

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

LETÍCIA NIPPES BARBOZA

**AVALIAÇÃO DA BIORREMEDIAÇÃO COMO FERRAMENTA NA GESTÃO DE
REJEITOS DE MATERIAIS RADIOATIVOS DE OCORRÊNCIA NATURAL (NORM)
COM FOCO EM URÂNIO E TÓRIO**

VITÓRIA

2025

LETÍCIA NIPPES BARBOZA

**AVALIAÇÃO DA BIORREMEDIAÇÃO COMO FERRAMENTA NA GESTÃO DE
REJEITOS DE MATERIAIS RADIOATIVOS DE OCORRÊNCIA NATURAL (NORM)
COM FOCO EM URÂNIO E TÓRIO**

Projeto de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Ambiental do
Centro Tecnológico da Universidade Federal
do Espírito Santo, como requisito para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Renato Siman

VITÓRIA

2025

RESUMO

Os materiais radioativos de ocorrência natural (NORM – naturally occurring radioactive materials) podem ser gerados em diversas atividades industriais, como mineração e produção de petróleo e gás, apresentando desafios de gestão devido ao grande volume, à longa meia-vida e aos potenciais riscos ambientais. Este estudo, fundamentado em uma revisão bibliográfica abrangente, analisa a biorremediação aplicada a urânio e tório — elementos primários presentes em rejeitos NORM — e avalia sua eficiência em condições laboratoriais. Também aborda a geração, as características e os desafios relacionados ao gerenciamento desses rejeitos no Brasil, onde não existem depósitos finais em operação, o que leva ao uso exclusivo de depósitos intermediários. São discutidas limitações operacionais, custos e riscos ambientais, bem como o potencial de microrganismos e plantas para a remoção e imobilização de radionuclídeos. As pesquisas indicam que bactérias, fungos e espécies vegetais apresentam elevada capacidade de bioabsorção em condições laboratoriais, embora a aplicação em escala real ainda enfrente barreiras técnicas e regulatórias. Considera-se a possibilidade de integrar a biorremediação a métodos físico-químicos e térmicos consolidados, buscando potencialmente maior eficiência e viabilidade econômica na gestão de longo prazo dos rejeitos NORM, reconhecendo que a viabilidade dessa integração depende de análises técnicas e econômicas adicionais.

ABSTRACT

Naturally occurring radioactive materials (NORM) can be generated in various industrial activities, such as mining and oil and gas production, posing management challenges due to their large volume, long half-life, and potential environmental risks. This study, based on a comprehensive literature review, analyzes bioremediation applied to uranium and thorium—primary elements present in NORM waste—and evaluates its efficiency under laboratory conditions. It also addresses the generation, characteristics, and challenges related to the management of such waste in Brazil, where there are no final disposal facilities in operation, leading to the exclusive use of intermediate storage facilities. Operational limitations, costs, and environmental risks are discussed, as well as the potential of microorganisms and plants for the removal and immobilization of radionuclides. The research indicates that bacteria, fungi, and plant species show high biosorption capacity under laboratory conditions, although large-scale application still faces technical and regulatory barriers. The possibility of integrating bioremediation with established physicochemical and thermal methods is considered, potentially improving efficiency and economic feasibility in the long-term management of NORM waste, while acknowledging that the viability of such integration depends on further technical and economic analyses.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Classificação e método de deposição dos rejeitos radioativos	14
Tabela 2 - Limites de dispensa para radionuclídeos em rejeitos líquidos e gasosos	17
Tabela 3 - Níveis de isenção de quantidades até 1 tonelada de material em concentrações de atividades e atividade total de radionuclídeos	18
Tabela 4 - Principais grandezas e unidades de radiação ionizante	18
Tabela 5 - Tempos de meia-vida de alguns radionuclídeos	23
Tabela 6 - Resultado das pesquisas sobre biorremediação aplicada a radionuclídeos	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação dos métodos de remoção de contaminantes em efluentes líquidos25

Quadro 2 - Tecnologias de tratamento prévio disponíveis para os rejeitos NORM27

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1. Gerenciamento de rejeitos NORM	11
3.2. Limites de dispensa para rejeitos radioativos	16
3.3. Métodos de deposição de rejeitos NORM	19
3.4. Biorremediação	20
3.5. Métodos convencionais de tratamento de rejeitos NORM	24
4. METODOLOGIA	28
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6.1. Desafios na gestão atual de rejeitos NORM no Brasil	31
6.2. Sistematização da Biorremediação em radionuclídeos	33
6.3. Aplicação e Integração da Biorremediação na Gestão de NORM	36
6.4. Recomendações para aprimorar a gestão de rejeitos contaminados	39
7. CONCLUSÃO	41
8. REFERENCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

Os materiais radioativos de ocorrência natural (NORM - sigla do inglês *naturally occurring radioactive materials*) são elementos que existem naturalmente na crosta terrestre, geralmente em concentrações muito baixas. Entretanto, processos geológicos podem levar ao acúmulo de radionuclídeos em determinadas formações rochosas e minérios. Esses materiais incluem radionuclídeos como urânio, tório e rádio, além de produtos de decaimento, como o radônio e, em algumas situações, o polônio-210, e podem ser concentrados em algumas atividades industriais, como mineração, processamento de minérios, produção de petróleo e gás. (SCHROEYERS, 2017). Esses materiais podem oferecer riscos à saúde humana e ao meio ambiente, exigindo uma gestão adequada em todas as etapas do ciclo de vida, desde a geração até o descarte final. (IBP, 2019; IAEA 2013).

A geração de rejeitos contaminados com NORM é uma consequência inevitável das atividades de mineração, e podem apresentar diferentes formas, como sólidos, líquidos ou gasosos, bem como variar em termos de concentração e composição dos radionuclídeos presentes. Gazineu (2005) realizou análises para determinar as concentrações de radionuclídeos em borras e incrustações provenientes de equipamentos de extração de petróleo de uma mesma fonte. Os resultados indicaram que esses resíduos podem conter concentrações de Rádio-226 (^{226}Ra) variando de 413,4 a 2.110,0 kBq/kg, Rádio-228 (^{228}Ra) entre 117,9 e 1.550,0 kBq/kg, e Tório-228 (^{228}Th) de 170,4 a 1.602,0 kBq/kg.

Segundo a IAEA (2020), a gestão de NORM representa um grande desafio devido ao volume gerado, o que exige extensas áreas para armazenamento e descarte, além de cuidados estruturais e ambientais, como a prevenção da contaminação de águas subterrâneas. Esses fatores podem gerar custos significativos, comprometendo a viabilidade econômica de algumas atividades industriais. No setor de petróleo e gás *offshore*, o descomissionamento é um dos principais desafios, pois resulta na geração de grandes quantidades de rejeito NORM.

Entre 2016 e 2021, estimava-se que cerca de 600 instalações *offshore* seriam descomissionadas globalmente, e, segundo dados da Noruega, cada uma pode gerar até

4 toneladas de rejeito com concentrações de atividade superiores a 10 Bq/g (IAEA 2020). Para outras indústrias que lidam com NORM, a extensão dos volumes gerados ainda não é completamente quantificada, porém, estima-se que sejam expressivos e representem um desafio significativo para a gestão desses materiais. No Brasil, informações sobre a geração de rejeitos contendo NORM não estão publicamente disponíveis, o que representa uma lacuna que compromete tanto a quantificação precisa desses volumes quanto o planejamento de estratégias de gestão.

Além disso, de acordo com o IBP (2019), embora o NORM geralmente apresente baixos e médios níveis de radiação, a maioria contém radionuclídeos de meia-vida (tempo de desintegração) longa. Isso significa dizer que, embora o risco associado ao material seja reduzido quando em comparação a outros materiais radioativos, apresentarão este risco por um período mais elevado.

Para a indústria minero-industrial, na última década, as inspeções têm indicado que o principal problema enfrentado é a gestão e a deposição de NORM, muitas vezes, de forma inadequada, com consequências à proteção do público e ambientais. (SCHENATO; RUPERTI JUNIOR, 2016; REIS, 2016).

Atualmente, a estratégia mais adotada no Brasil para disposição desses rejeitos envolve o armazenamento em locais licenciados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), com controle rigoroso de exposição e monitoramento contínuo e seu gerenciamento apresenta algumas limitações, como:

- I. Geração em grandes quantidades: Embora sua atividade radioativa seja geralmente baixa, os rejeitos contendo NORM podem ser gerados em volumes significativos, tornando o gerenciamento mais desafiador. O aumento progressivo no volume de rejeitos NORM gera uma demanda crescente por áreas de armazenamento licenciadas (IAEA, 2020).
- II. Acúmulo progressivo: O armazenamento, apesar de ser uma solução temporária, não resolve o problema a longo prazo, pois esses materiais permanecem radioativos por períodos prolongados (REIS, 2016).

- III. Custo de armazenamento: O monitoramento e a manutenção dessas áreas envolvem custos elevados relacionados à necessidade de controle a longo prazo. (REIS, 2016).
- IV. Riscos ambientais e à saúde: O gerenciamento inadequado de rejeitos NORM pode resultar na liberação de radionuclídeos, causando contaminação ambiental e potencialmente à saúde humana (IBP, 2019).

Essa gestão poderia ser otimizada a partir da pesquisa novas tecnologias de tratamento, capazes de reduzir custos e riscos com coleta e transporte de resíduos perigosos. Conforme estudos de Anobala *et al.* (2018), Manobala *et al.* (2019), Fathi *et al.* (2014) e Yi *et al.* (2016), bactérias e fungos, demonstram potencial para sorver contaminantes, incluindo metais pesados e radionuclídeos como urânio, tório e rádio, promovendo sua imobilização e, potencialmente, sua remoção do ambiente.

Sua aplicação bem-sucedida em outros contextos de remediação ambiental, como solos contaminados por petróleo, produtos químicos e óleos, sugere potencial para adaptação dessa tecnologia à gestão de rejeitos NORM, hipótese que merece ser explorada diante dos desafios associados ao seu descarte e armazenamento.

A busca por alternativas eficazes na gestão de rejeitos NORM é impulsionada não apenas pela necessidade de reduzir os impactos ambientais e operacionais, mas também pelo avanço das regulamentações ambientais e necessidade por melhorias na gestão de rejeitos radioativos. Além disso, a literatura científica ainda apresenta lacunas no que diz respeito à aplicação da biorremediação específica em rejeitos NORM.

Dessa forma, este estudo busca contribuir para a ampliação do conhecimento sobre a viabilidade da biorremediação deste resíduo, fornecendo subsídios para futuras pesquisas e para o desenvolvimento de estratégias complementares às técnicas convencionais de tratamento desses rejeito.

2. OBJETIVOS

Objetivo Geral:

Analisar a aplicabilidade da biorremediação como uma alternativa para a gestão de rejeitos contendo NORM, analisando sua aplicabilidade com base em estudos experimentais disponíveis e identificando desafios para sua implementação em escala real.

Objetivos específicos:

- I. Destacar os desafios associados à gestão de NORM por meio de revisão bibliográfica abrangente.
- II. Sistematizar estudos científicos sobre biorremediação aplicada à remoção de radionuclídeos (urânio e tório), identificando possíveis organismos utilizados e sua eficiência no processo.
- III. Discutir a aplicação da biorremediação, e avaliar possível integração às estratégias existentes de gestão de rejeitos radioativos no Brasil.
- IV. Propor recomendações para aprimorar a gestão de rejeitos contaminados com NORM no Brasil.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Gerenciamento de rejeitos NORM

Segundo a IAEA (2013), todos os minerais e matérias-primas contêm radionuclídeos de origem natural, sendo os mais relevantes para fins de radioproteção os radionuclídeos das séries de decaimento urânio-238 (^{238}U) e tório-232 (^{232}Th), e o potássio-40 (^{40}K). Para a maioria das atividades envolvendo minerais e matérias-primas, os níveis de exposição a esses radionuclídeos não são motivo de preocupação. Entretanto, durante a extração de minerais da crosta terrestre e seu processamento físico ou químico, os radionuclídeos podem ficar desigualmente distribuídos entre os diversos materiais decorrentes do processo, perturbando o equilíbrio da cadeia de decaimento. Resultando em concentrações aumentadas a esses radionuclídeos (IAEA 2013).

Ainda de acordo com a IAEA, a geração de rejeitos NORM está relacionada às atividades industriais de exploração dos recursos minerais e energéticos, notadamente, a mineração, o beneficiamento físico, químico e processos térmicos que visam separar, extrair e processar esses recursos. Alguns dos processos mais frequentemente associados ao processamento de NORM com concentrações elevadas de materiais radioativos incluem mineração e moagem de minérios metálicos e não metálicos, petróleo e gás e materiais de construção.

- I. Mineração e processamento de minerais: A mineração e o processamento de minerais como o urânio, tório, areias monazíticas, dentre outros, podem gerar rejeitos contendo NORM, que podem ser resultantes da extração, beneficiamento, concentração e purificação dos minerais.
- II. Óleo e gás: São gerados durante as atividades de exploração e produção de petróleo e gás, como a perfuração de poços e a produção de fluidos de produção e, podem estar presentes em equipamentos, tubulações, sedimentos, água de produção e outros materiais gerados nessas operações.
- III. Rejeitos de construção civil: Materiais de construção, como areias, rochas, cerâmicas e outros produtos à base de minerais, podem conter concentrações de radionuclídeos que os classificam como rejeitos de NORM quando descartados.

Embora não seja diretamente aplicável aos rejeitos radioativos, a Lei Federal 12.305, de 02 de ago. de 2010, estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), com o objetivo de regulamentar a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos no país, delineando princípios, instrumentos fundamentais e objetivos como a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. A PNRS também define conceitos de relevante entendimento, como resíduos sólidos, definidos materiais descartados por atividades humanas que exigem destinação adequada, incluindo substâncias em estado sólido, semissólido, gases em recipientes e líquidos que não podem ser despejados diretamente no esgoto ou corpos d'água sem tratamento viável. Adicionalmente, define rejeitos como resíduos sólidos que, após analisadas todas as formas de tratamento viáveis, só apresentam como possibilidade, a disposição final.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) estabelece uma abordagem categorizada e classifica como rejeitos radioativos os materiais provenientes de atividades humanas que contenham radionuclídeos acima dos limites de isenção estabelecidos e cuja reutilização não seja viável ou prevista. A regulamentação nacional sobre rejeitos radioativos é composta por diferentes normas que estabelecem critérios técnicos e de segurança para seu gerenciamento. Entre elas, destacam-se:

- **Norma CNEN NN 3.01** - Requisitos básicos de radioproteção e segurança radiológica de fontes de radiação;
- **Norma CNEN NN 5.01/2021** - Regulamento para o transporte seguro de materiais radioativos;
- **Norma CNEN NN 6.06/1990** - Seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos;
- **Norma CNEN NN 6.09/2002** - Critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação; Norma CNEN NN 8.01/2025 - Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação;
- **Norma CNEN NN 8.02/2014** - Licenciamento de depósitos de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação;

- **RESOLUÇÃO Nº 288/2021** - Estabelece os requisitos necessários para o registro de instalações de exploração e produção de óleo e gás (E&P) para a realização de atividade de limpeza e acondicionamento de rejeitos contendo NORM;
- **Lei nº 10.308/2001** - Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos.

A Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN) foi instituída pela Lei nº 14.222, de 15 de outubro de 2021, a partir da cisão da CNEN e foi instituída com a finalidade de passar para a ANSN as funções de regulação e fiscalização, enquanto a CNEN se dedicaria a pesquisa e desenvolvimento no campo da energia nuclear. Nessa legislação, foram transferidas da CNEN para a ANSN as competências e obrigações estabelecidas na Lei nº 9.765/1998 (Lei nº 14.222/2021).

Apesar de sua criação em 2021, a ANSN ainda não foi implementada e portanto, as normas regulamentadoras estabelecidas pela CNEN permanecem válidas, uma vez que não houve alterações pela ANSN.

A Norma CNEN NN 8.01, de abril de 2025, que trata da gerência e rejeitos radioativos, os classifica levando em consideração não apenas seus níveis de radiação mas também suas meias-vidas. Adicionalmente, a norma CNEN NN 8.02, estabelece métodos apropriados para a dispensa ou deposição para classe específica de rejeito (Tabela 1).

Tabela 1 Classificação e método de deposição dos rejeitos radioativos

Classe	Tipo	Característica	Métodos de Dispensa ou Deposição
0	Rejeitos Isentos (RI)	Rejeitos com radionuclídeos com valores de atividade abaixo dos níveis de dispensa*	dispensados sem restrições radiológicas
1	Rejeitos de Meia-Vida Muito Curta (RVMC):	Rejeitos com meia-vida inferior ou da ordem de 100 dias e níveis de atividade ou concentração acima dos limites de dispensa	armazenados para decaimento e, posteriormente, dispensados, na rede de esgotos sanitários ou no sistema de coleta de resíduo urbano
2.1	Rejeitos de Meia-Vida Curta (RBMN-VC)	Baixo e médio níveis de radiação, emissores beta/gama, com meia-vida da ordem de 30 anos e concentração de radionuclídeos emissores alfa de meia-vida longa limitada a 3700 kBq/kg	depositados em depósitos próximos à superfície
2.2	Rejeitos contendo Radionuclídeos Naturais (RBMN-RN)	Rejeitos contendo radionuclídeos de origem natural das séries do urânio e tório em concentrações de atividade ou atividades acima dos níveis de dispensa estabelecidos na Norma CNEN NN 3.01	depositados em depósitos próximos à superfície ou em profundidade definida pela análise de segurança
2.4	Rejeitos de Meia-Vida Longa (RBMN-VL)	Rejeitos não enquadrados nas Classes 2.2, com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa	depositados em formações geológicas com profundidade definida pela análise de segurança
3	Rejeitos de Alto Nível de Radiação (RAN)	rejeitos com potência térmica superior a 2kW/m ³ e com concentrações de radionuclídeos de meia-vida longa que excedam as limitações para classificação como rejeitos de meia-vida curta	N/D

Fonte: Adaptado da norma CNEN 8.01 e CNEN 8.02

Dentre as classes apresentadas na Tabela 1, os rejeitos NORM enquadram-se nas classes 2.2, que possuem como métodos disponíveis para deposição o depósito próximo à superfície ou em profundidade. Esses depósitos são estabelecidos em quatro categorias distintas para rejeitos radioativos:

- O depósito inicial, localizado na própria instalação geradora e de responsabilidade do titular da instalação geradora dos rejeitos, com a função de armazenar os rejeitos por determinado período;
- O intermediário, instalação licenciada, cuja responsabilidade legal é do titular da instalação que o opera, e que recebe e, quando necessário, acondiciona esses materiais antes da destinação final (CNEN NN 6.09);
- O final, instalação licenciada, cuja responsabilidade legal também é do titular da instalação que o opera e é destinado à disposição definitiva dos rejeitos radioativos.
- O depósito provisório é reservado para armazenar rejeitos decorrentes de acidentes nucleares ou radiológicos e é de responsabilidade legal do titular da instalação que opera o depósito, devendo ser descomissionado quando todos os rejeitos forem transferidos para um depósito intermediário ou final (CNEN, 2014).

No Brasil, atualmente não há depósito final em operação para rejeitos radioativos. Assim, esses materiais são armazenados apenas em depósitos intermediários, como o depósito operado pelo IEN no Rio de Janeiro, autorizado pela CNEN para receber rejeitos de baixa e média atividade, atendendo prioritariamente os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo (CNEN, 2021). Nesses casos, conforme os Artigos 20 e 26 da Lei nº 10.308/2001, todos os direitos sobre os rejeitos são transferidos à CNEN, bem como a responsabilidade civil por danos radiológicos, pessoais, patrimoniais e ambientais decorrentes de sua presença nesses locais (BRASIL, 2001).

A Norma CNEN NN 6.09, que define os critérios para a aceitação e deposição de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação (CNEN, 2014, p.7), determina que esses materiais devem atender a requisitos específicos para garantir sua disposição adequada. Entre as exigências estabelecidas, destacam-se:

“5.1.1 Rejeito Líquido

O rejeito líquido deverá estar incorporado em matriz, homogeneamente distribuído e com um mínimo de material segregado, formando um produto monolítico.

5.1.2 Resina

As resinas deverão ser incorporadas em matriz, homogeneamente distribuídas e com um mínimo de material segregado, formando um produto monolítico

5.1.3 Rejeito Sólido Compressível

Os rejeitos sólidos compressíveis deverão ser comprimidos com força de compactação igual ou superior a 500 kPa

5.1.4 Rejeito Sólido Não-Compressível

Todos os rejeitos não-compressíveis deverão ser imobilizados em matriz, de modo a reduzir o potencial de migração ou dispersão dos radionuclídeos.

5.1.5 Filtros

Os filtros contaminados deverão ser imobilizados, fragmentados ou inteiros, em matriz, de modo a reduzir o potencial de migração ou dispersão dos radionuclídeos.

5.1.6 Óleos

No caso de solidificação de óleos contaminados não será permitida a sua mistura ou diluição em rejeitos de outra natureza. Deverão ser observadas as recomendações concernentes à combustibilidade e, como os demais rejeitos, deverão ser incorporados em matriz, homogeneamente distribuídos e com um mínimo de segregação, formando um produto monolítico. (...)"

3.2. Limites de dispensa para rejeitos radioativos

Os limites de descarte indicam em quais situações os rejeitos radioativos podem ser excluídos do controle regulatório específico aplicável a rejeitos radioativos, com base em sua atividade. Nesses casos, o gerenciamento passa a seguir a classificação estabelecida pela ABNT NBR 10004:2004, conforme o enquadramento do resíduo como Classe I (perigoso) ou Classe II (não perigoso). A CNEN estabelece critérios específicos de dispensa que variam conforme a forma física do rejeito (sólida, líquida ou gasosa) e a quantidade gerada.

A Norma CNEN NN 8.01/2025 apresenta, entre outros, os limites para descarte de rejeitos líquidos e gasosos, os quais estão organizados por radionuclídeo e especificados em termos de concentração de atividade, conforme demonstrado na Tabela 2. Além disso, para resíduos na fase sólida com massa de até 1 tonelada, a Norma CNEN NN

3.01/2025 traz os níveis de isenção aplicáveis, estabelecendo tanto os limites de concentração (em Bq/g) quanto a atividade total admissível (em Bq), conforme apresentado na Tabela 3.

Complementarmente, a Norma CNEN NN 8.01/2025 também traz uma disposição específica no Art. 31-A (CNEN, 2025, p. 6), voltada à dispensa de rejeitos sólidos contendo radionuclídeos de origem natural:

“Art. 31-A. A dispensa sem considerações adicionais de grandes quantidades de rejeitos contendo radionuclídeos de origem natural deve atender aos valores limitados de concentração de atividade de 1 Bq/g para cada radionuclídeo das séries de decaimento do urânio e do tório, e 10 Bq/g para K-40.”

Embora a norma não apresente uma definição específica para o termo “grandes quantidades”, outras normas da CNEN, como a NN 3.01, estabelecem a separação entre materiais com massa inferior e superior a 1.000 kg, como critério de referência para aplicação dos limites de isenção e classificação de rejeitos.

Tabela 2 - Limites de dispensa para radionuclídeos em rejeitos líquidos e gasosos

Radionuclídeo	Nível de dispensa de rejeitos líquidos (Bq/m ³)	Nível de dispensa de rejeitos gasosos (Bq/m ³)
Rádio-226	1,1E+03	1,7E-02
Rádio-228	1,1E+03	3,7E-02
Tório-232	5,6E+02	7,4E-05
Tório-228	3,7E+03	3,7E-04
Urânio-235	5,6E+03	1,1E-03
Urânio-238	5,6E+03	1,1E-03

Fonte: Adaptado de CNEN 8.01, 2025.

Tabela 3 - Níveis de isenção de quantidades até 1 tonelada de material em concentrações de atividades e atividade total de radionuclídeos

Radionuclídeo	Concentração de Atividade (Bq/g)	Atividade (Bq)
Rádio-226 ^b	1×10^1	1×10^4
Rádio-228 ^b	1×10^1	1×10^5
Tório-232	1×10^1	1×10^4
Tório-228 ^b	1×10^0	1×10^4
Urânio-235 ^b	1×10^1	1×10^4
Urânio-238 ^b	1×10^1	1×10^4

b - valores consideram os radionuclídeos em equilíbrio secular com seus filhos.

Fonte: Adaptado de CNEN 3.01, 2025.

A radiação ionizante pode ser expressa de diferentes formas, e cada unidade está associada a um aspecto específico. Podemos medir a atividade da fonte, a quantidade de energia absorvida ou ainda o efeito biológico dessa radiação sobre o organismo. A tabela 4 a seguir resume as principais grandezas e unidades utilizadas.

Tabela 4 - Principais grandezas e unidades de radiação ionizante

Atividade radioativa		
becquerel	Bq	1 desintegração nuclear por segundo.
curie	Ci	$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
Dose absorvida		
Gray	Gy	1 J/kg
Dose de radiação absorvida	rad	energia absorvida pela matéria 0,01 Gy
Dose equivalente		
Sievert	Sv	1 J/kg ponderado por fator de dano biológico
Roentgen	rem	0.01 Sv

Fonte: Adaptado de Ramos & Tauhata (2002, revisado em 2011), IRD/CNEN.

3.3. Métodos de deposição de rejeitos NORM

No Brasil, as Normas CNEN NN 8.01 e 8.02 preveem que a deposição de rejeitos NORM deve ocorrer exclusivamente em superfície ou em profundidade, seguindo critérios rigorosos de segurança, sendo que dessas opções o depósito em superfície é a metodologia difundida para rejeitos radioativos, a utilização de depósitos em profundidade no Brasil ainda está em fase de estudo e desenvolvimento. No entanto, conforme apontado por Oliveira de Tello et al. (2024), existem outras formas de deposição permitidas aplicadas em outros países, como os Estados Unidos, que adotam deposição em poço selado e abandonado, deposição em aterro, deposição em instalações licenciadas e Injeção em formações geológicas específicas e outros.

Deposição em Minas desativadas: Schenato et al. (2013) citam o uso de minas desativadas como uma alternativa para a deposição de rejeitos de NORM, onde os rejeitos, acondicionados em contêineres, são armazenados no subsolo. Entretanto, essa abordagem apresenta desafios como o risco de contaminação de aquíferos e possíveis oposições do público devido a preocupações ambientais e de segurança.

Depósitos de Sal: Nos Estados Unidos, os depósitos de sal ocorrem principalmente na forma de sal em camadas e domos de sal, porém, apenas algumas regiões apresentam quantidades e condições adequadas para exploração comercial (VEIL *et al.*, 1998). Os Depósitos de sal, além de ocorrerem no subsolo, possuem propriedades como autorreparo, baixa permeabilidade e alta condutividade térmica, o que os torna uma boa opção para armazenar rejeitos nucleares, pois essas características ajudam a dissipar o calor dos resíduos e a impedir a liberação de radionuclídeos no meio ambiente humano (AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY, 2020). Segundo Schenato (2013), os riscos associados à essa estratégia são a possibilidade de intrusão inadvertida e de contaminação pela liberação de fluidos através das fissuras.

Injeção e o Fraturamento Hidráulico: A injeção e o fraturamento hidráulico são métodos utilizados para o descarte de rejeitos de NORM em formações geológicas subterrâneas. O processo pode envolver a trituração e moagem dos rejeitos, transformando-os em uma pasta que facilita o bombeamento para o subsolo sob pressão

de fraturamento (VEIL *et al.*, 1998). O sucesso desse método depende do controle da pressão de fraturamento, que ocorre quando a rocha atinge um limite de tensão e se rompe, criando fissuras para o armazenamento dos rejeitos. A pressão de fraturamento corresponde à abertura real da matriz rochosa para a entrada de líquidos, e não apenas à invasão por sua porosidade natural (BYROM, 2007).

Encapsulamento e Descarte em Poços: O encapsulamento e descarte em poço subterrâneo é um método de disposição de NORM que consiste em armazenar os rejeitos dentro de seções de tubulação seladas ou diretamente em poços subterrâneos. Após isso os rejeitos são isolados com cimento (VEIL *et al.*, 1998). No entanto, essa abordagem apresenta limitações, pois a capacidade de armazenamento é restrita, tornando o método inadequado para grandes volumes de rejeitos (VEIL *et al.*, 1998; SCHENATO *et al.*, 2013). Além disso, a avaliação geotécnica e o licenciamento dos poços abandonados são fatores determinantes para sua viabilidade (SCHENATO *et al.*, 2013).

3.4. Biorremediação

“O termo biorremediação pode ser definido como um processo biotecnológico no qual se utiliza o metabolismo de microrganismos para a eliminação rápida de poluentes, com o objetivo de reduzir sua concentração a níveis aceitáveis, transformando-os em compostos de baixa toxicidade” (YAKUBU, 2007 *apud* PEREIRA; FREITAS, 2012, p.999), degradando-os sob condições controladas, até um estado seguro ou até níveis aceitáveis estabelecidos por órgãos reguladores (KENSA, 2011).

Leung (2004) aponta que, além das bactérias, outros organismos como fungos, algas e plantas também podem ser utilizados nos processos de biorremediação, sendo denominado fitorremediação quando realizados por plantas.

Segundo Balan (2002, *apud* Pereira e Freitas, 2012, p. 998), “os estudos de degradação de compostos químicos têm mostrado vários microorganismos extremamente versáteis em catabolizar moléculas recalcitrantes. Trabalhos atuais em biotecnologia indicam fungos e bactérias como principais microorganismos eficientes na degradação de poluentes, possuindo alto potencial de ação na recuperação de ambientes

contaminados”. Constatação reforçada por estudos como os realizados por Anobala *et al.* (2018), Manobala *et al.* (2019), Fathi *et al.* (2014) e Yi *et al.* (2016).

Segundo Gaylarde, Bellinaso e Manfio (2005), a biorremediação é uma abordagem biológica eficiente para a descontaminação de ambientes, sendo considerada uma alternativa mais sustentável e ecologicamente viável em comparação a outros métodos de remediação. De acordo com Cheenma (2023) radionuclídeos podem ser imobilizados através de diferentes mecanismos bacterianos, promovendo fenômenos de bioissorção, biomineralização e/ou bioacumulação.

Bioissorção: Segundo Michalak, Chojnacka e Witek-Krowiak (2013), a adsorção refere-se à adesão física ou iônica e/ou molecular à superfície de um material sólido, como por exemplo uma biomassa ou outro material com capacidade adsorbtiva. Nesse processo, o material acumulado na interface é chamado de adsorbato, enquanto a superfície sólida atua como adsorvente. A bioissorção é um processo no qual a biomassa atua como adsorvente, sendo um mecanismo rápido e reversível.

Bioacumulação: A bioacumulação é a acumulação dos contaminantes dentro da célula dos organismos. A bioacumulação ocorre em duas etapas: a adsorção dos íons metálicos na superfície celular (bioissorção), e depois o transporte dos metais para dentro das células por mecanismos ativos (NNAJI *et al.*, 2023). Os radionuclídeos entram em contato direto com ligantes como fosfato, hidróxido e sulfato, gerando substâncias insolúveis dentro da célula, que podem ser facilmente removidas da solução e apresentam menor mobilidade ambiental (CHEEMA, 2023).

Biomineralização: A biomineralização, ou bioprecipitação, ocorre quando os contaminantes interagem com ligantes microbianos sendo convertidos em forma insolúveis, formando precipitados e se separando da fase líquida (CHEEMA, 2023).

Fitoextração e Rizofiltração: A fitoextração ocorre quando plantas absorvem os contaminantes pelas raízes e os transportam para suas partes aéreas (REDDI; INYANG, 2000 *apud* MARTINS, 2015). A transferência ocorre das raízes para os caules por meio dos vasos condutores, onde os radionuclídeos se ligam à biomassa, reduzindo sua toxicidade. Uma vantagem desse mecanismo é que ele permite a remoção de contaminantes sem comprometer a estrutura do solo. Já a rizofiltração ocorre quando os

contaminantes são adsorvidos e concentrados ou precipitados em suas raízes. Atualmente, diversas lagoas artificiais são projetadas para esse fim, utilizando plantas aquáticas e algas para remover radionuclídeos da água (CHEEMA, 2023).

Segundo Kensa (2011), as técnicas de biorremediação são geralmente mais econômicas do que métodos tradicionais, como a incineração. E, uma vez que se baseia na atenuação natural, o público considera essa abordagem mais aceitável do que outras tecnologias.

De acordo com Gaylarde, Bellinaso e Manfio (2005), a eficiência desse método pode ser influenciada tanto por fatores físicos, como o meio em que os contaminantes estão presentes (solo, água ou sedimentos), temperatura e luminosidade, quanto por fatores químicos, como pH, umidade, oxigênio dissolvido, potencial redox e composição química dos poluentes, que impactam diretamente a taxa de degradação. É então necessário que as condições ambientais favoreçam o crescimento microbiano, podendo ser necessário que sejam realizados ajustes nos parâmetros ambientais.

A aplicação das técnicas de biorremediação podem ser realizadas *in situ* ou *ex situ*. A biorremediação *in situ* caracteriza-se pela aplicação direta no ambiente contaminado, eliminando a necessidade de remoção do material contaminado, o que proporciona vantagens econômicas e ambientais, evitando os custos e os distúrbios associados ao transporte de solos e águas contaminadas (PEREIRA; FREITAS, 2012). Essa técnica apresenta desafios próprios, pois o local da remediação não é isolado, dificultando o controle das condições e o monitoramento do progresso do processo (LEUNG, 2004).

Segundo Jacques *et al.* (2007), a biorremediação *ex situ* ocorre quando é necessário remover o solo ou efluente de um local contaminado para que o tratamento seja realizado em um ambiente controlado, fora da área originalmente impactada. Esse método geralmente é utilizado quando a descontaminação no próprio local não é viável ou quando há risco de dispersão dos poluentes para áreas adjacentes. A remoção pode ser necessária quando há possibilidade de contaminação de pessoas e do ambiente próximo do solo a ser biorremediado, ou quando há presença de altas concentrações de contaminantes (JACQUES *et al.*, 2007).

Apesar da biorremediação de áreas poluídas já ter se mostrado como uma técnica eficaz e confiável, quando se trata de materiais radioativos, não há, segundo Leung (2004), um método eficiente para sua desativação, sendo necessário aguardar o decaimento natural em locais isolados da presença humana. Esse processo, porém, pode levar períodos prolongados, pois muitos radionuclídeos possuem meias-vidas muito longas, aumentando os desafios ambientais e a necessidade de monitoramento contínuo (LEUNG, 2004).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (2019), os rejeitos NORM são predominantemente compostos por radioisótopos das séries de decaimento do Urânio-238 (^{238}U), Urânio-235 (^{235}U) e Tório-232 (^{232}Th), que representam as principais fontes de radioatividade nesses materiais. Como resultado do decaimento desses radionuclídeos, formam-se elementos secundários, como Rádio-226 (^{226}Ra), Rádio-228 (^{228}Ra), Chumbo-210 (^{210}Pb) e Radônio-222 (^{222}Rn), que contribuem significativamente para a radioatividade total dos rejeitos. Os tempos de meia-vida desses elementos variam amplamente, sendo alguns extremamente longos, conforme pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 - Tempos de meia-vida de alguns radionuclídeos

Radionuclídeo	Tempo de meia-vida
Urânio-238	4,47 bilhões de anos
Urânio-235	703,8 milhões de anos
Tório-232	14 bilhões de anos
Rádio-226	1.600 anos
Rádio-228	5,75 anos
Chumbo-210	22,3 anos
Radônio-222	3,8 dias

Fonte: Adaptado de CHOPPIN, G. R.; LIQUIDO, J.; RIDENOUR, L. Radiochemistry and Nuclear Chemistry. 3. ed. Elsevier, 2002; e UAB. Radiation Safety Procedures Manual. 9. ed., 2007.

No Brasil, o IBAMA regula a biorremediação através de normas específicas que estabelecem procedimentos, requisitos, exigências e controle dos remediadores nos âmbitos de pesquisa e experimentação, registro, renovação de registro, produção, importação, exportação, comercialização e utilização.

A Instrução Normativa nº 11, de 17 de outubro de 2022, define que a pesquisa e experimentação de remediadores referem-se à aplicação em escala piloto e condições controladas, com o objetivo de obter conhecimento para fins de registro ou alteração das características de produtos já registrados. Além disso, determina que essas atividades só podem ser realizadas mediante anuência prévia do IBAMA, garantindo que os remediadores sejam devidamente avaliados pelo órgão antes de sua aplicação (IBAMA, 2010).

Além disso, a Resolução CONAMA 463/2014 estabelece que, os bioestimuladores e fitorremediadores são dispensados da obtenção de registro para fins de produção, importação, exportação, comercialização e utilização, desde que não sejam compostos por espécies exóticas, além dos agentes de processos físicos (CONAMA, 2014).

3.5. Métodos convencionais de tratamento de rejeitos NORM

No Brasil, a prática atual é enviar o rejeito NORM para depósitos, conforme a CNEN NN 8.02 e atendendo às especificações da CNEN NN 6.09. Entretanto, existem tratamentos que poderiam ser aplicados antes da disposição final, visando otimizar a gestão desses rejeitos. A adoção de qualquer tratamento para rejeitos radioativos de baixo ou médio nível de radiação deve receber aprovação prévia da CNEN, por meio de processo de licenciamento, conforme previsto nas normas CNEN NN 8.01 e CNEN NN 8.02.

i. Processos físico-químicos para remoção de radionuclídeos em fase líquida

A precipitação química é amplamente utilizada no tratamento de água e efluentes e consiste na conversão de íons metálicos solúveis indesejáveis para uma forma insolúvel, permitindo sua remoção. Esse processo gera um lodo residual (precipitado), que deve

ser removido em uma etapa de tratamento posterior, como a sedimentação (WANG *et al.*, 2005).

Segundo o CREN (2009), A troca iônica é um processo no qual íons livres para se moverem e de carga oposta aos grupos ativos da resina, uma estrutura insolúvel, e se ligam a ela. Quando a resina entra em contato com uma solução contendo outros íons de mesma carga, ocorre a substituição dos íons originalmente ligados à resina pelos íons da solução, até que o equilíbrio seja alcançado.

A osmose reversa é um processo que utiliza pressão para forçar a passagem da água através de uma membrana semipermeável, que atua como uma barreira seletiva, retendo os contaminantes dissolvidos na água (MALAEB; AYOUB, 2011). A comparação entre os métodos é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 - Comparação dos métodos de remoção de contaminantes em efluentes líquidos

Método	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Precipitação Química	Conversão de íons solúveis para uma forma insolúvel, permitindo sua remoção	Operação simplificada Investimentos iniciais mais baixos	Gera lodo precipitado que precisa ser gerenciado Custos operacionais com produtos químicos
Troca Iônica	Uso de resinas de troca iônica para capturar íons radioativos da solução	Alta seletividade na remoção de íons Possibilidade de regeneração da resina	Geração de efluentes na regeneração Descarte de resina contaminada Custo elevado
Osmose Reversa	Filtragem da água através de membranas semipermeáveis para remover íons e radionuclídeos	Alta eficiência na remoção de contaminantes Não utiliza produtos químicos no processo principal Aplicável a diversos tipos de efluentes	Custo de capital e consumo energético elevados; Necessidade de manutenção/troca da membrana

Fonte: Construído a partir de Wang *et al.* (2005), Cren (2009), Malaeb e Ayoub (2011), Soares (2021) e Lermontov e Pereira (2019).

ii. Processos térmicos para redução de volume e estabilização de rejeitos sólidos/pastosos

Em sua revisão sobre métodos para tratamento de rejeitos NORM da indústria de óleo e gás, Alcântara e Cuccia (2021), apresentam algumas tecnologias de tratamento prévio

disponíveis para os rejeitos NORM antes de sua disposição final, incluindo incineração, destilação a vácuo, tratamento térmico por plasma e pirólise. Essas técnicas têm como objetivo tornar os rejeitos mais adequados ao armazenamento e atender aos critérios de aceitação para disposição final, através da redução de seu volume, mudança de estado físico dos contaminantes, estabilização química ou redução da presença de compostos orgânicos.

Pirólise: A pirólise permite a decomposição térmica de rejeitos orgânicos sem oxigênio, estabilizando rejeitos radioativos com altas concentrações de sais e compostos orgânicos. Embora seja útil para rejeitos misturados com óleo, não reduz diretamente a radioatividade, necessitando ser integrada a outras estratégias de tratamento (ALCÂNTARA; CUCCIA, 2021).

Incineração: A incineração é uma alternativa utilizada em rejeitos que não podem ser reciclados, reutilizados ou dispostos em aterros sanitários. Esse processo de oxidação em altas temperaturas permite uma grande redução no volume e peso da matéria orgânica, com o contaminante ficando presente nas cinzas (FONSECA, 2009).

Destilação a Vácuo: A destilação a vácuo é um processo complexo com diversas etapas com aquecimento sob pressão que permite a separação de componentes voláteis com diferentes pontos de ebulição, reduzindo a ocorrência de reações indesejáveis, degradação térmica e polimerização (NASH PUMPS, 2024).

Tratamento Térmico por Plasma: Por fim, o tratamento térmico por plasma promove a conversão de rejeitos radioativos em escória vitrificada, garantindo maior estabilidade química e reduzindo riscos de lixiviação. A tecnologia é eficiente na destruição de compostos orgânicos, mas seu alto custo operacional e a necessidade de equipamentos especializados dificultam a aplicação em larga escala (ALCÂNTARA; CUCCIA, 2021).

Esses métodos de tratamento são frequentemente associados a altos custos e complexidade de manutenção, o que pode limitar sua aplicabilidade. Nesse contexto, abordagens alternativas, como a biorremediação e a fitorremediação, podem oferecer soluções mais econômicas e sustentáveis (NATARAJAN; KARUNANIDHI; RAJA, 2020). E a comparação entre eles é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2 - Tecnologias de tratamento prévio disponíveis para os rejeitos NORM

Método	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Incineração	Processo térmico em altas temperaturas para degradação de compostos orgânicos e redução do volume do rejeito	Grande redução de volume; processo contínuo e eficiente; aplicável a diversos compostos.	Custo elevado; exige controle rigoroso dos rejeitos; formação de rejeitos sólidos e gasosos
Destilação a Vácuo	Aquecimento sob vácuo para separação de componentes como água, óleo e mercúrio, minimizando a emissão de poluentes.	Menor consumo de energia que a incineração; mínima emissão de poluentes; recuperação de hidrocarbonetos.	Processo complexo e que requer múltiplas etapas; pode necessitar de tratamento adicional.
Tratamento Térmico por Plasma	Uso de tochas de plasma para fundir materiais inorgânicos e converter rejeitos radioativos em escória vitrificada.	Alta eficiência na destruição de substâncias orgânicas; rejeitos vitrificados são estáveis; operação rápida.	Custo elevado; necessidade de equipamentos especializados; controle da formação de escória pode ser difícil.
Pirólise	Decomposição térmica sem oxigênio, gerando gases e estabilizando rejeitos radioativos em aluminossilicato de sódio.	Aplicável para rejeitos orgânicos radioativos; reduz volume; estabiliza compostos com alta concentração de sais.	Não reduz diretamente a radioatividade; pode necessitar de tratamento complementar; processo ainda requer otimização.

Fonte: Adaptado de Alcântara e Cuccia (2021).

4. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho baseia-se em uma revisão bibliográfica e na análise de estudos sobre biorremediação aplicada à gestão de rejeitos NORM. O enfoque metodológico foi delineado para descrever o processo de gestão e a análise da viabilidade da utilização desses microrganismos e plantas na biorremediação desses rejeitos.

Os critérios utilizados para a seleção dos estudos seguiram uma abordagem qualitativa que visou garantir a relevância e a qualidade das informações. Após leitura e avaliação criteriosa, foram selecionadas 40 publicações científicas entre artigos, livros e periódicos, publicadas entre 2000 e 2024, que atenderam aos pré-requisitos estabelecidos em relação aos objetivos do estudo. A seleção priorizou fontes que contemplassem assuntos relevantes para desenvolvimento de referencial bibliográfico, tais como:

Critérios de inclusão:

- Estudos que abordam a gestão de rejeitos NORM ou radioativos.
- Normas técnicas e regulamentações aplicáveis ao gerenciamento de rejeitos radioativos e NORM.
- Práticas internacionais relacionadas ao tratamento, disposição e gestão de rejeitos NORM.
- Definições e conceitos fundamentais sobre radioatividade, materiais NORM e radionuclídeos (especialmente urânio e tório).
- Pesquisas que tratem de métodos de tratamento de rejeitos NORM ou radioativos.
- Metodologias de tratamento, incluindo:
 - Métodos físico-químicos para remoção de radionuclídeos;
 - Técnicas de biorremediação, com foco em microrganismos naturais ou geneticamente modificados e plantas utilizadas.
- Eficiência dos processos e condições ambientais ideais para aplicação das técnicas de tratamento.

- Estudos de caso, analisando organismos específicos e sua eficácia na remediação de ambientes contaminados.

Crítérios de exclusão:

- Não apresentavam dados experimentais;
- Não descreviam claramente a abordagem metodológica;
- Não abordavam experimentos próprios ou aplicabilidade prática.

A identificação dos estudos potenciais foi realizada por meio de pesquisas por palavras-chave como “biorremediação”, “fitorremediação”, “rejeitos radioativos”, “rejeitos NORM”, “biorremediação de urânio”, “biorremediação de tório”, “radionuclídeos”, “gestão de rejeitos NORM” e “gestão de rejeitos radioativos”.

Interpretação dos resultados dos estudos de biorremediação

É importante ressaltar que, nos estudos analisados sobre biorremediação de radionuclídeos, os resultados foram expressos em unidades de massa (como mg) ou porcentagem, pois o objetivo principal desses estudos foi medir a quantidade de material removido ou adsorvido pelos microrganismos. Entretanto, a radioatividade é avaliada em Becquerel (Bq), unidade oficial do Sistema Internacional (SI), utilizada para monitoramento ambiental e regulatório, e que corresponde à ocorrência de uma desintegração nuclear por segundo em determinado material. Apesar de serem unidades diferentes, ambas estão diretamente relacionadas, quando a quantidade de radionuclídeos presentes é reduzida, ocorre também a redução da atividade radioativa, pois há menos átomos emissores no rejeito.

Justificativa para o Foco em Urânio e Tório:

Os artigos selecionados abordam exclusivamente a biorremediação de urânio e tório, pois esses elementos representam umas das principais fontes de radioatividade nos rejeitos NORM. Embora os produtos de decaimento também contribuam para a radiação total, muitos possuem meias-vidas mais curtas, fazendo com que sua atividade radioativa diminua naturalmente ao longo do tempo. Assim, a remediação de urânio e tório se mostra estratégica, pois ao tratar esses elementos primários, reduz a formação de novos produtos de decaimento.

Além disso, a biorremediação de urânio e tório é mais documentada, com estudos que demonstram a capacidade de microrganismos e plantas em adsorver, precipitar ou imobilizar esses elementos. Em contraste, a remoção de produtos de decaimento, como rádio-226, mais frequente na indústria do petróleo e gás, e polônio-210 são menos explorados em pesquisas que atendam aos critérios deste estudo, o que reforça a escolha do foco adotado.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Desafios na gestão atual de rejeitos NORM no Brasil

Analisando a pesquisa bibliográfica realizada, pode-se notar que a atual gestão de rejeitos NORM no Brasil enfrenta desafios operacionais e regulatórios. Algumas principais lacunas observadas são:

Limitações Regulatórias: Atualmente a CNEN possui um conjunto de normas que orientam a gestão de rejeitos radioativos. Essas normas são relacionadas principalmente aos aspectos de segurança, armazenamento e deposição final dos rejeitos. Entretanto, embora o tratamento dos rejeitos esteja previsto, as normas exigem que cada processo proposto seja previamente aprovado pela CNEN, sem apresentar critérios claros para avaliação das tecnologias utilizadas, o que pode gerar incertezas e morosidade no processo de licenciamento e dificultar a adoção de novas abordagens, mesmo quando tecnicamente viáveis.

Além disso, enquanto atividades envolvendo materiais radioativos são reguladas e licenciadas pela CNEN/ANSN, as técnicas que envolvem o uso de biorremediação ou outro processo de destinação são licenciados pelo IBAMA, exigindo alinhamento entre os órgãos.

Por fim, a inexistência de um marco regulatório abrangente para todas as indústrias não nucleares que geram rejeitos com radionuclídeos de origem natural dificulta não apenas a experimentação científica, como também a implementação prática. Embora existam normativas específicas para a mineração, previstas no Grupo de Normas 4 da CNEN, as diretrizes atuais da CNEN foram elaboradas com foco em instalações nucleares, o que pode tornar os processos de licenciamento e aprovação mais complexos e pouco adaptados à realidade de outros segmentos industriais.

- **Limitações Operacionais:** A atual prática de deposição próxima à superfície ou em profundidade, conforme normas regulatórias, requer a disponibilidade de áreas licenciadas, especificamente preparadas para esse fim. Essas áreas devem atender a requisitos rigorosos de licenciamento, incluindo análises quanto ao

potencial de migração de rejeitos radioativos do depósito para o solo, rochas e águas subterrâneas. Também é necessário realizar levantamento radiométrico que avalie a radiação de fundo natural e a presença de elementos radioativos no solo, água, ar e vegetação da área e arredores. O objetivo dessas etapas é fornecer uma base de comparação para identificar, no futuro, possíveis migrações de contaminantes a partir do depósito (CNEN, 2014).

Além disso, métodos de tratamento térmico, como a incineração, a pirólise e o tratamento térmico por plasma, apesar de possuírem eficácia comprovada na redução do volume e estabilização dos rejeitos, como na transformação em formas menos móveis como por exemplo a vitrificação, são associados a elevados investimentos e despesas operacionais significativas e complexidade de operação, como necessidade por equipamento e manutenção especializada. Esses aspectos operacionais e econômicos podem dificultar a implementação dessas tecnologias em escala plena (ALCÂNTARA; CUCCIA, 2021; CNEN, 2014). Outro fator a ser considerado é que, apesar da transferência de responsabilidade sobre o rejeito para a CNEN ao ser depositado em depósitos intermediários, conforme Lei nº 10.308/2001, a inexistência de um depósito final no país implica que esses materiais permaneçam armazenados nessas instalações, cujo uso gera custos ao gerador. Assim, mesmo sem a posse legal dos rejeitos, o pagamento pelo armazenamento representa um ônus financeiro para o titular original, impactando diretamente a gestão de longo prazo desses materiais (BRASIL, 2001).

- **Riscos Ambientais:**

Os depósitos utilizados atualmente para disposição de rejeitos contendo NORM, apesar de licenciados, exigem atenção quanto à sua segurança a longo prazo, especialmente diante da meia-vida prolongada de radionuclídeos (IOGP, 2025). Essas questões envolvem a possibilidade de liberação desses materiais no ambiente, com consequente contaminação de águas subterrâneas e superficiais, solo e possíveis efeitos adversos sobre os ecossistemas e a saúde humana, é uma das preocupações abordadas pela regulamentação (CNEN, 2014). É, então, essencial que as instalações para disposição de rejeitos radioativos adotem

medidas rigorosas de proteção radiológica e ambiental, considerando critérios e análises detalhadas de segurança requeridos pela CNEN, visando prevenir a liberação acidental ou crônica de radionuclídeos para o ambiente e garantir a segurança da população e dos ecossistemas próximos (CNEN NN 8.02, 2014).

Comparativamente, conforme Oliveira de Tello *et al.* (2024), outros países como os Estados Unidos já adotam amplamente estratégias de deposição em profundidade como o uso de poços selados e depósitos em formações salinas. Apesar dessa estratégia estar prevista como possível forma de deposição nas normas da CNEN para alguns tipos de rejeitos radioativos, Heilbron Filho *et al.* (2018) destacam que a metodologia ainda não foi implementada no Brasil, onde os rejeitos são armazenados em depósitos superficiais ou intermediários. Além disso, destacam também que a deposição em profundidade é considerada a opção mais segura para o descarte de rejeitos radioativos de alto nível, instalados entre 350 e 500 metros de profundidade, em ambientes geologicamente estáveis que garantem o isolamento dos radionuclídeos e previnem sua liberação, reduzindo riscos ambientais e a pessoas.

Considerando sua maior segurança em comparação com os depósitos próximos a superfície atualmente utilizados, seria relevante a realização de estudos de viabilidade para avaliar sua aplicação no Brasil, comparando-a com os modelos de deposição existentes e identificando possíveis locais adequados para sua instalação.

No entanto, mesmo que essa estratégia fosse adotada, isso apenas alocaria os rejeitos radioativos em locais mais distantes e seguros, funcionando somente como um local de disposição, sem oferecer tratamento a esses rejeitos. Isso evidencia a necessidade de pesquisa e desenvolvimento de técnicas de tratamento complementares, como a biorremediação, que podem contribuir para a redução dos riscos ambientais e para o aumento da segurança e sustentabilidade dos processos de disposição no Brasil.

6.2. Sistematização da Biorremediação em radionuclídeos

A Tabela 6 sintetiza os estudos avaliados sobre a biorremediação de radionuclídeos, incluindo a remoção de urânio e tório por diferentes organismos.

Tabela 6 - Resultado das pesquisas sobre biorremediação aplicada a radionuclídeos

Autor / Ano	Título	Organismo Avaliado	Remoção
Fungos			
Akhtar et al. (2007)	Removal and recovery of uranium from aqueous solutions by <i>Trichoderma harzianum</i>	<i>Trichoderma harzianum</i>	612 mg U/g
		algas RD256	354 mg U/g
		algas RD2567	409 mg U/g
Ghoniemy et al. (2020)	Fungal treatment for liquid waste containing U(VI) and Th(IV)	<i>Aspergillus niger</i>	18,5 mg U/g (U) 11,1 mg/g (Th)
Coelho et al. (2020)	Resistant fungi isolated from contaminated uranium mine in Brazil	<i>Gongronella butleri</i> <i>Penicillium piscarium</i> <i>Penicillium citrinum</i> <i>Penicillium ludwigii</i> <i>Talaromyces amestolkiae</i>	entre 60%-80%
Bactérias			
Anobala et al. (2018)	A new uranium bioremediation approach using radio-tolerant <i>Deinococcus radiodurans</i>	<i>Deinococcus radiodurans</i>	75%
Siva Prasath et al. (2010)	Uranium and thorium uptake by live and dead cells of <i>Pseudomonas</i> sp.	Celulas vivas de <i>Pseudomonas</i> sp.	90% Th 100% U
		Celulas mortas de <i>Pseudomonas</i> sp.	100% Th 100% U
Xie et al. (2007)	Study on biosorption kinetics and thermodynamics of uranium by <i>Citrobacter freudii</i>	<i>Citrobacter freudii</i>	48,02 mg U/g
Manobala et al. (2019)	Uranium sequestration by biofilm-forming bacteria isolated from marine	<i>Exiguobacterium profundum</i>	88%
		<i>Pseudomonas putida</i>	79%
		<i>Bacillus marisflavi</i>	72%
Fitorremediação			
Fathi et al. (2014)	Potential of phytoremediation to clean up uranium-contaminated soil	<i>Acacia nilotica</i> , <i>Acacia albida</i>	80-90% (<i>A. nilotica</i>), 44-77% (<i>A. albida</i>)

Yi <i>et al.</i> (2016)	<i>Uranium biosorption from aqueous solution onto Eichhornia crassipes</i>	<i>Eichhornia crassipes</i> (aguapé)	142,85 mg U/g
Manikandan <i>et al.</i> (2011)	<i>Biosorption of uranium and thorium by Marine micro algae</i>	<i>Chlorella salina</i>	90% Th 100% U
		<i>Isochrysis galbana</i>	70% Th 80% U

Fonte: Adaptado de Akhtar *et al.* (2007), Ghoneimy *et al.* (2020), Coelho *et al.* (2020), Anobala *et al.* (2018), Siva Prasath *et al.* (2010), Siva Prasath *et al.* (2010), Xie *et al.* (2007), Manobala *et al.* (2019), Fathi *et al.* (2014), Yi *et al.* (2016), Manikandan *et al.* (2011).

A partir da interpretação da tabela, podemos destacar os seguintes pontos:

Nos estudos apresentados, todos os organismos analisados apresentaram capacidade de remoção de radionuclídeos, entretanto, para cada tipo de organismo tiveram aqueles que se destacaram mais:

Bactérias: O estudo de Siva Prasath *et al.* (2010) demonstrou que a biomassa morta de *Pseudomonas sp.* foi capaz de remover até 100% de urânio e tório, especialmente sob temperatura de 50 °C e concentrações otimizadas tanto da biomassa quanto da solução contaminada.

Fungos: *Trichoderma harzianum* apresentou alta capacidade de adsorção de urânio (612 mg U/g), indicando potencial para uso em de tratamento de soluções aquosas.

Fitorremediação em águas contaminadas: *Eichhornia crassipes* (aguapé) demonstrou capacidade de remoção de 142,85 mg U/g, enquanto a *Chlorella salina* (microalga) chegou a remover 100% de urânio da solução.

Os resultados apresentados pelos organismos avaliados por esses estudos, sob condições laboratoriais, foram expressivos para bioissorção de radionuclídeos, no entanto a aplicabilidade prática ainda apresenta lacunas, principalmente no que diz respeito à aplicação em escala plena. Além disso, Azubuike *et al.* (2016) ressaltaram que a aceitação para licenciamento da biorremediação para rejeitos radioativos ainda é limitada, sendo necessário um maior volume de estudos para validar sua eficiência em longo prazo.

6.3. Aplicação e Integração da Biorremediação na Gestão de NORM

Com base nas informações expostas na tabela 5, que sintetiza os estudos avaliados sobre a biorremediação aplicada à remoção de urânio e tório, percebe-se que diferentes espécies de microrganismos possuem resistência ou capacidade de remoção desses radionuclídeos, demonstrando potencial aplicação na biorremediação de rejeitos NORM. As eficiências apresentadas foram obtidas por ensaios em laboratório, realizados em condições ambientais controlados, ainda assim, esses resultados sugerem um potencial aplicabilidade prática, mas que ainda necessita ser testada em escala plena.

Para a maioria dos estudos avaliados a remoção de radionuclídeos ocorreu por meio de biomassa ou biofilme, através principalmente dos mecanismos de bioissorção ou bioacumulação. Nesse processo, os radionuclídeos são retirados do meio e incorporados à biomassa ou biofilme, diminuindo a concentração desses elementos no meio e, como consequência, sua atividade radioativa (em Bq). Caso essa atividade atinja níveis abaixo dos limites de isenção estabelecidos pela CNEN, pode-se adotar estratégias menos restritivas de manuseio e disposição.

Entretanto, é importante destacar que por mais que ocorra a redução da atividade radioativa inicial do meio, a biorremediação não elimina os radionuclídeos, apenas altera sua distribuição dentro do sistema, redistribuindo para a biomassa ou biofilme, o que pode exigir outra etapa de tratamento para a biomassa ou biofilme contaminado. Ainda assim, a técnica pode atuar como tratamento prévio, contribuindo para a redução do volume contaminado, conforme previsto na CNEN NN 8.01, que orienta a adoção de estratégias para minimizar os volumes que exigem deposição ou armazenamento em depósitos licenciados.

Uma possível estratégia a ser estudada é a aplicação da biorremediação em biorreatores especializados para tratamento *ex situ*, nos quais os radionuclídeos seriam concentrados em biofilmes ou biomassa, facilitando etapas subsequentes de estabilização e disposição final. Integrar essa abordagem a métodos físico-químicos ou térmicos já consolidados pode potencializar sua aplicação em larga escala, tornando-a uma alternativa mais viável e eficiente para o tratamento de rejeitos NORM.

A integração da biorremediação com métodos convencionais poderia ocorrer, por exemplo, através da utilização inicial de biomassa para reduzir as concentrações iniciais dos radionuclídeos, seguida por métodos físicos e químicos (como precipitação química, osmose reversa, entre outros) para melhoria nos resultados. Alguns cenários de integração que podem ser investigados para desenvolvimento e aplicação antes do descarte:

- **Biorremediação integrada à troca iônica:** A biossorção realizada por microrganismos como *Deinococcus radiodurans* pode reduzir a carga radioativa do efluente antes da passagem por resinas de troca iônica, aumentando a vida útil das resinas e diminuindo a quantidade de rejeito gerado.
- **Biorremediação associada à precipitação química:** A combinação da biossorção com a precipitação química pode otimizar a remoção de radionuclídeos ao reduzir sua concentração na solução antes da aplicação de reagentes químicos. Por exemplo, *Citrobacter freundii* pode ser utilizado para adsorver urânio da solução, diminuindo a carga de contaminantes dissolvidos e, assim, reduzindo a necessidade de produtos químicos na etapa de precipitação, e gerando também menor volume de lodo.
- **Biofilmes bacterianos combinados com solidificação ou imobilização química:** Bactérias formadoras de biofilme como *Pseudomonas putida* e *Bacillus marisflavi*, podem adsorver radionuclídeos presentes em rejeitos como borras oleosas, separando a fração contaminada da matriz. Posteriormente, a biomassa radioativa gerada pode ser solidificada ou imobilizada em matriz química, conforme orientações da CNEN NN 6.09, reduzindo o risco de migração dos contaminantes e possibilitando que a borra oleosa, caso atinja níveis de isenção, possa ser tratada de maneira convencional.
- **Fitorremediação seguida de tratamento térmico ou incineração da biomassa:** A *Eichhornia crassipes* e *Acacia nilotica* podem ser usadas para a remoção de radionuclídeos dissolvidos nos efluentes contaminados, reduzindo suas concentrações e sua atividade radioativa a níveis isentos. Após essa etapa, a biomassa vegetal contaminada e de menor volume que o inicial, pode ser

submetida a incineração controlada, reduzindo o volume e facilitando o manuseio e disposição segura da fração radioativa concentrada.

- **Biossorção associada à osmose reversa:** A biossorção utilizada como etapa inicial no tratamento de efluentes com radionuclídeos, utilizando microrganismos como *Trichoderma harzianum* ou *Pseudomonas sp.*, pode reduzir a concentração de contaminantes. Esse pré-tratamento diminui a carga sobre o sistema de osmose reversa, aumentando a vida útil das membranas, reduzindo os custos operacionais.

Se pensarmos em um fluxo de tratamento para rejeitos NORM, uma possível sequência poderia ser:

- i. Biorremediação: Utilização de biomassa ou biofilme para remover os radionuclídeos do meio contaminado até que se atinjam níveis de isenção.
- ii. Separação da biomassa: A biomassa radioativa gerada pode ser tratada por diferentes métodos.
- iii. Tratamento complementar: Escolha do tratamento físico-químico final mais adequado ao tipo biomassa gerada.
- iv. Disposição final: Destinar os concentrados gerados nas etapas de tratamento, com volume contaminado já reduzido.

A adoção dessas estratégias híbridas pode contribuir para a viabilização da biorremediação em larga escala, tornando-a uma alternativa competitiva e eficiente em comparação aos métodos convencionais de tratamento de rejeitos radioativos. Reduzindo a concentração de radionuclídeos até níveis mínimos, possivelmente atingindo valores de isenção. Com isso, parte do rejeito inicial poderia ser dispensada, enquanto a radioatividade ficaria concentrada em uma biomassa ou biofilme, resultando em um volume menor de rejeitos contaminado e facilitando sua gestão e disposição final.

6.4. Recomendações para aprimorar a gestão de rejeitos contaminados

A incorporação da biorremediação às estratégias de gerenciamento de rejeitos radioativos no Brasil, requer avanços em regulação, pesquisa e implementação, a fim de comprovar sua viabilidade:

- i. **Harmonização regulatória:** Ressalta-se a importância de promover a harmonização entre os órgãos reguladores, CNEN, IBAMA e ANSN, a fim de assegurar critérios técnicos e ambientais compatíveis, criando condições para que tecnologias alternativas, como a biorremediação, possam ser avaliadas de forma segura, coordenada e potencialmente incluídas nos processos de licenciamento aplicáveis ao tratamento de rejeitos radioativos.
- ii. **Projetos Piloto de Aplicação em Escala Plena:** Apesar de os estudos em laboratório tenham demonstrado a eficácia da biorremediação, sua aplicação em condições plenas ainda requer validação. Para isso, sugere-se a realização de projetos-piloto em ambientes controlados. Esses testes permitiriam a avaliação da eficiência do método em escala plena, analisando sua viabilidade técnica e econômica para o possível desenvolvimento da tecnologia e implementação.
- iii. **Integração da Biorremediação a Sistemas Híbridos de Tratamento:** O uso da biorremediação como uma tecnologia isolada pode ser insuficiente para garantir a completa remoção ou estabilização dos rejeitos radioativos. Portanto, é relevante analisar sua aplicação conjunta com métodos convencionais.
- iv. **Capacitação Técnica e Incentivo à Pesquisa:** A implementação da biorremediação para rejeitos NORM exigiria a disponibilidade de profissionais para a pesquisa e desenvolvimento da área. Assim, sugere-se a criação de programas voltados à capacitação de especialistas no tema, além do incentivo à inovação tecnológica nessa área, por meio de parcerias entre universidades, centros de pesquisa e indústrias.
- v. **Análise Econômica e Comparação com Tecnologias Existentes:** Para que a biorremediação de radionuclídeos seja implementada em escala plena, é necessário um estudo detalhado entre seus custos envolvidos e comparação com os métodos convencionais. Assim, recomenda-se a realização de análises de

viabilidade econômica levando-se em consideração também os benefícios ambientais e redução de impactos associados à gestão desses rejeitos.

- vi. **Gestão Segura da Biomassa Contaminada:** Como a biorremediação não elimina os radionuclídeos mas sim os transfere para a biomassa ou biofilme, um dos desafios da sua aplicação é o gerenciamento desse resíduo biológico. Sugere-se a realização de estudos para definição dos métodos mais adequados para o tratamento e disposição final da biomassa/biofilme contaminado.

7. CONCLUSÃO

A análise realizada ao longo deste trabalho evidencia que a gestão de rejeitos contendo NORM no Brasil enfrenta desafios significativos, tanto do ponto de vista regulatório quanto operacional e ambiental. A ausência de normativas específicas para a aplicação da biorremediação e a fragmentação regulatória entre CNEN, ANSN e IBAMA dificultam tanto a pesquisa quanto a implementação dessa técnica em escala real. Além disso, os métodos convencionais de gerenciamento, como deposição em superfície e profundidade, apresentam limitações associadas ao alto custo, à necessidade de grandes áreas licenciadas e aos riscos ambientais de longo prazo.

Neste contexto, a biorremediação demonstra alta eficiência na remoção de radionuclídeos em estudos com condições laboratoriais controladas. Os estudos analisados indicam que microrganismos e plantas podem atuar na imobilização e captura de urânio e tório por mecanismos como biossorção, bioacumulação e biomineralização. No entanto, sua aplicação em larga escala ainda apresenta desafios técnicos e regulatórios, principalmente no que se refere ao destino da biomassa ou biofilme contaminado gerado no processo.

A integração da biorremediação com técnicas convencionais, como precipitação química, troca iônica e incineração controlada, pode representar um caminho viável para tornar essa abordagem mais eficiente e segura. Essas estratégias híbridas podem contribuir para reduzir o volume e a mobilidade dos radionuclídeos, minimizar os impactos ambientais e tornar a gestão dos rejeitos radioativos mais eficiente.

Para essa finalidade, é recomendada a realização de estudos experimentais em escala piloto para avaliar a viabilidade prática dessas combinações, além do desenvolvimento de normativas que estabeleçam critérios técnicos para o uso da biorremediação no gerenciamento de rejeitos radioativos. A harmonização regulatória entre os órgãos competentes (IBAMA, CNEN / ANSN) e o avanço em pesquisas aplicadas são passos fundamentais para consolidar essa abordagem como uma alternativa viável dentro do contexto brasileiro.

Portanto, a biorremediação quando devidamente regulamentada e integrada com outras estratégias de tratamento, tem potencial para se tornar uma ferramenta eficiente na gestão de rejeitos NORM no Brasil. Sua aplicação pode não só reduzir riscos ambientais e operacionais, mas também representar um avanço na sustentabilidade do gerenciamento de rejeitos radioativos.

8. REFERENCIAS

BESEN, G. R. *et al.* **Resíduos sólidos: vulnerabilidades e perspectivas.** In: SALDIVA P. *et al.* Meio ambiente e saúde: o desafio das metrópoles. São Paulo: Ex Libris, 2010.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Management of NORM Residues.** Vienna: IAEA, 2013.

SCHENATO, Flávia; AGUIAR, Laís A.; LEAL, Marco Aurélio; RUPERTI JR, Nerbe. **Deposição de NORM gerado pelas indústrias de petróleo e gás no Brasil.** In: IX Latin American IRPA Regional Congress on Radiation Protection and Safety - Rio de Janeiro, Brazil, 2013. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/066/45066059.pdf>

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation.** Vienna, 2003. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS419_web.pdf

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **IAEA Nuclear Safety and Security Glossary - Terminology Used in Nuclear Safety, Nuclear Security, Radiation Protection and Emergency Preparedness and Response.** Vienna, 2022. Disponível em: <<https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/IAEA-NSS-GLOweb.pdf>>

Diretrizes para gerenciamento de materiais radioativos de ocorrência natural (NORM) / Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. – Rio de Janeiro: IBP, 2019. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2021/06/cadernoboaspraticasep-versaodigital-v2.pdf>>

IAEA. **Gerenciamento de Material Radioativo Naturalmente Presente (NORM) na Indústria.** Viena, 2020.

REIS, Rócio Glória dos. **NORM: guia prático.** 2016. 236 p. ISBN: 978-85-922211-0-2.

CONSELHO REGIONAL DE FARMÁCIA DO ESTADO DE SÃO PAULO (CRF-SP).

Departamento de Apoio Técnico e Educação Permanente, Comissão Assessora de Radiofarmácia. Radiofarmácia, 1ª edição. São Paulo: CRF-SP, 2019. Disponível em: <https://www.crfsp.org.br/images/cartilhas/radiofarmacia.pdf>.

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **Relatório de Gestão do Exercício de 2022.** Disponível em: <<https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/relatorios-de-gestao>>

ABEN - Associação Brasileira de Energia Nuclear. **Situação Atual dos Rejeitos Radioativos no Brasil e no Mundo.** Comitê de Rejeitos Radioativos e Meio Ambiente, 2006.

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **Norma CNEN NN 3.01:** requisitos básicos de radioproteção e segurança radiológica de fontes de radiação. Rio de Janeiro, DF, 2025.

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **Norma CNEN 5.01:** Regulamento para o Transporte Seguro de Materiais Radioativos. Rio de Janeiro, DF, 2021.

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **Norma CNEN NE-6.06:** Seleção e Escolha de Locais para Depósitos de Rejeitos Radioativos. Rio de Janeiro, DF, 1989.

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **Norma CNEN NN 6.09:** Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação. Rio de Janeiro, DF, 2002.

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **Norma CNEN NN 8.01:** Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação. Rio de Janeiro, DF, 2014.

Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **Norma CNEN NN 8.02:** Licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação. Rio de Janeiro, DF, 2025.

BRASIL. **Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

BRASIL. **Lei Nº 4.118**, de 27 de agosto de 1962. Dispõe sobre a Política Nacional de Energia Nuclear.

BRASIL. **Lei Nº 14.222**, de 15 de outubro de 2021. Institui a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN).

BRASIL. **Lei nº 9.765**, de 17 de dezembro de 1998. Institui a taxa de licenciamento, controle e fiscalização de materiais nucleares e radioativos e suas instalações.

KENSA, V. Mary. Bioremediation – an overview. **Journal of Industrial Pollution Control**, v. 27, n. 2, p. 161-168, 2011.

GAYLARDE, Christine Claire; BELLINASSO, Maria De Lourdes; MANFIO, Gilson Paulo. Biorremediação: aspectos biológicos e técnicos da biorremediação de xenobióticos. **Biotecnologia, Ciência & Desenvolvimento**, n. 34.

PEREIRA, Aline Ramalho Brandão; FREITAS, Diego Antônio França de. Uso de microrganismos para a biorremediação de ambientes impactados. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 6, n. 6, p. 975–1006, 2012.

AZUBUIKE, Christopher Chibueze; CHIKERE, Chioma Blaise; OKPOKWASIL, Gideon Chijioke. Bioremediation techniques – classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 32, p. 180, 2016.

LEUNG, Molly. Bioremediation: techniques for cleaning up a mess. **BioTeach Journal**, v. 2, Fall 2004.

JACQUES, R. J. S. *et al.* Biorremediação de solos contaminados com hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. **Ciência Rural, Santa Maria**, v. 37, n. 4, p. 1192-1201, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Caderno de Boas Práticas de E&P: Diretrizes para Gerenciamento de Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM)**. Rio de Janeiro: IBP, 2019.

AKHTAR, Kalsoom; AKHTAR, M. Waheed; KHALID, Ahmad M. Removal and recovery of uranium from aqueous solutions by *Trichoderma harzianum*. **Water Research**, v. 41, n. 6, p. 1361–1374, 2007.

ANOBALA, T. M.; SHUKLA, Sudhir K.; RAO, Subba; KUMAR, M. Dharmendra. A new uranium bioremediation approach using radio-tolerant *Deinococcus radiodurans*. **Journal of Biosciences**, v. 43, n. 2, p. 245–258, 2018.

GHONIEMY, E. A.; MOHAMMADEN, T. F.; EL-SHAHAT, M. R.; ELKHAWAGA, M. A.; REZK, M. Mahmoud; WESSAM, M. Morsi. Fungal treatment for liquid waste containing U(VI) and Th(IV). **Environmental Research**, v. 183, p. 109168, 2020.

PRASATH, C. S. Siva; MANIKANDAN, N.; PRAKASH, S. Uranium and thorium uptake by live and dead cells of *Pseudomonas* sp. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v. 69, p. 554–559, 2010.

XIE, Shuibo; YANG, Jing; CHEN, Chao; ZHANG, Xiaojian; WANG, Qingliang; ZHANG, Chun. Study on biosorption kinetics and thermodynamics of uranium by *Citrobacter freundii*. **Journal of Environmental Science & Technology**, v. 41, n. 5, p. 869–875, 2007.

FATHI, Riyad Abdullah; GODBOLD, Douglas L.; AL-SALIH, Hana S.; JONES, Davey. Potential of phytoremediation to clean up uranium-contaminated soil. **Journal of Environment and Earth Science**, v. 4, n. 8, p. 45–59, 2014.

COELHO, Ednei; REIS, Tatiana Alves; COTRIM, Marycel; MULLAN, Thomas K.; CORRÊA, Benedito. Resistant fungi isolated from contaminated uranium mine in Brazil. **Chemosphere**, v. 250, p. 126289, 2020.

YI, Zheng-ji; YAO, Jun; CHEN, Hui-lun; WANG, Fei; YUAN, Zhi-min; LIU, Xing. Uranium biosorption from aqueous solution onto Eichhornia crassipes. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 153, p. 34–42, 2016.

MELLAH A., CHEGROUCHE S., BARKAT M. The removal of uranium(VI) from aqueous solutions onto activated carbon: Kinetic and thermodynamic investigations. **Journal of Colloid and Interface Science**, p. 1-8, 2005

GAZINEU, Maria Helena Paranhos. **Teores de radionuclídeos em processos de extração e de produção de petróleo no Nordeste do Brasil**. 2005. 163 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SCHROEYERS, Wouter. **Naturally occurring radioactive materials in construction: integrating radiation protection in reuse (COST Action Tu1301 NORM4BUILDING)**. 1. ed. Londres: Elsevier, 2017. ISBN 9780081020098.

ALCÂNTARA, G.; CUCCIA, V. Métodos para tratamento de rejeitos NORM da indústria de óleo e gás. In: **INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE – INAC 2021**, 2021, Virtual Meeting, Brazil. Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2021.

WANG, Lawrence K.; VACCARI, David A.; LI, Yan; SHAMMAS, Nazih K. Chemical precipitation. In: WANG, L. K.; HUNG, Y.-T.; SHAMMAS, N. K. (Eds.). **Handbook of Environmental Engineering, Volume 3: Physicochemical Treatment Processes**. Totowa, NJ: The Humana Press Inc., 2005. p. 141-166.

CREN, Erika Cristina. **Processamento de soluções graxas em resina de troca iônica**. 2009. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2009.

MALAEB, Lilian; AYOUB, George M. **Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review**. Desalination, v. 267, p. 1-8, 2011.

SOARES, Patrícia Raquel da Costa. **Feasibility study of a Reverse Osmosis Unit at Sines Refinery**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2021.

LERMONTOV, André; PEREIRA, Rodrigo Alves dos Santos. Avaliação conceitual dos custos de implantação e operação para plantas de dessalinização em diversas escalas. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, 2019**. Niterói: ABES, 2019.

MANOBALA, T.; RAMESH, M.; NIRMALA, K.; RAJENDRAN, R.; ELANGO, G. Uranium sequestration by biofilm-forming bacteria isolated from marine sediment collected from Southern coastal region of India. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 208-209, p. 106025, 2019.

MANIKANDAN, N.; SIVA PRASATH, C. S.; PRAKASH, S. Biosorption of uranium and thorium by Marine micro algae. **Indian Journal of Geo-Marine Science**, v. 40(1), p. 121-124, 2011

OLIVEIRA DE TELLO, Clédola Cássia; TONIETTO, Gisele Birman; GODOY, José Marcus de Oliveira *et al.* **Alternativas tecnológicas para o tratamento e armazenamento do material radioativo de origem natural (NORM) da indústria de óleo e gás no Brasil**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2024.

Natarajan, V., Karunanidhi, M. & Raja, B. A critical review on radioactive waste management through biological techniques. **Environ Sci Pollut Res** 27, 29812–29823 (2020). Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-020-08404-0>>.

MICHALAK, Izabela; CHOJNACKA, Katarzyna; WITEK-KROWIAK, Anna. O estado da arte do processo de bio sorção – uma revisão. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 170, n. 6, p. 1389–1416, 2013.

NNAJI, Nnabueze Darlington; ONYEAKA, Helen; MIRI, Taghi; UGWA, Chinenye. Bioacumulação para remoção de metais pesados: uma revisão. **Environmental Science and Pollution Research**, 2023.

CHEEMA, Humma Akram. Uma revisão sobre biorremediação – uma tecnologia emergente para o tratamento de resíduos radioativos. **Journal of Modern Agriculture and Biotechnology**, v. 2, n. 1, p. 2, 2023.

MARTINS, C. D. C. **Fitorremediação de solo oriundo de área industrial multicontaminado com metais pesados e hidrocarbonetos do petróleo por girassol (*Helianthus annuus*)**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

UNIVERSITY OF ALABAMA AT BIRMINGHAM (UAB). **Radiation Safety Procedures Manual**. 9th ed. Birmingham: UAB, 2007.

CHOPPIN, G. R.; LIQUIDO, J.; RIDENOUR, L. **Radiochemistry and Nuclear Chemistry**. 3. ed. Elsevier, 2002.

VEIL, John A.; SMITH, Karen P.; TOMASKO, David; ELCOCK, Deborah; BLUNT, Deborah L.; WILLIAMS, Gustavious P. **Disposal of NORM-Contaminated Oil Field Wastes in Salt Caverns**. Prepared for: U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Petroleum Technology Office, under Contract W-31-109-Eng-38. Prepared by: Argonne National Laboratory, August 1998.

BYROM, Ted G. **Casing and liners for drilling and completion**. 1. ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 2007. ISBN 9781933762067.

AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY. Are salt deposits a solution for nuclear waste disposal? *ScienceDaily*, 29 abr. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedaily.com/releases/2020/04/200429075857.htm>. Acesso em: 11 de Março de 2025.

FONSECA, Janaína Conrado Lyra da. **Manual para gerenciamento de resíduos perigosos**. Colaboração de Mary Rosa Rodrigues de Marchi. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009.

HEILBRON FILHO, P. F. L.; SILVA, C.; ALVES, R. N.; XAVIER, A. M.; HEILBRON, M. P. L.; VALERIANO, C. M. Disposição geológica de rejeitos radioativos no Brasil: diretrizes de proteção radiológica, requisitos e avaliação de segurança. **Terrae Didatica**, v. 14, n. 3, p. 196-206, 2018.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Recebimento de rejeitos radioativos. Instituto de Engenharia Nuclear – IEN. Rio de Janeiro, 16 nov. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ien/pt-br/servicos/recebimento-de-rejeitos/recebimento-de-rejeitos-radioativos>.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). *Instrução Normativa nº 11, de 17 de outubro de 2022*. Dispõe sobre procedimentos no âmbito da Resolução Conama nº 463, de 29 de julho de 2014. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 out. 2022.

RAMOS, Manoel Mattos Oliveira; TAUHATA, Luiz (Coords.). Grandezas e unidades para radiação ionizante: recomendações e definições. Rio de Janeiro: Instituto de Radioproteção e Dosimetria – IRD/CNEN/MCT, dez. 2002. Revisado em out. 2011.