONIDIS.
- CAVALCANTE, L. F. et al. Recuperação de solos afetados por sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (eds.). Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados. Fortaleza, INCTSal, p.423-448. 2010.
- CLEMENTE, M. I. B. et al. Espécies fitorremediadoras em solos hipersalinos do estuário no Rio Apodi-Mossoró (RN). 2021.
- COUTINHO, P. W. R. et al. Alternativas de remediação e descontaminação de solos: biorremediação e fitorremediação. **Nucleus**, v. 12, n. 1, p. 59-68, 2015.
- DEON, M. C. et al. Biorremediação de solos contaminados com resíduos oleosos através de bioaugmentação e atenuação natural. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 33, n. 1, p. 73-82, 2012.
- FAVAS P. J. C. et al. Phytoremediation of Soils Contaminated with Metals and Metalloids at Mining Areas: Potential of Native Flora. In: Environmental Risk Assessment of Soil Contamination, Maria C. Hernandez Soriano, editors. InTech; 2014. p. 485-517.
- FERREIRA, M. G. P. et al. Bioremediation and biocontrol of commercial probiotic in marine shrimp culture with biofloc. **Latin american journal of aquatic research**, v. 45, n. 1, p. 167-176, 2017.

FILHO, J.N. et al. FITOEXTRAÇÃO DE SAIS DO SOLO POR CAPIM-ANGOLA IRRIGADO NO VALE DO SÃO FRANCISCO, PERNAMBUCO. **IRRIGA**, v. 1, n. 2, p. 67-73, 2015.

FREITAS, F. C. M. ATIVIDADE MICROBIANA EM FUNÇÃO DA SALINIDADE DO SOLO. 2016. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ecologia e Conservação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2016.

GHARAIBEH, M. A.; ELTAIF, N. I.; ALBALASMEH, A. A. Reclamation of Highly calcareous saline sodic soil using *Atriplex Halimus* and by-product Gypsum. **Journal International Phytoremediation**, v.9, p.873–883, 2011.

GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCTSal, 2010.

HAN, L. P. et al. Phytoremediating coastal saline soils with oats: accumulation and distribution of sodium, potassium, and chloride ions in plant organs. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 73-81, 2015.

HOLANDA, C. A. et al. Remoção do corante têxtil turquesa de remazol empregando aguapé (*Eichhornia crassipes*) como adsorvente. **Orbital: The Electronic Journal of Chemistry**, v. 7, n. 2, p. 141-154, 2015.

LEAL, I. G. et al. Fitorremediação de solo salino sódico por *Atriplex nummularia* e gesso de jazida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1065-1072, 2008.

LEITE, M. J. H. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS PRINCIPAIS SOLOS DA REGIÃO SEMIÁRIDA. RECIMA21-**Revista Científica Multidisciplinar**-ISSN 2675-6218, v. 3, n. 10, p. e3101964-e3101964, 2022.

LIMA, A. P. C. **Potencial fitorremediador de espécies vegetais em áreas de mineração do semiárido pernambucano**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

MENDOZA, Y. I.; I PÉREZ, J.; GALINDO, A. A. Evaluación del Aporte de las Plantas Acuáticas *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* en el Tratamiento de Aguas Residuales Municipales. **Información tecnológica**, v. 29, n. 2, p. 205-214, 2018.

MUNNS, R. The impact of salinity stress. *Plantstress*. Virtual article. 2012.

NASIR, F. A. Bioreclamation of a saline sodic soil in a semi arid region/Jordan, American-Eurasian. **Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, vol. 5, p. 701–706, 2009.

PANDOLFI, C.; MANCUSOA, S.; SHABALAB, S. Physiology of acclimation to salinity stress in pea (*Pisum sativum*). **Environmental and Experimental Botany**. v. 84. p. 44-51. 2012.

PEDROTTI, A. et al. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 1308-1324, 2015.

PEREIRA, A. R. B.; FREITAS, D. A. F. Uso de micro-organismos para a biorremediação de ambientes impactados. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v. 6, n. 6, p. 995-1006, 2012.

PROCÓPIO, S. de O. et al. Fitorremediação de solos com resíduos de herbicidas. **Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros**, 2009.

RAVINDRAN, K. C. et al. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v.39, p.2661-2664, 2007.

REGINATTO, C.; COLLA, L. M.; THOMÉ, A. Biorremediação de resíduos oleosos em solos. **Revista CIATEC-UPF**, v. 3, n. 2, p. 19-31, 2011.

RIBEIRO, M. R. Origem e Classificação dos Solos Afetados por Sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Eds.). Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados. Fortaleza, INCTSal. p.11-19. 2010.

RIBEIRO, M. R.; BARROS, M. F. C.; FREIRE, M. B. G. S. Química dos solos salinos e sódicos. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (eds.). Química e mineralogia do solo. Parte II – Aplicações. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.449-484. 2009.

RICHARDS, L. A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: USDA, 1969. 160p. (USDA. Agriculture Handbook, 60).

RODRIGUES, A. B. M. et al. A biotecnologia como instrumento de recuperação de corpos hídricos. **Multidisciplinary Reviews**, v. 1, p. 1-6, 2018.

RODRIGUES, A. C. D. et al. Mecanismos de respostas das plantas à poluição por metais pesados: Possibilidade de uso de macrófitas para remediação de ambientes aquáticos contaminados. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 1, p. 262-276, 2016.

SANTOS, M. A. Recuperação de solo salino-sódico por fitorremediação com *Atriplex nummularia* ou aplicação de gesso. 2012.

SANTOS, M. A. Adaptabilidade e potencial fitorremediador de espécies vegetais em solo salino. 2016.

SILVA, A. K. O. **Biorremediação de solos salinizados procedentes de áreas em processo de desertificação mediante uso do líquen *Cladonia Verticillaris* (RADDI) FR.** 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

SILVA, A. K. O.; FILHO, F. O. M.; PEREIRA, E. C. G. BIORREMEDIAÇÃO DE SOLOS DEGRADADOS PELA SALINIZAÇÃO NO MUNICÍPIO DE CABROBÓ (PE) ATRAVÉS DO USO DO LÍQUEN CLADONIA VERTICILLARIS. **ORGANOGRAMA INSTITUCIONAL**, p. 3475. 2015.

SILVA, J. J. et al. Fitorremediação e gessagem em solo afetado por sais. 2015.

SILVA, J. L. A. et al. Evolução da salinidade em solos representativos do Agropólo Mossoró-Assu cultivado com meloeiro com água de diferentes salinidades.

Agropecuária Científica no Semiárido, v.7, n.4, p.26-31. 2011.

SILVA, J. S.; SANTOS, S. S.; GOMES, F. G. G. Biotechnology as strategies for reversal of contaminated áreas by solid waste. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v. 18, n. 4, p. 1361-1370, 2014.

SILVA, R. Z. et al. Fitorremediação de solos salinos em sistema de cultivo protegido. **Revista Cultivando o Saber**, v. 9, n. 4, p. 85-92, 2016.

SILVA, R. Z.; CONTE, A. M. FITORREMEDIAÇÃO DE SOLOS SALINIZADOS PELA APLICAÇÃO DE VINHAÇA. **Sci. Agrar. Parana.**, Marechal Cândido Rondon, v. 16, n. 3, jul./set., p. 383-392, 2017.

SIMÃO, C. J. B. et al. A biorremediação como técnica de tratamento de efluentes contaminados por petróleo. **Blucher Chemistry Proceedings**, v. 3, n. 1, p. 821-830, 2015.

SOUZA, E. R. et al. Biomass, anatomical changes and osmotic potential in *Atriplex nummularia* Lindl. cultivated in sodic saline soil under water stress. **Environmental and Experimental Botany**, v.82, p.20-27, 2012.

SOUZA, E. R. et al. Fitoextração de sais pela *Atriplex nummularia* Lindl. sob estresse hídrico em solo salino sódico. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n. 5, p.477–483, 2011.

TAN, K. A.; MORAD, N.; OOI, J. Phytoremediation of methylene blue and methyl orange using *Eichhornia crassipes*. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 7, n. 10, p. 724, 2016.

TOMASSONI, F. et al. Técnica de biorremediação do solo. **Acta Iguazu**, v. 3, n. 3, p. 46-56, 2014.

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto: Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por: Adolf Araújo
Tipo do Documento: Dissertação
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Adolf Hitler Cardoso de Araújo, ALUNO (202013300006) DE ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO DOS RECURSOS AMBIENTAIS DO SEMIÁRIDO - CAMPUS PICUÍ,** em 20/06/2023 17:12:50.

Este documento foi armazenado no SUAP em 03/07/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 868286
Código de Autenticação: 96397a3746

