



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO DE
PROCESSOS AMBIENTAIS**

GILKA MARIA DA SILVA PAIVA

**UTILIZAÇÃO DE PODA DE ÁRVORES COMO
FONTE DE CARBONO NA REDUÇÃO DE
SULFATO DE RESÍDUOS DE GESSO**

Recife, 04 de agosto de 2023

GILKA MARIA DA SILVA PAIVA

**UTILIZAÇÃO DE PODA DE ÁRVORES COMO
FONTE DE CARBONO NA REDUÇÃO DE
SULFATO DE RESÍDUOS DE GESSO**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em **Desenvolvimento de processos ambientais.**

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Biotecnologia e Meio Ambiente

Orientadora: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Co-orientador: Prof. Dr. Mohand Benachour

Recife, 04 de agosto de 2023

P149u

Paiva, Gilka Maria da Silva

Utilização de poda de árvores como fonte de carbono na redução de sulfato de resíduos de gesso / Gilka Maria da Silva Paiva, 2023.

84 f.: il.

Orientador: Valdemir Alexandre dos Santo

Coorientador: Mohand Benachour

Mestrado (Dissertação) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2023.

1. Biotecnologia. 2. Sulfatos. 3. Sulfetos. 4. Gesso.
5. Resíduos industriais. 6. Resíduos vegetais. 7. Ultrassom.
I. Título.

CDU 574.6

Luciana Vidal - CRB4/1338

Utilização de poda de árvores como fonte de carbono na redução de sulfato de resíduos de gesso. © 2023 by Gilka Maria da Silva Paiva is licensed under CC BY-NC-ND 4.0

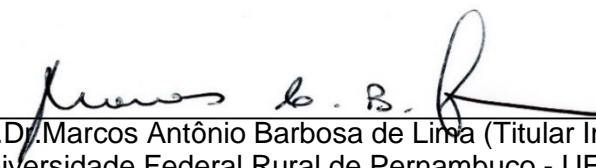
**UTILIZAÇÃO DE PODA DE ÁRVORES COMO FONTE DE
CARBONONA REDUÇÃO DE SULFATO DE RESÍDUOS DE
GESSO**

GILKA MARIA DA SILVA PAIVA

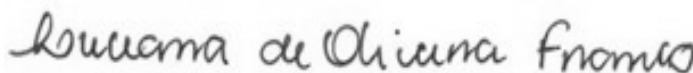
Examinadores:



Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos (Orientador)
Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP



Prof. Dr. Marcos Antônio Barbosa de Lima (Titular Interno)
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE



Profa. Dra. Luciana de Oliveira Franco (Titular Externa)
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Defesa em: 04 de agosto de 2023.

Coordenador (a): Prof. Dr. Sergio Almeida

DEDICATÓRIA

A Deus por me presentear todos os dias, aos meus pais Jerônimo e Ilka que sempre foram meu alicerce, ao meu esposo Rodrigo pelo apoio incondicional e ao meu filho, minha razão de viver.

“Todas as vitórias ocultam uma
abdicação”. (Simone de Beauvoir)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus por estar sempre presente em minha vida.

À meu orientador Prof^o Dr^o Valdemir Alexandre, por ter me dado esta oportunidade ao me aceitar como aluna, contribuindo para o meu aperfeiçoamento profissional.

À Prof^a Dr^a Galba Maria de Campos Takaki, pelo apoio no desenvolvimento dos projetos no Núcleo de Pesquisa em Ciências Ambientais e Biotecnologia – NPCIAMB, pela atenção, paciência e ensinamentos transmitidos com Inteligência de generosidade.

À Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, na pessoa do Magnífico Reitor Prof. Dr. Pe Pedro Rubens Ferreira Oliveira, pela excelência nas áreas de ensino, pesquisa e extensão, o que muito contribuiu para esta conquista.

As amigas conquistadas no Mestrado em Desenvolvimento de Preprocessos Ambientais, Gleice Paula de Araújo pela e Uiara Maria de Barros Lira Lins pela amizade, apoio, transferência de conhecimentos e os bons momentos que estão eternizados.

Aos amigos conquistados no Núcleo de Pesquisa em Ciências Ambientais e Biotecnologia –NPCIAMB, em especial a Dra. Adriana Ferreira de Souza, pela atenção e apoio na execução desta pesquisa.

Aos Professores do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais: , Dr. Marcos Lima, Dr^aJuliana Luna, Dr^a Raquel Diniz, Dr^a Rosileide Fontenele, Dr. Sérgio Almeida e Dr. Sérgio Murilo, pelos ensinamentos.

Aos técnicos do NPCIAMB André Felipe e Severino Humberto de Almeida, pela atenção, paciência, apoio e disposição em ajudar sempre.

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pela concessão da bolsa para aprimorar meus conhecimentos;

A todos aqueles que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
2.	OBJETIVOS.....	18
2.1.	Objetivo Geral.....	18
2.2.	Objetivos Específicos.....	18
3.	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3.1.	Conceitos relacionados com ondas ultrassônicas.....	18
3.1.1.	Definição e interação com meios de propagação.....	18
3.1.2.	Pré-tratamento com ultrassom.....	19
3.1.3.	Velocidade de propagação do ultrassom no meio.....	21
3.1.4.	Cavitação ultrassônica.....	22
3.1.5.	Efeitos da pressão e da temperatura.....	22
3.1.6.	Efeitos da frequência.....	23
3.2.	Biomassa Lignicelulósica.....	24
3.2.1	Resíduos de poda de árvore.....	24
3.2.2.	Lignina.....	25
3.3.	Biorremediação de Sulfato.....	27
3.3.1.	Ciclo do enxofre.....	27
3.3.2.	Fisiologia e metabolismo das BRS.....	28
3.4.	Resíduos de Gesso.....	30
	REFERÊNCIAS.....	31
	CAPÍTULO II.....	41
1.	INTRODUÇÃO.....	43
2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	44
2.1	Preparo do Meio.....	44
2.2	Inóculo.....	45
2.3	Sonicação dos Resíduos de Poda.....	45
2.4	Preparação do Gesso.....	46
2.5	Arranjo experimental.....	46
2.6	Cultivo.....	46
2.7	Quantificação do teor de sulfato.....	46
2.8	Análise Estatística dos Dados.....	47
2.9	Planejamento Exerimental.....	47
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
3.1	Redução Percentual de Sulfato.....	48
4.	CONCLUSÃO.....	55
	REFERÊNCIAS.....	55
	CAPÍTULO III.....	61
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62

APÉNDICE.....63

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1- Resumo da via dissimilatória de redução de sulfato em SRB.....29

CAPÍTULO II

Figura 2 – Preparação dos resíduos de poda para biodisponibilização da celulose44

Figura 3 – Diagrama de Pareto aplicado à redução biológica de sulfato contido em resíduos de gesso utilizando resíduos de poda de árvores utilizados como fonte de carbono49

Figura 4 – Redução percentual de sulfato em função das variáveis independentes: (a) Tempo de sonicação (X1) versus Concentração inicial de sulfato (X2).....50

Figura 5 – Tempo de sonicação (X1) versus Razão DQO/[SO₄²⁻] (X3).....51

Figura 6 – Concentração inicial de sulfato (X2) versus Razão DQO/[SO₄²⁻] (X3).....52

Figura 7 - Determinação gráfica da condição de desejabilidade para a redução biológica de sulfato contido em resíduos de gesso e utilizando poda de árvores nativas como fonte de carbono..... 53

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 1: Valores reais e codificados dos fatores para a aplicação do delineamento composto central rotacional (DCCR) à conversão biológica de sulfato contido em resíduos de gesso utilizando resíduos de poda de árvores como fonte de carbono.....45

Tabela 2: Matriz de planejamento com respostas à aplicação do DCCR à redução percentual de sulfato contido em resíduos de gesso utilizando resíduos de poda de árvores como fonte de carbono.....47

Tabela 3: Resultados da análise de variância (ANOVA) aplicada aos dados de eficiência percentual de remoção biológica de sulfato contido em resíduos de gesso utilizando resíduos de poda de árvores como fonte de carbono.....48

LISTA DE ABREVIATURAS

- ANOVA – Método de análise de variância
- BLC – Biomassa lignocelulósica
- BRS – Bactéria Redutora de Sulfato
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente-
- DAM – Drenagem Ácida de Mina
- DBO – Demanda bioquímica de oxigênio
- DCCR - Delineamento composto central rotacional
- DQO– Demanda Química de oxigênio
- FACEPE – Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco
- H₂S – Sulfeto de hidrogênio
- K – Potássio
- MHz - Mega-hertz
- N – Nitrogênio
- NAOH – Hidróxido de sódio
- NPCIAMB – Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Ciências Ambientais
- P-Fosfóro
- PGA – Polo gesseiro do Araripe
- RCD – Resíduos de construção e demolição
- US – Ultrassom

RESUMO

A presente pesquisa foi orientada para o desenvolvimento de um processo para redução biológica de sulfato, presente em resíduos de gesso, utilizando poda de árvores como fonte de carbono. O uso de resíduos de poda de árvores como fonte de carbono traz diversos benefícios para o meio ambiente e para a sociedade, tais como, estímulos à sustentabilidade e à economia local, gestão de resíduos, conservação de florestas, entre outros. Foram investigadas as condições operacionais adequadas, utilizando-se um consórcio de bactérias redutoras de sulfato (BRS), em ambiente anaeróbio, com resíduos agroflorestais sonicados como fonte de carbono. Utilizou-se um delineamento composto central rotacional (DCCR) de 2^3 , com o tempo de sonicação dos resíduos de poda, a concentração inicial do sulfato e a razão DQO/[SO₄⁼] como variáveis independentes. A redução percentual do sulfato foi usada como variável dependente, ou variável resposta. A sonicação da poda de árvore apresentou-se como uma excelente estratégia no pré-tratamento para biomassas lignocelulósicas (BLC). O uso da função de desejabilidade permitiu a identificação de uma eficiência na redução de sulfato de 85,9%. Dois passivos ambientais foram reaproveitados - resíduos de poda de árvores e de gesso, que poderão dar origem a uma importante etapa sustentável do processo de recuperação de enxofre.

Palavras-chave: Poda de árvores, Sulfato, Redução biológica, BRS, Resíduo de gesso, Ultrassonicação.

ABSTRACT

The present research was oriented towards the development of a process for the biological reduction of sulfate, present in gypsum residues, using tree pruning as a carbon source. The use of tree pruning waste as a carbon source brings many benefits to the environment and society, such as stimulating sustainability and the local economy, waste management, forest conservation, among others. Appropriate operational conditions were investigated, using a consortium of sulfate-reducing bacteria (BRS), in an anaerobic environment, with sonicated tree pruning residues as a carbon source. A 2^3 rotational central composite design (DCCR) was used, with the sonication time of the pruning residues, the initial sulfate concentration and the COD/[SO₄⁼] ratio as independent variables. Percent sulfate reduction was used as the dependent variable, or response variable. The sonication of tree pruning has proven to be an excellent strategy in the pretreatment of lignocellulosic biomass (LCB). The use of the desirability function allowed the identification of a sulfate reduction efficiency of 85.9%. Two environmental liabilities were repurposed - tree pruning residues and gypsum waste, which could lead to a significant sustainable stage in the sulfur recovery process

Keywords: Tree pruning, Sulfate, Biological reduction, SRB, Gypsum waste, ultrasonication.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

O advento da industrialização acelerou a expansão urbana, e as ações decorrentes desse processo colaboram para o esgotamento dos recursos naturais. O aumento da utilização de combustíveis fósseis, a destruição dos ecossistemas, o crescente descarte de resíduos e a exploração de minerais, vem provocando o aumento de elementos químicos na água, no solo e no ar decorrentes da exploração e uso desses combustíveis (DANISH et al.,2023; USMAN; BALSALOBRE-LORENTE, 2022).

O minério Gipsita é abundantemente encontrado na região do Araripe pernambucano, compreendendo o Polo Gesseiro do Araripe(PGA), localizado entre os estados de Pernambuco, Piauí e Ceará, concentrando a maior reserva de gipsita a céu aberto do mundo sendo responsável por 95% da produção de gesso do País. O PGA também é responsável por impactos ambientais, desde o desmatamento da vegetação local, à contaminação da água e do ar (SANTOS; EL-DEIR, 2019). Atualmente a utilização e reciclagem do gesso ganha cada vez mais espaço nos diversos seguimentos, como na construção civil e no setor imobiliário, pois, apresenta custo relativamente baixo e preenche as condições de aplicabilidade, minimizando o impacto ambiental do seu beneficiamento (CATALIN et al., 2023). Além disso, o gesso é uma fonte de cálcio e enxofre, podendo também ser reutilizado na melhoria das propriedades químicas de alguns tipos de solos em virtude à alta solubilidade, pois, reduz o percentual de alumínio e a toxicidade causada para as raízes das plantas, resultando em maior absorção dos nutrientes (ZOCA; PENN, 2017).

A redução biológica do sulfato presente no gesso é uma alternativa sustentável para remoção de resíduos com impacto ambiental negativo (KIJJANAPANICH; ANNACHHATRE; LENS, 2014). Essa biorredução pode ser realizada por bactérias redutoras de sulfato (BRS) através da conversão de sulfato a sulfeto. Esses microrganismos do ciclo do enxofre, contribuem na biolixiviação, desempenhando papel fundamental na drenagem de rejeitos ácidos de mineração (AYANGBENRO; OLANREWAJU; BABALOLA, 2018).

A urbanização está associada a mudanças no solo, devido à vegetação limitada, ocasionando alterações nas temperaturas e umidade, nos padrões de vento e influenciando no conforto térmico humano. A arborização é uma ferramenta para mitigar as ondas de calor, como diversão e habitat natural para espécies nativas (JONES et al., 2021).

Considerada como uma das principais fontes na geração de resíduo em uma cidade, a poda urbana tem regulamentação lei nº 18.938/2022, onde descreve as

normas técnicas e a serem utilizadas, ficando proibido, além do corte sem autorização, quaisquer ato que danifique a árvore até seu descarte inadequado (RECIFE (PE) 2022). A valorização e reciclagem desses resíduos agroflorestais resultam em benefícios ambientais, sociais e econômicos. A compostagem é um método de decomposição da matéria orgânica por microrganismos aeróbicos que pode ser utilizada como biofertilizante (AYILARA, 2020).

A lignina é o polímero aromático mais abundante na natureza. Devido ao seu alto teor de compostos fenólicos armazenados, é considerada uma fonte alternativa para a produção de diversos polímeros e biomateriais (AGUSTIANY et al., 2022). Os resíduos de poda são constituídos pela biomassa lignocelulósica, composta principalmente de celulose, hemicelulose e lignina (OKOLIE et al., 2020). A composição específica depende da fonte da biomassa. A disposição desses componentes dentro da biomassa torna sua estrutura extremamente complexa e apenas a celulose e a hemicelulose podem ser convertidas em açúcares fermentáveis (TARASOV; LEITCH; FATEHI, 2018).

A extração desses componentes da biomassa lignocelulósica requer algum tipo de pré-tratamento (DEVI et al., 2022). Um processo de pré-tratamento quebra a lignina que envolve as moléculas de celulose (SHUKLA et al., 2023). O polímero de hemicelulose que une as moléculas de celulose em fibras também é quebrado por processos de pré-tratamento. O pré-tratamento também pode quebrar algumas das moléculas de celulose, particularmente nas regiões amorfas. A remoção da lignina e da hemicelulose permite aos reagentes hidrolíticos um melhor acesso às moléculas de celulose nas etapas de hidrólise subsequentes (WU et al., 2023).

Utilizado como pré tratamento o ultrassom é uma técnica que vêm sendo reconhecida pelos efeitos que causa em vários processos industriais, desde a inspeção não intrusiva de equipamentos (LI et al., 2022), até o aumento significativos de taxas de reações químicas em diferentes setores de vários processos industriais (SANCHETI; GOGATE, 2017).

Este trabalho abordou uma solução inovadora e sustentável para dois problemas ambientais emergentes: o acúmulo de resíduos de gesso provenientes de pré-moldados de gesso e o manejo inadequado dos resíduos de poda de árvores em áreas urbanas. Utilizando um consórcio de bactérias redutoras de sulfato em ambiente anaeróbio, o estudo propôs a utilização de resíduos de poda de árvores como fonte de carbono para facilitar a redução biológica do sulfato contido no gesso. O estudo também explorou a eficácia da sonicação como técnica de pré-tratamento para melhorar o acesso ao carbono dos resíduos de poda.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver uma etapa de redução biológica de sulfato inorgânico, contido em resíduos de gesso, utilizando resíduos de poda de árvores nativas sonicadas como fonte de carbono.

2.2. Objetivos Específicos

- Utilizar o ultrassom como pré-tratamento da biomassa vegetal sustentável para a biodisponibilização da glicose, contida na celulose, como fonte de carbono;
- Identificar as variáveis relevantes para o processo de biorredução de sulfato inorgânico a sulfetos utilizando um consórcio de bactérias redutoras de sulfato (BRS);
- Definir as condições adequadas de biorredução de sulfatos com base na aplicação de um planejamento experimental do tipo DCCR;
- Obter um modelo de previsão para a etapa de biorredução do sulfato contido nos resíduos de gesso;
- Aplicar a ferramenta de desejabilidade para obtenção de condições satisfatórias globais para a etapa de redução biológica de sulfato.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Conceitos relacionados com ondas ultrassônicas

3.1.1. Definição e interação com meios de propagação

Ondas ultrassônicas, são ondas sonoras com frequências que estão acima do limite audível pelo ouvido humano, ou seja, acima de 20.000 hertz (Hz) (LAUTERI et al., 2023). Enquanto os humanos normalmente só podem ouvir sons dentro da faixa de 20 Hz a 20.000 Hz, as ondas ultrassônicas possuem frequências mais altas, geralmente na faixa de 20 kHz a vários mega-hertz (MHz). Quando aplicadas adequadamente, as ondas ultrassônicas podem penetrar em tecidos e materiais, refletir em interfaces e produzir efeitos mecânicos e térmicos, tornando-as de grande valor em uma ampla variedade de campos de aplicação (ZHANG; ZHU; SUN, 2018).

A interação das ondas ultrassônicas com gases, líquidos e sólidos varia de acordo com as propriedades específicas de cada meio. As ondas ultrassônicas se propagam através de gases, mas sua eficiência de transferência de energia é

menor, em comparação com líquidos e sólidos, devido à baixa densidade dos gases (BASUMATARY et al., 2020). No entanto, as ondas ultrassônicas podem ser usadas em gases para fins de limpeza, mistura e medição de propriedades físicas. Quando as ondas ultrassônicas passam por um gás, elas podem criar áreas de alta e baixa pressão, causando vibrações moleculares e produzindo efeitos como cavitação e sonoquímica (XU et al., 2018).

A interação das ondas ultrassônicas com líquidos é mais significativa do que com gases, em termos de aplicações práticas. Quando as ondas ultrassônicas se propagam através de um líquido, elas geram ondas de pressão que causam cavitação, ou seja, a formação e colapso de pequenas bolhas de vácuo. Esse fenômeno cria jatos líquidos de alta velocidade e forças de cisalhamento, o que pode levar à desagregação de partículas, homogeneização e melhorias nos processos de extração e reações químicas (CHAVAN et al., 2022).

Quando as ondas ultrassônicas encontram sólidos, parte da energia é refletida, absorvida ou transmitida, dependendo da natureza do material. Em sólidos densos e homogêneos, as ondas ultrassônicas podem se propagar com velocidade e eficiência relativamente altas (ONO, 2020). Em materiais porosos ou com estruturas complexas, as ondas ultrassônicas podem ser absorvidas e dissipar energia na forma de calor. Em geral, a interação das ondas ultrassônicas com os três estados da matéria (gases, líquidos e sólidos) pode resultar em vários efeitos mecânicos, térmicos e químicos. Essas interações têm aplicações em diversas áreas, incluindo a medicina nos diagnósticos por ultrassom, processamento de alimentos, limpeza, emulsificação, mistura, desagregação de partículas, entre outras aplicações industriais e científicas.

A capacidade das ondas ultrassônicas de interagir com diferentes materiais torna essa tecnologia uma ferramenta versátil e valiosa em várias indústrias e campos de pesquisa (LIU et al., 2022).

3.1.2. Pré-tratamento com ultrassom

O método de pré-tratamento físico por ultrassom (US) baseia-se no princípio da cavitação induzida por radiação ultrassônica (XU et al., 2023). A cavitação (formação de micro/nanobolhas de ar e gera forças de cisalhamento que quebram a estrutura complexa da biomassa lignocelulósica (BLC) promovendo a extração de compostos desejados, como celulose, hemicelulose e/ou lignina (GILCA; POPA; CRESTINI, 2015).

O estudo realizado por He e colaboradores (2017) investigou o efeito do pré-tratamento por ultrassom em amostras de madeira de eucalipto. Foram utilizadas três soluções diferentes durante o pré-tratamento. A análise térmica e

espectroscópica revelou que o ultrassom alterou as características de degradação térmica e a liberação de produtos gasosos, com maior produção de certos gases a temperaturas específicas. As reações foram mais rápidas nas amostras pré-tratadas com solução aquosa de NaOH. Além disso, o pré-tratamento reduziu os fluxos de calor e intensificou as taxas de reações por meio da geração de radicais hidroxila e hidróperóxido em condições alcalinas. Os referidos pesquisadores observaram que a maior cristalinidade era resultado da remoção efetiva das frações de hemicelulose e lignina amorfa. Também observaram que a escolha dos solventes (soluções aquosas diluídas de ácidos inorgânicos ou alcalinos, solventes orgânicos ou líquidos iônicos) era crucial para determinar as condições ideais para os pré-tratamentos por ultrassom.

Vários fatores influenciam o tratamento por ultrassom, incluindo frequência do ultrassom, duração do tratamento, potência do ultrassom e temperatura. Estudos demonstram os efeitos do pré-tratamento por ultrassom em diferentes tipos de biomassa lignocelulósica, evidenciando que o tempo e a temperatura do ultrassom afetam a digestibilidade enzimática da biomassa (SHUKLA et al., 2023).

O uso de ultrassom como uma tecnologia alternativa tem sido amplamente investigado para aumentar a eficiência dos pré-tratamentos de biomassa. O ultrassom proporciona efeitos físicos, como turbulência, micro jatos, mistura em nível microscópico e ondas de choque, que tornam a biomassa mais adequada para os próximos passos do processo (ONG; WU, 2020).

Os pré-tratamentos assistidos por ultrassom têm mostrado alta eficiência na remoção de lignina em comparação com os processos convencionais. Além dos efeitos físicos, os pré-tratamentos com ultrassom envolvem a formação de radicais livres ($\cdot\text{H}$ e/ou $\cdot\text{OH}$) devido à implosão das bolhas de cavitação. Esses radicais podem promover a fragmentação e reorganização da celulose, tornando o processo hidrolítico mais eficiente. No entanto, é necessário cuidado para evitar o aumento excessivo da energia ultrassônica, pois isso pode levar a efeitos indesejados (SIDANA; YADAV, 2022).

A eficiência dos pré-tratamentos assistidos por ultrassom pode ser atribuída a esses efeitos físicos, que melhoram a fragmentação da biomassa e aumentam a recuperação de açúcares e outros compostos valiosos. A remoção de lignina é um dos principais focos dos pré-tratamentos assistidos por ultrassom. A lignina, que estabiliza e protege a biomassa lignocelulósica, é facilmente removida pelo ultrassom, tornando-se o primeiro passo em qualquer processo de separação de frações lignocelulósicas (FLORES et al., 2021).

O polímero de hemicelulose une as moléculas de celulose em fibras, é quebrado por processos de pré-tratamento. O pré-tratamento também pode

quebrar algumas das moléculas de celulose, particularmente nas regiões amorfas. A remoção da lignina e da hemicelulose permite aos reagentes hidrolíticos um melhor acesso às moléculas de celulose nas etapas de hidrólise subsequentes (WU et al., 2023). No entanto, é importante observar que o uso em um tempo prolongado do US pode ter efeitos adversos, como colisões e aglomeração entre as partículas. Além disso, altas potências de ultrassom podem causar cavitação próxima à ponta do transdutor de ultrassom, o que dificulta a transferência de energia para o meio líquido.

O uso de ultrassom em pré-tratamentos de biomassa também pode ser uma alternativa para a remoção de materiais inorgânicos, como metais, solos e cinzas, presentes em alguns resíduos de biomassa. O ultrassom tem demonstrado ser eficiente na remoção de inorgânicos, melhorando a disponibilidade de energia calorífica da biomassa e aumentando a eficiência do processo (ABDRASHITOV et al., 2023).

Os pré-tratamentos assistidos por ultrassom oferecem várias vantagens, como redução do tempo de processamento, temperaturas mais baixas e a possibilidade de trabalhar com reatores operando à pressão atmosférica. A combinação de ultrassom com tratamentos convencionais, como sistemas híbridos, também pode aumentar a eficiência dos pré-tratamentos (SHARMA; NARGOTRA; BAJAJ, 2019; YU et.al,2018).

3.1.3. Velocidade de propagação do ultrassom no meio

As velocidades de propagação do ultrassom variam significativamente nos meios gasosos, líquidos e sólidos devido às diferentes propriedades físicas desses materiais. Nos gases, a velocidade de propagação do ultrassom é relativamente baixa em comparação com os líquidos e sólidos, devido à baixa densidade e resistência dos gases. Em média, a velocidade do ultrassom nos gases é cerca de 300 a 400 metros por segundo (m/s), dependendo da temperatura e da composição do gás.

Nos líquidos, a velocidade do ultrassom é maior do que nos gases, pois os líquidos são mais densos e têm maior resistência.

A velocidade do ultrassom nos líquidos geralmente varia de cerca de 1000 m/s a 1500 m/s. Nos sólidos, a velocidade do ultrassom é consideravelmente maior do que nos gases e líquidos, devido à alta densidade e resistência dos materiais sólidos (BRESSAN; CARRARO; PINTO, 2023).

A velocidade do ultrassom nos sólidos é tipicamente da ordem de alguns milhares de metros por segundo, variando dependendo do tipo de material e de suas propriedades específicas. Além disso, as velocidades de propagação do ultrassom são fundamentais para calcular a profundidade de penetração e a

resolução em diferentes aplicações, como diagnóstico médico por ultrassom, inspeção não destrutiva e outras técnicas que dependem da interação das ondas ultrassônicas com os materiais (KOROBICHUK et al.,2023).

3.1.4. Cavitação ultrassônica

A cavitação acústica provocada pelas ondas ultrassônicas é um fenômeno que ocorre durante a propagação dessas ondas em um líquido. Quando uma pressão negativa é aplicada a um líquido, a concentração de energia difusa do som cria microbolhas ou cavidades no líquido. Essas bolhas de cavitação são formadas devido ao aumento da distância entre as moléculas do líquido (MONDAL et al., 2021). A quantidade de pressão negativa necessária para produzir cavitação depende da resistência à tração do líquido, o que significa que varia de acordo com o tipo e a pureza do líquido. Líquidos altamente solúveis, como sal e sulfato de zinco, aumentam a tensão superficial devido ao compartilhamento de forças atrativas entre as moléculas do soluto. Por outro lado, líquidos menos solúveis podem reduzir a tensão superficial do soluto, afetando a formação e estabilidade das bolhas de cavitação (KARIMI; JENKINS; STROEVE, 2014).

A cavitação acústica tem várias aplicações úteis na indústria de alimentos e em outros campos. Ela pode ser usada para pasteurizar e preservar alimentos, inativando enzimas e microrganismos em condições suaves de temperatura. Além disso, as mudanças físicas que ocorrem durante a cavitação acústica, como espalhamento e atenuação, têm sido exploradas para aplicações de controle de qualidade de alimentos. É uma tecnologia emergente que vem sendo cada vez mais estudada e aplicada, apresentando vantagens como eficiência energética, baixo custo e economia de energia (KUTLU et al., 2022).

3.1.5. Efeitos da pressão e da temperatura

A pressão e a temperatura são dois fatores importantes que podem afetar as velocidades de propagação das ondas ultrassônicas em um meio. A pressão tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas dos materiais, incluindo sua densidade e resistência. Em geral, o aumento da pressão em um meio pode aumentar a densidade do material, tornando-o mais resistente e, conseqüentemente, aumentando a velocidade de propagação do ultrassom (MIKHAILOVA; SMIRNOV; VOLKOV, 2019). Por outro lado, a diminuição da pressão pode reduzir a densidade do material, tornando-o menos resistente e diminuindo a velocidade do ultrassom. Em meios gasosos, onde as moléculas estão mais espaçadas e a compressibilidade é maior, o efeito da pressão na velocidade do ultrassom é mais evidente. Aumento na pressão dos gases pode levar a aumentos significativos na velocidade do som, enquanto a redução da

pressão pode resultar em diminuição da velocidade do ultrassom (CAI et al., 2022).

A temperatura também tem um efeito considerável nas propriedades físicas dos materiais. Em geral, o aumento da temperatura tende a aumentar a velocidade de propagação do ultrassom em um meio, pois as moléculas têm mais energia térmica e estão em movimento rápido e constante. Isso resulta em uma maior taxa de propagação das ondas ultrassônicas através do material (SMIRNOV; MIKHAILOVA, 2021).

Nos líquidos e sólidos, o aumento da temperatura geralmente leva a um aumento na velocidade do ultrassom. Em sólidos, o aumento da temperatura também pode resultar em mudanças nas propriedades elásticas do material, afetando ainda mais a velocidade de propagação do ultrassom. Vale ressaltar que esses efeitos podem ser diferentes para cada tipo de material e dependem de suas propriedades específicas. Portanto, ao utilizar técnicas de ultrassom em diferentes meios, é essencial considerar a pressão e a temperatura do ambiente para obter medições precisas e resultados confiáveis (PAVLENKO; KOSHLAK, 2021). Além disso, esses efeitos são considerações importantes em aplicações que envolvem medidas de velocidade de som, como na caracterização de materiais, testes não destrutivos e outras aplicações industriais e científicas.

3.1.6. Efeitos da frequência

Através do ajuste da frequência, o ultrassom pode ser utilizado em muitas aplicações industriais, incluindo alimentos. Esta tecnologia sustentável é mais rápida, não térmica, não destrutiva e de baixo custo, além disso possui muitas vantagens como processos rápidos, eliminação de etapas do processo, produto de melhor qualidade, qualidade sensorial e características estéticas dos produtos alimentícios, levando a uma vida útil melhorada (FALSAFI, 2019).

O uso de energia acústica em operações de processamento ou bioprocessamento é relativamente novo quando comparado com outras fontes de energia, como a mecânica ou térmica, que já vem sendo utilizadas há séculos em várias aplicações. Dois fatores importantes tornam os processos assistidos por ultrassom possíveis: o desenvolvimento de tecnologias de geração de ultrassom mais escaláveis nos últimos 20 a 30 anos e uma melhor compreensão das interações entre a energia acústica e os materiais alimentares (MEHTA et al., 2022). Em geral, o ultrassom refere-se a ondas de pressão acústica com frequências de 20 kHz ou mais. A maioria dos efeitos do ultrassom em baixas e altas frequências está diretamente relacionada à cavitação que ocorre no líquido tratado em aplicações de baixa frequência (20 a 100 kHz), gerando altas pressões no local (superiores a 500 bar) e temperaturas (até 5000°C), resultando em altas forças de cisalhamento, que podem aprimorar a limpeza, homogeneização ou

reduzir a incrustação, entre outros efeitos. A cavitação também é mais estável quando se aplica ultrassom de alta frequência, enquanto induz mais microjatos (KHADHRAOUI et al., 2021).

A utilização de ultrassom de baixa frequência e alta potência foi inicialmente sugerida na década de 1960 para lise bacteriana, emulsificação e limpeza. Entre 1970 e 1995, os equipamentos de ultrassom de alta potência ficaram mais avançados, para processos químicos, com eletrodos ultrassônicos operando até 6 Kw (ZABOT; VOGANO; SILVA, 2021).

3.2. Biomassa Lignicelulósica

3.2.1. Resíduos de poda de árvore

O aumento da produção de resíduos sólidos nas cidades está relacionado ao crescimento da população. De acordo com o panorama dos resíduos sólidos no Brasil da ABRELPE (2022) , com a retomada das atividades pós pandemia, a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) apresentou papel significativo, com a novas regras para Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), além de instiuir o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) definindo as estratégias, orientações e metas para o setor em um período de 20 anos. No entanto, as cidades brasileiras ainda enfrentam grandes desafios na gestão de resíduos, embora em 2022 a geração per capita de RSU, tenha apresentado curva regressiva, com média de 1,043 kg de resíduos por habitante/dia, enquanto em 2021 ,por isso, é fundamental que haja implementação da coleta seletiva para maximar o reaproveitamento, reutilização, reciclagem e redução dos resíduos sólidos.

O plano de resíduos sólidos elaborado pela secretaria das cidades do estado de Pernambuco, caracteriza e analisa, metas e diretrizes para gestão de resíduos sólidos urbanos (GOVERNO) (BR) (2018). Em seu estudo, Tavares (2018), apresentou a composição gravimétrica dos RSU a RMR, onde dos 35,83% da materia orgânica ,5,59% era composta de madeira de poda descartada de maneira inadequada.

A gestão de resíduos de podas de árvores é um desafio enfrentado por muitos municípios, não apenas no Brasil, mas em todo o mundo (MALAV et al.,2020). O descarte desses resíduos pode contribuir para a poluição ambiental, ocasionada por aterros sanitários e desperdício de recursos naturais importantes.

O gerenciamento adequado dos RSU é um desafio crucial para as autoridades municipais e governamentais, uma vez que impacta tanto o meio ambiente quanto a qualidade de vida das comunidades locais, devido falta de politicas públicas, investimentos em infraestrutura, educação ambiental e conscientização contínua,

são estratégias importantes para melhorar o gerenciamento desses resíduos (SURYAWAN; LEE, 2023).

3.2.2. Lignina

A lignina confere suporte estrutural, impermeabilidade e resistência contra ataques microbianos. É uma macromolécula polifenólica complexa e altamente ramificada composta por três tipos de monômeros fenólicos: guaiacol, siringol e álcool p-cumarílico, resultando em um polímero heterogêneo e recalcitrante (SUN, 2020). É composta por vários grupos funcionais, como hidroxila (-OH), metoxila (CH₃ -O), carbonila (-C=O-), carboxila (-COOH) e benzeno (C₆ H₆) tornando-a um componente ideal para a preparação de uma variedade de produtos químicos devido às suas fontes abundantes e baixo custo (TAKKELLAPATI; LI; GONZALEZ, 2018).

No entanto, a lignina não contém açúcares e não pode ser convertida em etanol usando as tecnologias de fermentação disponíveis atualmente. Plantas herbáceas, como gramíneas, geralmente têm os menores teores de lignina, enquanto as maiores quantidades são encontradas em madeiras macias (SILVA et al., 2021). A lignina é um componente importante da lignocelulose, sendo a principal matriz estrutural das paredes celulares das plantas, sua principal função é fornecer suporte estrutural, conferindo rigidez e resistência mecânica. Além disso, atua como uma barreira protetora, tornando as plantas menos susceptíveis contra infecções e insetos (GNANASEKARAN et al., 2023). Devido à sua complexidade e resistência, a lignina tem sido amplamente estudada, e é considerada um dos principais obstáculos na conversão eficiente de biomassa lignocelulósica em produtos de valor agregado. (AMINI; VALLS; RONCERO, 2021).

Segundo AGUSTIAN et al. (2022) a lignina é o polímero aromático mais abundante na natureza. Devido ao seu alto teor de compostos fenólicos armazenados, é considerada uma fonte alternativa para a produção de diversos polímeros e biomateriais, também desempenha um papel importante na impermeabilização das paredes celulares, impedindo a penetração de água e outras substâncias. Fator essencial para manter a integridade e a resistência da planta.

Ligninas técnicas são produzidas como subprodutos nos procedimentos de pré-tratamento de lignocelulose. São procedimentos que incluem métodos físicos, químicos e físico-químicos, produzindo um resíduo líquido conhecido como licor negro, composto principalmente de lignina, carboidratos e cinzas. Métodos de processamento como kraft, organosolv e lignina hidrolisada são amplamente utilizados, e cada lignina produzida é única em termos de estrutura química, perfil

de impurezas, polidispersão e peso molecular (KAZZAZ; FATEHI, 2020).

A biomassa lignocelulósica é um material biorrenovável, composto principalmente de polissacarídeos, polímeros fenólicos e proteínas, que constituem a parte essencial das paredes celulares das plantas. Possui uma estrutura complexa, na qual, a celulose é envolvida pela estrutura densa formado por hemicelulose e lignina (SINGHVI; GOKHALE, 2019). Além dos componentes principais, é composta por celulose, hemicelulose e lignina, juntamente com quantidades menores de pectina, proteínas, cinzas e extrativos solúveis, como materiais não estruturais, tais como compostos nitrogenados, açúcares não estruturais, clorofila e ceras; esses componentes são distribuídos na estrutura do esqueleto ao longo das paredes celulares, combinando elementos e os sólidos rígidos (SARAVANAN et al., 2022).

A lignocelulose, é considerada uma fonte promissora e alternativa de carbono para a produção de produtos químicos finos e blocos de construção, com um impacto ambiental moderado (ABRAHAM et al., 2020). Resíduos agrícolas e florestais derivados da biomassa lignocelulósica são a única fonte de energia renovável que contém carbono, por esse motivo são consideradas um recurso adequado para conversão em biocombustíveis. As indústrias de fabricação de papel e celulose são a principal fonte de geração de biomassa lignocelulósica no setor industrial (TOCZYŁOWSKA-MAMIŃSKA, 2017).

A biomassa lignocelulósica é usada como agente para compostagem e, recentemente, vem sendo utilizada como matéria-prima para digestão anaeróbia devido à demanda por energia renovável e neutra em carbono (XU; LI, 2017)

A celulose é uma macromolécula composta por cadeias de β -1,4-glucano que se unem para formar microfibrilas. Ela é altamente resistente à degradação e geralmente requer tratamentos químicos ou enzimáticos para ser completamente hidrolisada (ZHANG et al., 2023). As ramificações de D-glicose fermentável podem ser separadas da celulose através da ação de ácidos ou enzimas que quebram as ligações glicosídicas β -(1,4). Os polímeros de celulose são basicamente ligados por ligações de hidrogênio e de Van Der Waals, fazendo com que a celulose se agrupe em microfibrilas. Essas microfibrilas podem ser ainda agregadas para formar fibrilas e, em seguida, fibras. As fibras de celulose estão inseridas em uma matriz de polissacarídeos de hemicelulose e lignina (PASIN et al., 2020).

A estrutura cristalina da celulose influencia sua taxa de sacarificação, e diferentes polimorfos de celulose têm sido identificados. Tratamentos termoquímicos podem converter a celulose de um polimorfo para outro, e essas diferenças estruturais têm impacto nas taxas de hidrólise da celulose. As regiões cristalinas são muito mais difíceis de hidrolisar em glicose em comparação com as

regiões amorfas (RIBEIRO et al., 2019).

A principal diferença entre hemicelulose e celulose é o fato de que a hemicelulose possui ramificações com cadeias laterais curtas, compostas por diferentes açúcares. Esses monossacarídeos conectados à hemicelulose consistem em açúcares de seis carbonos e cinco carbonos, incluindo arabinose, galactose, glicose, manose, xilose e outras espécies (LU et L., 2021).

Acredita-se que a xilose seja o açúcar mais predominante na hemicelulose. A hemicelulose é composta basicamente por homopolímeros ou heteropolímeros com pequenas ramificações ligadas por ligações glicosídicas β -(1,4) e ocasionalmente β -(1,3) (KIM et al., 2018). Os polímeros presentes na hemicelulose podem ser mais facilmente hidrolisados em comparação com a celulose, pois os polímeros de hemicelulose não podem ser compactados, mesmo quando cooperam com as cadeias de celulose para formar cristais (AHMAD; ZAKARIA, 2019).

O pré-tratamento das biomassas lignocelulósicas tem como objetivo, desenvolver processos eficientes, econômicos e ambientalmente sustentável, visando tornar a biomassa uma fonte viável de energia renovável para produção de biocombustíveis, produtos químicos e outros derivados. Várias tecnologias estão sendo exploradas, incluindo a utilização de enzimas e microrganismos geneticamente modificados para melhorar essa conversão (MANKAR et al., 2021). Para convertê-la em produtos de valor, é necessário realizar pré-tratamentos com objetivo de separar os componentes da biomassa, como a lignina, hemicelulose, celulose e compostos inorgânicos. Os pré-tratamentos convencionais incluem os processos químicos, físicos, físico-químico e biológicos. No entanto, esses métodos geralmente exigem grandes quantidades de reagentes, longos tempos de pré-tratamento e condições severas, representando desafios econômicos e ambientais (BANERJEE, S.; PATTI, 2019).

3.3. Biorremediação de Sulfato

3.3.1. Ciclo do enxofre

O ciclo do enxofre é um processo natural que ocorre na Terra, no qual o enxofre é transformado entre diferentes formas químicas, passando por vários estágios e reservatórios, tanto bióticos quanto abióticos. Esse ciclo é vital para a vida na terra, pois, o enxofre é um elemento essencial e participa na síntese dos aminoácidos metionina e cisteína, das vitaminas e outros compostos indispensáveis para manutenção dos organismos vivos (JAISWAL et al., 2021).

O enxofre (S) é abundante em toda a crosta terrestre, sua disponibilidade no solo acontece pelo intemperismo de minerais sulfatados, adição de fertilizantes,

uso de pesticidas entre outros. O aumento da queima de combustíveis fósseis oriundo das atividades antrópicas também resulta em uma maior entrada de enxofre atmosférico no solo (CHAUDHARY et al.,2023).

O ciclo do enxofre é mediado principalmente por microrganismos oxidantes e redutores e tem impactos ambientais significativos, especialmente no tratamento de águas residuais e na biorremediação da poluição. É composto por metabolismos de enxofre assimilatório e dissimilatório. Os processos assimilatórios são aqueles em que os organismos vivos incorporam compostos orgânicos em suas moléculas, como aminoácidos e proteínas, já os dissimilatórios é mediado por reações microbiológicas que ocorrem na natureza, envolvendo bactérias e archaea, e que resultam na transformação do enxofre em diferentes compostos químicos (WU et al.,2021).

A oxidação microbiana do enxofre e a redução do sulfato são etapas críticas no ciclo biogeoquímico do enxofre na Terra, portanto, bactérias oxidantes e redutoras de sulfato, são os principais microrganismos para conduzir a transformação de diversas formas de compostos de enxofre e que afetam o ciclo global de enxofre (KOCH; DAHL, 2018).

3.3.2. Fisiologia e metabolismo das BRS

As Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS) são procariontes heterotróficos do domínio Bactérias, classe deltaproteobactérias; são bactérias gram-negativas que demonstraram ter capacidade genética para redução de sulfato (SHIMOSHIGE et al.,2021). Atuam de forma essencial em ambientes anaeróbios e sua utilização em processos biotecnológicos como a biorredução do sulfato em tratamento de efluentes, drenagem de minas e em compostos de sulfato de cálcio, desempenhando papel fundamental na produção de enxofre e no ciclo do carbono, utilizando diversas fontes de substâncias orgânicas e inorgânicas para geração de energia (KUSHKEVYCH et. al., 2021; AYANGBENRO; OLANREWAJU; BABALOLA, 2018).

As bactérias redutoras de sulfato são de grande importância ecológica na biodegradação da matéria orgânica em todos os ambientes anaeróbios ricos em sulfatos. Essas bactérias representam um grupo diversificado de anaeróbios obrigatórios que prosperam em ambientes anóxicos, contendo materiais orgânicos e sulfato (TANG; BASKARAN; NEMATI 2009).

Algumas BRS anaeróbias obrigatórias desempenham papel importante na redução de compostos do enxofre utilizando o sulfato (SO_4^-) comoceptor de elétrons, em seu metabolismo, gerando como produto o sulfeto de hidrogênio – H_2S (TIAN et al. 2017). Essas bactérias estão presentes em ambientes como

ecossistemas de água doce e marinha, fontes hidrotermais, áreas anaeróbicas do solo e zonas úmidas e utilizam o hidrogênio da matéria orgânica para obtenção de energia por oxidação. Na redução desulfato, os doadores de elétrons são os ácidos graxos de cadeia curta como o lactato, o acetato, ácidos de cadeia longa, e compostos aromáticos (DORDEVÍC et al. 2021).

Nos processos sulfidogênicos, a produção de H_2S envolve o metabolismo de microrganismos com capacidade de reduzir compostos que contém enxofre, como também, de oxidar fontes de carbonos orgânicos e inorgânicos para seu crescimento (KUSHKEVYCH et al. 2018). O sulfeto de hidrogênio é o principal produto da decomposição da matéria orgânica originada de resíduos industriais, a qual sofre ação de microrganismos quimiotróficos que fazem parte do metabolismo anaeróbico de determinados grupos de bactérias redutoras de sulfato (LETELIER-GORDO et al., 2020).

Mikheenko et al. (2019) trabalharam no desenvolvimento de uma estratégia para transformar resíduos celulósicos, como biomassa ou material lignocelulósico, em um combustível compatível com os combustíveis fósseis, um potencial combustível renovável “Drop in Fuel” (combustível substituto) através de um processo denominado “upconversion.” Esse tipo de combustível pode ser utilizado diretamente nas atuais infraestruturas de distribuição e motores, sem a necessidade de modificações significativas. Os pesquisadores utilizaram um catalisador inovador gerado a partir da bactéria *Desulfovibrio desulfuricans* e um consórcio de sulfidogênicos acidófilos. O processo de upconversion é baseado na habilidade das bactérias sulfidogênicas, como a *Desulfovibrio desulfuricans*, de reduzir os compostos presentes nos resíduos celulósicos em compostos de cadeia curta. Em seguida, esses compostos são convertidos em hidrocarbonetos de cadeia longa por um consórcio de micro-organismos acidófilos. Os resultados do estudo demonstraram que o consórcio de bactérias acidófilas foi capaz de converter os compostos de cadeia curta produzidos pelas bactérias redutoras de sulfato do gênero *Desulfovibrio desulfuricans* em hidrocarbonetos de alto peso molecular, compatíveis com combustíveis líquidos.

Além disso, o processo ocorreu em condições anaeróbicas e em ambientes ácidos, simulando condições realistas de biorrefinarias e resíduos industriais.

A redução biológica por BRS é uma das alternativas para mitigar a emissão de sulfato originado das atividades industriais como na produção de fertilizante, borracha, pigmentos, mineração, esgotos domésticos, entre outras, que podem provocar contaminação das águas residuais em virtude da lixiviação para o solo e águas subterrâneas (REIS et al. 2022). A transformação inicia-se na redução de sulfatos utilizando fontes de carbono baratas. O mecanismo básico utilizado pelas

BRS na redução de sulfato consiste na redução dissimilatória de sulfato e no aproveitamento das fontes de carbono como doadores de elétrons, para promover a produção do H₂S, a exemplo das *Desulfobacter* e *Desfulvibrio*, classificadas como sulfidogênicas, considerando sua capacidade de usar o sulfato como fonte de energia, utilizando-o nas reações para produzir nova biomassa (ZHANG et al. 2016). Antes da redução, o sulfato deve ser ativado pela sulfato adenil transferase (SAT) para produzir adenosina 5'-fosfosulfato (APS), seguida da redução por *AprAB* a sulfito, onde o sulfito é reduzido parcialmente a sulfeto de hidrogênio (H₂S) pela enzima DsrAB (dissimilatory sulfite reductase) de acordo com a Figura 1 (THAKUR et al., 2023).

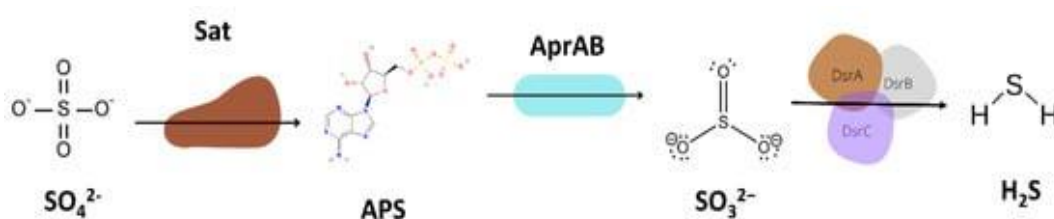


Figura 1 – Resumo da via dissimilatória de redução de sulfato em BRS
 Fonte: THAKUR et al., 2023

3.4. Resíduos de Gesso

Para 2020, a produção brasileira do mineral Gipsita foi estimada em 3,2 milhões de toneladas, correspondendo a 2,1% da produção mundial (ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA, 2017). Aproximadamente, 90% dessa produção é proveniente do Polo Gesseiro do Araripe (PGA), que abrange cerca de 800 empresas localizadas na região do Sertão do Araripe do Estado de Pernambuco (BRASIL, 2021). A mineração da gipsita e a fabricação do gesso e seus derivados formam um dos pilares econômicos dessa localidade, que compreende 10 municípios no Extremo Oeste do estado (ALVES; SANTOS, 2022).

O gesso em pó, é um material produzido principalmente a partir da calcinação do mineral Gipsita, um processo no qual a matéria-prima (sulfato de cálcio di-hidratado – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é pulverizada e submetida a temperaturas entre 140 e 179°C, liberando vapor de água no ambiente e resultando no gesso comercial em pó (sulfato de cálcio semi-hidratado – $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) (KOPER et al., 2020).

No Brasil, o gesso é largamente utilizado como material de acabamento, especialmente na produção de placas de forros e elementos decorativos. Também é possível empregá-lo na fabricação de placas para a execução de paredes divisórias e forros e na fabricação de ornamentos para paredes e tetos (ARDEBILI et al., 2023).

O gesso utilizado nesta perspectiva deve apresentar tempo de pega maior do que o utilizado para a fundição e os tempos de endurecimento devem ser ainda mais elevados, alargando o tempo de trabalhabilidade da pasta.

Como tais manuseios dependem de vários fatores, a exemplo da confiabilidade do processo de fabricação, tempo de pega, forma de transporte dos pré-moldados, entre outros, a taxa de produção de resíduos é consideravelmente alta, principalmente nos canteiros de obra (BOUZIT et al., 2019).

A destinação inadequada dos resíduos do gesso acarreta problemas como: degradação das áreas de manancial e de proteção permanente; proliferação de agentes transmissores de doença; assoreamento de rios e córregos; obstrução do sistema de drenagem, tais como galerias, sarjetas; ocupação de vias e logradouros públicos; problemas respiratórios; degradação da paisagem urbana e rural, contaminação de solo e lençóis freáticos e do ar dióxido de carbono (SINDUSCON, 2023).

Diante da realidade atual, o gerenciamento correto dos resíduos de gesso se apresenta como uma saída para minimizar a partir de projetos elaborados e implantados pelos geradores, a fim de estabelecer os procedimentos necessários para o manejo e destinação ambientalmente adequados desses resíduos. A resolução CONAMA 431/1, que alterou e classificou o resíduo como reciclável, permite que os geradores tenham o gerenciamento como forma de tentar resolver esse problema, mas que precisará envolver aspectos administrativos, gerenciais, econômicos e desempenho, considerando aspectos tecnológicos e operacionais. No seu guia para elaboração de projetos de gerenciamento de resíduos, devem atender algumas fases como: planejamento, de caracterização, de triagem ou separação, de acondicionamento, armazenamento, de transporte, de reutilização e reciclagem, de remoção dos canteiros e destinação final (SANTOS et al., 2017). Para que os planos ou projetos venham obter sucesso os geradores e poder público, sociedade, empresas, prefeitura, governos estaduais e federais devem ter uma responsabilidade compartilhada e seguir a Lei nº 12.305, denominada Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, que em seu Art. 1 institui as diretrizes relativa à gestão integrada e ao gerenciamento desses resíduos, incluindo os perigos, além de estabelecer responsabilidades e sanções aos responsáveis.

REFERÊNCIAS

ABDRASHITOV, A. ; GAVRILOV, A.; MARFIN, E.; PANCHENKO, V.; KOVALEV, A.; BOLSHEV, V.; KARAEVA, J. Cavitation Reactor for Pretreatment of Liquid Agricultural Waste. *Agriculture* **2023**, 13,1218. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061218>

ABRAHAM, A.; MATHEW, A.K.; PARK, H.; CHOI O, SINDHU R, Parameswaran B et al (2020) Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass. **Biores Technol** 301 :122725. <https://doi.org/10.1016/j.Biortech.2019.122725>

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil: 2022. São Paulo, 2022.

AGUSTIANY, Erika Ayu; RIDHO, Muhammad Rasyidur; N., Muslimatul Rahmi D.; MADYARATRI, Elvara Windra; FALAH, Faizatul; LUBIS, Muhammad Adly Rahandi; SOLIHAT, Nissa Nurfajrin; SYAMANI, Firda A.; KARUNGAMYE, Petro; SOHAIL, Asma. Recent developments in lignin modification and its application in lignin-based green composites: a review. **Polymer Composites**, [S.L.], v. 43, n. 8, p. 4848-4865, 11 jul. 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/pc.26824>.

AHMAD, Norlailiza; ZAKARIA, Mohd Rafein. Oligosaccharide From Hemicellulose. **Lignocellulose For Future Bioeconomy**, [S.L.], p. 135-152, 2019. **Elsevier**. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-816354-2.00008-6>.

ALVES, D.L.N.S.; SANTOS, V.M.L. Sistemas Informatizados de Monitoramento e Análise da Qualidade do Gesso: prospecção e desenvolvimento de novas tecnologias para fortalecimento do Polo Gesseiro do Araripe. **Cadernos de Prospecção – Salvador**, v. 15, n. 3, julho a setembro, 2022, p. 823-838. DOI: <https://doi.org/10.9771/cp.v15i3.46747>.

AMINI, Elahe; VALLS, Cristina; RONCERO, M. Blanca. Ionic liquid-assisted bioconversion of lignocellulosic biomass for the development of value-added products. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 326, p. 129275, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129275>.

ARDEBILI, A.A.; SÁEZ, P.V.; CORTINA, M.G.; CRUZ, D.M.T.; SÁIZ, A.R.; ATANES-SÁNCHEZ, E. Mechanical characterization of gypsum mortars with waste from the automotive sector. **Construction and Building Materials** Volume 370, 17 March 2023, 130675. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130675>

AYANGBENRO, Ayansina S.; OLANREWAJU, Oluwaseyi S.; BABALOLA, Olubukola O.. Sulfate-Reducing Bacteria as an Effective Tool for Sustainable Acid Mine Bioremediation. **Frontiers In Microbiology**, [S.L.], v. 9, p. 1-20, 22 ago. 2018. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2018.01986>.

AYILARA, Modupe ; OLANREWAJU, Oluwaseyi ; BABALOLA, Olubukola ; ODEYEMI, Olu. Waste Management through Composting : challenges and potentials. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 11, p. 4456, 30 maio 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12114456>.

BANERJEE, S. ; PATTI, A.F. ; Ranganathan V, Arora A (2019) Hemicellulose based biorefinery from pineapple peel waste : xylan extraction and its conversion into xylooligosaccharides. **Food Bioprod Process** 117 :38–50. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.06.012>

BASUMATARY, B.; NAYAK, P.K.; CHANDRASEKAR, C.M.; NATH, A.; NAYAK, M.; KESAVAN, R.K. Impact of thermo sonication and pasteurization on the physicochemical, microbiological and anti-oxidant properties of pomelo (*Citrus maxima*) juice. **International Journal of Fruit Science** 2020, 20 : 3, 2056-2073, DOI : 10.1080/15538362.2020.1848751

BOUZIT, S.; LAASRI, S.; TAHA, M.; LAGHZIZIL, A.; HAJJAJI, A.; MERLI, F.; BURATTI, C. Characterization of Natural Gypsum Materials and Their Composites for Building Applications. *Appl. Sci.* 2019, 9, 2443; doi:10.3390/app9122443

BRASIL. Anuário não Metálicos 2020. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes-1/anoario-estatistico-do-setor-metalurgico-e-do-setor-de-transformacao-de-nao-metalicos/anoario-nao-metalicos-2020-versao-nova-05-01-2021.pdf/view>. Acesso em: 15 julho. 2023

BRESSAN, H.F.G.; CARRARO, F.; PINTO, R.C.A. Ultrasound monitoring of setting behavior of concrete mixtures, **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, vol. 16, no. 6, e16608, 2023, <https://doi.org/10.1590/S1983-41952023000600008>

CAI, Bowen; MAZAHREH, Janine; MA, Qingyu; WANG, Fang; HU, Xiao. Ultrasound-assisted fabrication of biopolymer materials: a review. **International Journal Of Biological Macromolecules**, [S.L.], v. 209, p. 1613-1628, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.055>.

CATALIN, Saitis ; DANIELA, Manea Lucia ; MONICA, Plesa Luminita ; RALUCA, Saitis Lavinia. Recycling Plaster Waste as a Substitute for Aggregates in Obtaining Plastering Mortars. *Buildings*, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 491, 11 fev. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings13020491>.

CHAUDHARY, Suman; SINDHU, Satyavir Singh; DHANKER, Rinku; KUMARI, Anju. Microbes-mediated sulphur cycling in soil: impact on soil fertility, crop production and environmental sustainability. **Microbiological Research**, [S.L.], v. 271, p. 127340, jun. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micres.2023.127340>.

CHAVAN, P. ; SHARMA, P. ; SHARMA, S.R. ; MITTAL, T.C. ; JAISWAL, A.K. Application of High-Intensity Ultrasound to Improve Food Processing Efficiency : A Review. **Foods**. 2022 Jan 4 ;11(1) :122. Doi : 10.3390/foods11010122. PMID : 35010248 ; PMCID : PMC8750622.

DANISH, Amar; MOSABERPANAH, Mohammad Ali; OZBAKKALOGLU, Togay; SALIM, Muhammad Usama; KHURSHID, Kiran; BAYRAM, Muhammed; AMRAN, Mugahed; FEDIUK, Roman; QADER, Diyar N.. A compendious review on the influence of e-waste aggregates on the properties of concrete. *Case Studies In Construction Materials*, [S.L.], v. 18, p. 01740, jul. 2023. Elsevier BV.

DEVI, Arti; BAJAR, Somvir; KOUR, Havleen; KOTHARI, Richa; PANT, Deepak; SINGH, Anita. Lignocellulosic Biomass Valorization for Bioethanol Production: a circular bioeconomy approach. *Bioenergy Research*, [S.L.], v. 15, n. 4, p. 1820-1841, 7 fev. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12155-022-10401-9>.

DORDEVIĆ, Dani; JANČÍKOVÁ, Simona; VÍTĚZOVÁ, Monika; KUSHKEVYCH, Ivan. Hydrogen sulfide toxicity in the gut environment: meta-analysis of sulfate-reducing and lactic acid bacteria in inflammatory processes. **Journal Of Advanced Research**, [S.L.], v. 27, p. 55-69, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2020.03.003>.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA, Departamento do Interior, Pesquisa Geológica. 2017 Minerals Year Book: gypsum [advance release]. Reston – Virgínia, 2017. 12p. Disponível em: <https://prd-wret.s3.us-west->

2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/- files/myb1-2017-gypsu.pdf. Acesso em: 21 ago. 2021

FALSAFI, S. R.; MAGHSOUDLOU, Y.; ROSTAMABADI, H.; ROSTAMABADI, M. M.; HAMED, H.; HOSSEINI, S. M. H. (2019). Preparation of physically modified oat starch with different sonication treatments. *Food Hydrocolloids*, 89, 311-320. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.046>.

FLORES, E.M.M. ; CRAVOTTO, G. ; BIZZI, C.A. ; SANTOS, D. ; IOP, G.D. Ultrasound-assisted biomass valorization to industrial interesting products : state-of-the-art, perspectives and challenges. **Ultrason Sonochem.** 2021 Apr ;72 :105455. Doi : 10.1016/j.ultsonch.2020.105455. Epub 2021 Jan 4. PMID : 33444940 ; PMCID : PMC7808943.

GILCA, Iulian Andrei; POPA, Valentin I.; CRESTINI, Claudia. Obtaining Lignina nanoparticles by sonication. **Ultrasonics Sonochemistry**, [S.L.], v. 23, p. 369-375, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.021>.

GNANASEKARAN, Lalitha; PRIYA, A.K.; THANIGAIVEL, S.; HOANG, Tuan K.A.; SOTO-MOSCOSO, Matias. The conversion of biomass to fuels via cutting-edge technologies: explorations from natural utilization systems. **Fuel**, [S.L.], v. 331, p. 125668, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125668>.

HE, Zhengbin; WANG, Zhenyu; ZHAO, Zijian; YI, Songlin; MU, Jun; WANG, Xiaoxu. Influence of ultrasound pretreatment on wood physiochemical structure. *Ultrasonics Sonochemistry*, [S.L.], v. 34, p. 136-141, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.05.035>.

JAISWAL, Lav Kumar; SINGH, Prabhakar; SINGH, Rakesh Kumar; NAYAK, Tanamyee; TRIPATHI, Yashoda Nandan; UPADHYAY, Ram Sanmukh; GUPTA, Ankush. Effects of Salt Stress on Nutrient Cycle and Uptake of Crop Plants. **Physiology Of Salt Stress In Plants**, [S.L.], p. 129-153, out. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/9781119700517.ch8>.

KARIMI, M. ; JENKINS, B. ; STROEVE, P. Ultrasound irradiation in the production of ethanol from biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 40, December 2014, Pages 400-421. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.151>

KAZAZ, Armin Eraghi; FATEHI, Pedram. Technical lignin and its potential modification routes: a mini-review. **Industrial Crops And Products**, [S.L.], v. 154, p. 112732, out. 2020. Elsevier BV.

KHADHRAOUI, B. ; UMMAT, V. ; KUMAR, B. ; TIWARI, B.K. ; FABIANO TIXIER, A.S. ; CHEMAT, F. Review of ultrasound combinations with hybrid and innovative techniques for extraction and processing of food and natural products. **Ultrasonics Sonochemistry**, 2021, 76, pp.105625. [10.1016/j.ultsonch.2021.105625](https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105625). fhal-03512908f

KIJANAPANICH, P., ANNACHATRE, A.P. ; LENS, P.N.L. 2014. "Biological sulfate reduction for treatment of gypsum contaminated soils, sediments, and solid wastes." *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 44 : 1037–1070.

KIM, Chae Hoon; LEE, Joo; TREASURE, Trevor; SKOTTY, Jennifer; FLOYD, Thomas; KELLEY, Stephen S.; PARK, Sunkyu. Alkaline extraction and characterization of residual hemicellulose in dissolving pulp. **Cellulose**, [S.L.], v.

26, n. 2, p. 1323-1333, 17 nov. 2018. **Springer Science and Business Media LLC**. <http://dx.doi.org/10.1007/s10570-018-2137-0>.

KOCH, Tobias; DAHL, Christiane. A novel bacterial sulfur oxidation pathway provides a new link between the cycles of organic and inorganic sulfur compounds. **The Isme Journal**, [S.L.], v. 12, n. 10, p. 2479-2491, 21 jun. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41396-018-0209-7>.

KOPER, Artur; PRAIAT, Karol; CIEMNICKA, Justyna; BUCZKOWSKA, Katarzyna. Influence of the Calcination Temperature of Synthetic Gypsum on the Particle Size Distribution and Setting Time of Modified Building Materials. **Energies**, [S.L.], v. 13, n. 21, p. 5759, 3 nov. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en13215759>

KOROBILCHUK, Igor; MEL'NICK, Viktorij; OSTAPENKO, Zhanna; RUZHINSKA, Ludmila. Study of heat and mass transfer processes during extraction of plant raw materials under the influence of ultrasound. **Ultrasonics Sonochemistry**, [S.L.], v. 98, p. 106512, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106512>.

KUSHKEVYCH, Ivan; HÝŽOVÁ, Blanka; VÍTĚZOVÁ, Monika; RITTMANN, Simon K.-M. R.. Microscopic Methods for Identification of Sulfate-Reducing Bacteria from Various Habitats. **International Journal Of Molecular Sciences**, [S.L.], v. 22, n. 8, p. 4007, 13 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms22084007>.

KUSHKEVYCH, Ivan; KOVÁČ, Jozef; VÍTĚZOVÁ, Monika; VÍTĚZ, Tomáš; BARTOŁ, Milan. The diversity of sulfate-reducing bacteria in the seven bioreactors. **Archives Of Microbiology**, [S.L.], v. 200, n. 6, p. 945-950, 2 abr. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00203-018-1510-6>.

KUTLU, N. ; PANDISELVAM, R. ; KAMILOGLU, A. ; SAKA, I. ; SRUTHI, NU. ; KOTHAKOTA, A. ; SOCOL, C.T. ; MAERESCU, C.M. Impact of ultrasonication applications on color profile of foods. *Ultrason Sonochem.* 2022 Sep ; 89 :106109. Doi : 10.1016/j.ultsonch.2022.106109. **Epub** 2022 Aug 1. PMID : 35939925 ; PMCID : PMC9364028.

JONES, Jason P. H. ; BAKER, Justin S. ; AUSTIN, Kemen ; LATTA, Greg ; WADE, Chrisopher M. ; CAI, Yongxia ; ARAMAYO-LIPA, Lindsay ; BEACH, Robert ; OHREL, Sara B. ; RAGNAUTH, Shaun. Online Appendix. *Journal Of Forest Economics*, [S.L.], v. 34, p. 205-231, 2019. Now Publishers. http://dx.doi.org/10.1561/112.00000449_app.

LAUTERI, C.; FERRI, G.; PICCININI, A.; PENNISI, L.; VERGARA, A. Ultrasound Technology as Inactivation Method for Foodborne Pathogens: A Review. **Foods** 2023, 12, 1212. <https://doi.org/10.3390/foods12061212>

LETELIER-GORDO, Carlos O.; AALTO, Sanni L.; SUURNÄKKI, Suvi; PEDERSEN, Per Bovbjerg. Increased sulfate availability in saline water promotes hydrogen sulfide production in fish organic waste. **Aquacultural Engineering**, [S.L.], v. 89, p. 102062, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102062>.

LI, Yue; CAI, Shuxiang; SHEN, Honglin; CHEN, Yibao; GE, Zhixing; YANG, Wenguang. Recent advances in acoustic microfluidics and its exemplary applications. *Biomicrofluidics*, [S.L.], v. 16, n. 3, p. 031502, maio 2022. AIP

Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/5.0089051>.

LIU, Y.; LIU, X.; CUI, Y.; YUAN, W. Ultrasound for microalgal cell disruption and product extraction: A review. **Ultrasonics Sonochemistry** Volume 87, June 2022, 106054. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106054>

LIU, Ying; LIU, Xin; CUI, Yan; YUAN, Wenqiao. Ultrasound for microalgal cell disruption and product extraction: a review. **Ultrasonics Sonochemistry**, [S.L.], v. 87, p. 106054, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106054>.

LU, Yuchan; HE, Qiao; FAN, Guozhi; CHENG, Qunpeng; SONG, Guangsen. Extraction and modification of hemicellulose from lignocellulosic biomass: a review. **Green Processing And Synthesis**, [S.L.], v. 10, n. 1, p. 779-804, 1 jan. 2021. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.1515/gps-2021-0065>.

MALAV, Lal Chand; YADAV, Krishna Kumar; GUPTA, Neha; KUMAR, Sandeep; SHARMA, Gulshan Kumar; KRISHNAN, Santhana; REZANIA, Shahabaldin; KAMYAB, Hesam; PHAM, Quoc Bao; YADAV, Shalini. A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: current practices, challenges, and future opportunities. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 277, p. 123227, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123227>.

MANKAR, Akshay R.; PANDEY, Ashish; MODAK, Arindam; PANT, K.K.. Pretreatment of lignocellulosic biomass: a review on recent advances. *Bioresource Technology*, [S.L.], v. 334, p. 125235, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235>.

MEHTA, Nitin; S, Jeyapriya.; KUMAR, Pavan; VERMA, Akhilesh Kumar; UMARAW, Pramila; KHATKAR, Sunil Kumar; KHATKAR, Anju Boora; PATHAK, Devendra; KAKA, Ubedullah; SAZILI, Awis Qurni. Ultrasound-Assisted Extraction and the Encapsulation of Bioactive Components for Food Applications. **Foods**, [S.L.], v. 11, n. 19, p. 2973, 23 set. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/foods11192973>.

MIKHAILOVA, N. ; SMIRNOV, I. ; VOLKOV, G. Modelling of pressure-temperature conditions for cavitation initiation in different liquids, **Vibroengineering PROCEDIA**, Vol. 27, pp. 121–125, Sep. 2019, <https://doi.org/10.21595/vp.2019.20983>

MIKHEENKO, Iryna P.; GOMEZ-BOLIVAR, Jaime; MERROUN, Mohamed L.; MACASKIE, Lynne E.; SHARMA, Surbhi; WALKER, Marc; HAND, Rachel A.; GRAIL, Barry M.; JOHNSON, David Barrie; OROZCO, Rafael L.. Upconversion of Cellulosic Waste Into a Potential “Drop in Fuel” via Novel Catalyst Generated Using *Desulfotomaculum desulfuricans* and a Consortium of Acidophilic Sulfidogens. **Frontiers In Microbiology**, [S.L.], v. 10, p. 1-20, 10 maio 2019. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2019.00970>.

MONDAL, J.; LAKKARAJU, R.; GHOSH, P.; ASHOKKUMAR, M. Acoustic cavitation-induced shear: a mini-review. **Biophys Rev**. 2021 Nov 23;13(6):1229-1243. doi: 10.1007/s12551-021-00896-5. PMID: 35059039; PMCID: PMC8724341.

OKOLIE, Jude A.; NANDA, Sonil; DALAI, Ajay K.; KOZINSKI, Janusz A.. Chemistry and Specialty Industrial Applications of Lignocellulosic Biomass. *Waste And Biomass Valorization*, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 2145-2169, 4 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-020-01123-0>.

ONG, Victor Zhenquan; WU, Ta Yeong. An application of ultrasonication in lignocellulosic biomass valorisation into bio-energy and bio-based products. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 132, p. 109924, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.109924>.

ONO, K. A Comprehensive Report on Ultrasonic Attenuation of Engineering Materials, Including Metals, Ceramics, Polymers, Fiber-Reinforced Composites, Wood, and Rocks. **Appl. Sci.** 2020, 10, 2230. <https://doi.org/10.3390/app10072230>

PASIN, T.M., de Almeida, P.Z., de Almeida Scarcella, A.S., da Conceição Infante, J., de Teixeira de Moraes Polizeli, M.d.L. (2020). Bioconversion of Agro-industrial Residues to Second-Generation Bioethanol. In: Nanda, S., N. Vo, DV., Sarangi, P. (eds) Biorefinery of Alternative Resources: Targeting Green Fuels and Platform Chemicals. **Springer**, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1804-1_2

PAVLENKO, A.M.; KOSHLAK, H. Application of Thermal and Cavitation Effects for Heat and Mass Transfer Process Intensification in Multicomponent Liquid Media. **Energies** 2021, 14, 7996. <https://doi.org/10.3390/en14237996>

RECIFE, LEI MUNICIPAL Nº 18.938, DE 17 DE JUNHO DE 2022.

REIS, JM dos; AGUIAR, ABS.; FREITAS, G.; VASSOLER, VC.; BARROS, GVL.; SANTOS, GE.; RAMIREZ, I.; RODRIGUEZ, RP Técnicas de remoção de metais de efluentes: uma revisão de literatura. *Investigação, Sociedade e Desenvolvimento*, [S. l.], v. 11, n. 2, pág. e5251126100, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i2.26100

RIBEIRO, Ruan S. A.; POHLMANN, Bruno C.; CALADO, Veronica; BOJORGE, Ninoska; PEREIRA, Nei. Production of nanocellulose by enzymatic hydrolysis: trends and challenges. **Engineering In Life Sciences**, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 279-291, 27 fev. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/elsc.201800158>.

SANTOS, A.J. dos; ARAÚJO, C.R. de A.; SILVA, F.L. da; ALEXANDRE, L.A.C. Impactos Causados pelos Resíduos Sólidos do Gesso no Polo Gesseiro de Trindade- PE. *Id on Line Revista Multidisciplinar e de Psicologia*, 2017, vol.11, n.37, p.143-159. ISSN: 1981-1179.

SANTOS, João Paulo de Oliveira; EL-DEIR, Soraya Giovanetti. PRODUÇÃO DE GESSO NO ARARIPE PERNAMBUCANO: impactos ambientais e perspectivas futuras. *Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica*, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 496, 6 dez. 2019. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2019.12.3.62953>.

SARAVANAN, A.; KUMAR, P. Senthil; JEEVANANTHAM, S.; KARISHMA, S.; VO, Dai-Viet N.. Recent advances and sustainable development of biofuels production from lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 344, p. 126203, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126203>.

SHARMA, V.; NARGOTRA, P.; BAJAJ, B.K. Ultrasound and surfactant assisted ionic liquid pretreatment of sugarcane bagasse for enhancing saccharification using enzymes from an ionic liquid tolerant *Aspergillus assiutensis* VS34. **Bioresour. Technol.** 2019, 285, 121319.

SHIMOSHIGE, Hirokazu; KOBAYASHI, Hideki; SHIMAMURA, Shigeru; MIZUKI, Toru; INOUE, Akira; MAEKAWA, Toru. Isolation and cultivation of a novel sulfate-

reducing magnetotactic bacterium belonging to the genus *Desulfovibrio*. **Plos One**, [S.L.], v. 16, n. 3, p. 0248313, 11 mar. 2021. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0248313>.

SHUKLA, A. ; KUMAR, D. ; GIRDHAR, M. ; GOYAL, A. ; MALIK, T. ; MOHAN, A.. Strategies of retreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: distinct and integrated approaches. **Biotechnol Biofuels** 16, 44 (2023). <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2>

SIDANA, Arushdeep; YADAV, Sudesh Kumar. Recent developments in lignocellulosic biomass pretreatment with a focus on eco-friendly, non-conventional methods. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 335, p. 130286, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130286>.

SILVA, Jéssica P.; TICONA, Alonso R. P.; HAMANN, Pedro R. V.; QUIRINO, Betania F.; NORONHA, Eliane F.. Deconstruction of Lignin: from enzymes to microorganisms. **Molecules**, [S.L.], v. 26, n. 8, p. 2299, 15 abr. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules26082299>.

SINDUSCON. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://sindusconsp.com.br/pib-da-construcaocresceu-69-em-2022-2/>. Acesso em 16 mai. 2023.

SINGHVI, Mamata S.; GOKHALE, Digambar V.. Lignocellulosic biomass: hurdles and challenges in its valorization. **Applied Microbiology And Biotechnology**, [S.L.], v. 103, n. 23-24, p. 9305-9320, 9 nov. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-019-10212-7>.

SMIRNOV, I.; MIKHAILOVA, N. An Analysis of Acoustic Cavitation Thresholds of Water Based on the Incubation Time Criterion Approach. **Fluids** 2021, 6, 134. <https://doi.org/10.3390/fluids6040134>

SOPHIA, M.; SAKTHIESWARAN, N.; GANESH, B.O. Gypsum as a Construction Material - A Review of Recent Developments. **IJRST –International Journal for Innovative Research in Science & Technology** | Volume 2 | Issue 12 | May 2016. ISSN (online): 2349-6010.

SUN, Run-Cang. Lignin Source and Structural Characterization. **Chemsuschem**, [S.L.], v. 13, n. 17, p. 4385-4393, 8 jul. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/cssc.202001324>.

SURYAWAN, I Wayan Koko; LEE, Chun-Hung. Citizens' willingness to pay for adaptive municipal solid waste management services in Jakarta, Indonesia. **Sustainable Cities And Society**, [S.L.], v. 97, p. 104765, out. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2023.104765>

TAKKELLAPATI, Sudhakar; LI, Tao; GONZALEZ, Michael A.. An overview of biorefinery-derived platform chemicals from a cellulose and hemicellulose biorefinery. **Clean Technologies And Environmental Policy**, [S.L.], v. 20, n. 7, p. 1615-1630, 4 jul. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10098-018-1568-5>

TANG, Kimberley; BASKARAN, Vikrama; NEMATI, Mehdi. Bacteria of the sulphur cycle: an overview of microbiology, biokinetics and their role in petroleum and mining industries. **Biochemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 44, n. 1, p. 73-94, abr. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2008.12.011>.

TARASOV, Dmitry; LEITCH, Mathew; FATEHI, Pedram. Lignin-carbohydrate complexes: properties, applications, analyses, and methods of extraction. *Biotechnology For Biofuels*, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 1-28, 29 set. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/s13068-018-1262-1>.

TAVARES, Graciane Sousa Cunha. Contribuição para a Sustentabilidade na Gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos nos municípios da Região Metropolitana do Recife (RMR). 2018. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018

TIAN, Huimei; GAO, Peike; CHEN, Zhaohui; LI, Yanshu; LI, Yan; WANG, Yansen; ZHOU, Jiefang; LI, Guoqiang; MA, Ting. Compositions and Abundances of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Microorganisms in Water-Flooded Petroleum Reservoirs with Different Temperatures in China. **Frontiers In Microbiology**, [S.L.], v. 08, p. 1-14, 2 fev. 2017. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2017.00143>.

TIAN, Huimei; GAO, Peike; CHEN, Zhaohui; LI, Yanshu; LI, Yan; WANG, Yansen; ZHOU, Jiefang; LI, Guoqiang; MA, Ting. Compositions and Abundances of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Microorganisms in Water-Flooded Petroleum Reservoirs with Different Temperatures in China. **Frontiers In Microbiology**, [S.L.], v. 08, p. 1-14, 2 fev. 2017. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2017.00143>.

TOCZYŃOWSKA-MAMIŃSKA, Renata. Limits and perspectives of pulp and paper industry wastewater treatment – A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 78, p. 764-772, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.021>.

USMAN, Muhammad; BALSALOBRE-LORENTE, Daniel. Environmental concern in the era of industrialization: can financial development, renewable energy and natural resources alleviate some load?. *Energy Policy*, [S.L.], v. 162, p. 112780, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112780>

WU, W.; LI, P.; HUANG, L.; WEI, Y.; LI, J.; ZHANG, L.; JIN, Y. The Role of Lignin Structure on Cellulase Adsorption and Enzymatic Hydrolysis. *Biomass* 2023, 3, 96-107. <https://doi.org/10.3390/biomass3010007>

WU, Bo; LIU, Feifei; FANG, Wenwen; YANG, Tony; CHEN, Guang-Hao; HE, Zhili; WANG, Shanquan. Microbial sulfur metabolism and environmental implications. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 778, p. 146085, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146085>.

WU, Wenjuan; LI, Penghui; HUANG, Lijing; WEI, Yumeng; LI, Jiaquan; ZHANG, Lu; JIN, Yongcan. The Role of Lignin Structure on Cellulase Adsorption and Enzymatic Hydrolysis. *Biomass*, [S.L.], v. 3, n. 1, p. 96-107, 1 mar. 2023. **MDPI AG**. <http://dx.doi.org/10.3390/biomass3010007>.

XU, F.; LI, Y. Biomass Digestion. **Encyclopedia Of Sustainable Technologies**, [S.L.], p. 197-204, 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.10108-3>.

XU, M.; JING, Z.; CHANTEL, J.; JIANG, P.; YU, T.; WANG, Y. (2018). Ultrasonic velocity of diopside liquid at high pressure and temperature: Constraints on velocity reduction in the upper mantle due to partial melts. **Journal of Geophysical**

Research: Solid Earth, 123, 8676–8690. <https://doi.org/10.1029/2018JB016187>

XU, Y.; ZHANG, J.; HE, J.; LIU, T.; GUO, X. Influences of Ultrasonic Treatments on the Structure and Antioxidant Properties of Sugar Beet Pectin. **Foods** 2023, 12, 1020. <https://doi.org/10.3390/foods12051020>

YU, X.; BAO, X.; ZHOU, C.; ZHANG, L.; YAGOUB, A.E.A.; YANG, H.; MA, H. Ultrasound-ionic liquid enhanced enzymatic and acid hydrolysis of biomass cellulose. **Ultrasonics Sonochemistry**, 41 (2018), pp. 410-418. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.09.003>

ZABOT, G.L.; VIGANO, J.; SILVA, E.K. Low-Frequency Ultrasound Coupled with High-Pressure Technologies: Impact of Hybridized Techniques on the Recovery of Phytochemical Compounds. **Molecules** 2021, 26, 5117. <https://doi.org/10.3390/molecules26175117>

ZHANG, Hongdan; DAI, Tao; HUANG, Shihang; XIE, Jun. Enhancement of Enzymatic Hydrolysis of Sugarcane Bagasse by the Combination of Delignification Pretreatment and Polysorbate 80. *Fermentation*, [S.L.], v. 9, n. 4, p. 371, 12 abr. 2023. **MDPI AG**. <http://dx.doi.org/10.3390/fermentation9040371>.

ZHANG, P. ; ZHU, Z. ; SUN, D.W. Using power ultrasound to accelerate food freezing processes: Effects on freezing efficiency and food microstructure, **Crit. Rev. Food Sci. Nutr.** 58 (2018) 2842–2853.

ZHANG, Yu; ZHEN, Yu; MI, Tiezhu; HE, Hui; YU, Zhigang. Molecular characterization of sulfate-reducing bacteria community in surface sediments from the adjacent area of Changjiang Estuary. **Journal Of Ocean University Of China**, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 107-116, 13 jan. 2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11802-016-2781-7>.

ZOCA, Samuel M.; PENN, Chad. An Important Tool With No Instruction Manual. *Advances In Agronomy*, [S.L.], v. 144, p. 1-44, 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/bs.agron.2017.03.001>

CAPÍTULO II

ARTIGO SUBMETIDO A REVISTA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS- A3

**USO DE RESÍDUOS DE PODA DE ÁRVORES COMO FONTE DE CARBONO NA
REDUÇÃO BIOLÓGICA DE SULFATO**

Paiva, G.M.S.; Benachour, M.; Santos, V.A.

Resumo Os resíduos de poda de árvores foram utilizados como fonte de carbono para redução biológica de sulfatos contidos em resíduos de gesso. Os resíduos de poda foram sonicados para disponibilizar as fontes de carbono presentes na biomassa lignocelulósica composta por lignina, hemicelulose e celulose, para as bactérias redutoras de sulfato (BRS) presentes no consórcio de microorganismos utilizado. Um delineamento experimental 2^3 , do tipo composto central rotacional (DCCR), envolveu como variáveis independentes o tempo de sonicação dos resíduos agroflorestais, a concentração inicial de sulfato e a razão $DQO/[SO_4^{=}]$. A redução percentual de sulfato foi a variável resposta. A função de desejabilidade foi aplicada aos resultados do DCCR e indicou como melhores condições para os experimentos: tempo de sonicação de resíduos de poda de árvore de 60 minutos, concentração inicial de sulfato de 2200 mg/L e razão $DQO/[SO_4^{=}]$ de 4, com uma eficiência de 85,9% de redução biológica do sulfato contido nos resíduos de gesso. O caráter de “técnica verde” da sonicação, associado ao aproveitamento de dois resíduos sólidos (resíduos de gesso e agroflorestais) amplia a sustentabilidade do processo proposto.

Palavras-chave: Biomassa lignocelulósica; Ultrasonicação; Resíduos de poda; Resíduos de gesso; Redução de sulfato.

1. INTRODUÇÃO

O sulfato é um dos ânions mais abundantes presentes no meio ambiente. Ocorre naturalmente em várias correntes de água na forma dissolvida ou como sais insolúveis, como barita (BaSO_4), epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), além de ser gerado pela oxidação de minérios sulfetados em drenagem ácida de minas (SATO et al., 2018). Também é descarregado em efluentes de várias indústrias, como mineração, pecuária, processamento de alimentos, efluentes de celulose e papel, indústrias de tintas e detergentes (BILAL; IMRANA; DARMAM, 2021).

A biorredução de sulfato é considerada um método eficiente, devido à menor manipulação de lodo, flexibilidade operacional e baixo custo de tratamento. É um processo impulsionado por microorganismos, no qual um grupo especializado de bactérias redutoras de sulfato (BRS) é responsável (GRGAS et al., 2023). As BRS representam um grupo diverso de anaeróbios obrigatórios que prosperam em ambientes anóxicos contendo matéria orgânica e sulfato.

O mecanismo básico na redução de sulfato ocorre pela utilização de fontes de carbono, como hidrogênio, etanol, metanol, glicose, lactato, cana-de-açúcar e resíduos agrícolas, como doadores de elétrons, e o sulfato comoceptor final de elétrons (OJO; DE SMIDT, 2023). No entanto, dependendo das condições do processo, muitos fatores, como pH, temperatura, relação DQO/ SO_4^{2-} e doador de elétrons, podem influenciar o resultado da competição de substratos bacterianos e redução de sulfato.

Com o descarte de resíduos agroflorestais, através da poda de árvores os materiais lignocelulósicos são especialmente atrativos nesse contexto, devido ao seu custo relativamente baixo e oferta abundante. Todavia, a principal dificuldade na bioconversão desse recurso importante é a recalcitrância da biomassa celulósica (WU et al., 2023). Os processos atuais de pré-tratamento, são principalmente catalisados quimicamente. A biomassa lignocelulósica quimicamente heterogênea é composta por componentes estruturais de alto peso molecular (celulose, polioses ou hemiceluloses e lignina), que são os principais componentes da parede celular, e por componentes não estruturais de baixo peso molecular (extrativos e compostos inorgânicos). A acessibilidade do substrato à celulase é um fator primordial que influencia a eficiência da degradação enzimática da celulose.

A eficiência do ultrassom no processamento de materiais vegetais já foi comprovada. Os benefícios conhecidos do ultrassom, como o inchaço das células vegetais e a fragmentação devido ao efeito cavitacional, associado ao

tratamento ultrassônico, atuam aumentando o rendimento e diminuindo o tempo de extração (BUCUR, 2023). O efeito do ultrassom na biomassa lignocelulósica tem sido utilizado para melhorar a extração de hemiceluloses, celulose, lignina ou para obter fibras celulósicas limpas a partir de papel usado. Entretanto, apenas algumas tentativas de melhorar a suscetibilidade dos materiais lignocelulósicos à biodegradação por meio do uso do ultrassom foram descritas. Foi constatado que o ultrassom tem um efeito benéfico nos processos de sacarificação (ZIAEI-RAD et al., 2023).

Martínez-Patiño et al. (2019) investigaram a utilização de biomassas residuais da poda de oliveiras e dos talos (engaços) das folhas de azeitona como fonte de compostos antioxidantes e potenciais biocombustíveis pela aplicação de análise de superfícies de resposta. Foram otimizados processos de extração utilizando ultrassom para obter compostos antioxidantes presentes em ambas as biomassas. As variáveis independentes avaliadas foram a razão etanol/água (0,2, 0,5 e 0,8), as porcentagens de amplitude de ultrassom (30, 50 e 70%) e tempo de ultrassonicação (5, 10 e 16 minutos). As condições ótimas para ambas as biomassas foram similares, com resultados mais elevados para os engaços. Ambas as biomassas mostraram potencial como fonte de antioxidantes naturais.

De acordo com a Resolução 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2011), o gesso estava classificado na Classe C - “resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação”, porém, após revisão por meio da Resolução 431/2011 do CONAMA, o gesso foi reclassificado na Classe B – de “resíduos recicláveis”, passando a ser considerado um resíduo reciclável.

A presente pesquisa avaliou o uso de resíduos de poda de árvores sonicada como fonte decarbono com objetivo de contribuir com uma etapa do processo de redução biológica de sulfatos presentes em resíduos de gesso utilizando a poda de árvore com fonte de carbono, unindo dois grandes passivos ambientais em busca de processos produtivos sustentáveis.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Preparo do Meio

O meio de Postgate modificado, no qual o lactato de sódio foi substituído pela celulose extraída da poda de árvore sonicada como fonte de carbono e doador de elétrons, continha (por litro) os seguintes componentes: ágar 2,0 g, KH₂PO₄ 0,5 g, NH₄Cl 1,0 g, Na₂SO₄ 1,0 g, CaCl₂ 1,0 g, MgCl₂·6H₂O 1,83 g,

extrato de levedura 1,0 g, ácido ascórbico 0,1 g, tioglicolato de sódio 0,013 g, citrato de sódio 6,38 g, 1,5 g de resíduo de poda de árvore sonicado, NaCl 3,5%, resazurina 2,0 mL 0,025% p/v e $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,5 g. Todos os componentes foram dissolvidos em água deionizada, a suspensão foi homogeneizada por agitação, o foi ajustado para 7,5 - 8,0 utilizando HCl ou NaOH. e posteriormente esterilizada a 121°C por 30 minutos. Esse meio favorece o crescimento de uma ampla variedade de BRS, estimulando a diversidade microbiana.

2.2 Inóculo

Um volume de 2 mL de cultura mista de bactérias redutoras de sulfato (BRS), isoladas de solos úmidos de minas do mineral Gipsita do Polo Gesseiro do Araripe contendo cerca de $2,0 \times 10^9$ MPN/mL, foi inoculado e enriquecido em meio de Postgate (POSTGATE, 1984) dentro de uma câmara anaeróbica a 38°C.

2.3 Sonicação dos Resíduos de Poda

Os resíduos de poda de árvore foram secos em estufa a 37°C durante 7 dias. Logo após, foi moído e tamisado em peneira de 32 mesh. Cada batelada de 10 g de resíduos pulverizados, era misturada com 100 mL de álcool etílico a 70%. O volume final da suspensão foi vertido em um Becker com capacidade de 250 mL e sonicado em um equipamento ultrassônico da marca Branson Sonifier 450, sob controle de temperatura (banho de gelo). As condições de operação utilizadas na sonicação foram de 20 kHz e 40W. A Figura 2 ilustra as condições operacionais de sonicação do resíduo de poda de árvore. A quantidade de poda sonicada adicionada ao meio de cultura, foi equivalente, em massa de carbono, a 1,75 mL de lactato, valor do teor dessa fonte convencional de carbono no referido meio de cultura.



Figura 2 – Preparação dos resíduos de poda para biodisponibilização de açúcares fermentáveis

2.4 Preparação do Gesso

Foram utilizados 500 g de resíduo, que foram submetidos a trituração e peneiração. A análise granulométrica do resíduo de gesso triturado foi conduzida por meio de um ensaio em peneiras, cuja fração separada para uso nos experimentos apresentou um diâmetro médio de partículas da ordem 0,5 mm, garantindo a uniformidade na distribuição do tamanho dessas partículas. A granulometria controlada desempenha um papel fundamental em diversas aplicações, pois é responsável pelo regime de reação envolvendo sólido e líquido, ou seja regime difusivo ou regime químico (GONG et al., 2022).

2.5 Arranjo experimental

A redução de sulfato foi investigada em 4 Erlenmeyer estéreis de 500 mL. Para os experimentos em cada frasco foi adicionada uma quantidade igual a 200 mL do meio previamente autoclavado e 2,0 mL de inóculo e o gesso; foram colocados dentro de cada frasco e, em seguida, dentro de uma câmara anaeróbia. Os frascos foram agitados mecanicamente de forma contínua a 120 rpm e a 38°C por 7 dias. Em intervalos de tempo específicos, um frasco era selecionado, e eram retiradas alíquotas para realização de análises químicas e biológicas.

2.6 Cultivo

A produção de metabólitos e o crescimento microbiano são fortemente afetados pela composição do meio, como fontes de carbono e nitrogênio e oligoelementos, além das condições de cultivo, como aeração e agitação, pH, tempo de incubação e temperatura, portanto, a otimização desses fatores é necessária para elevar a produção microbiana com custo menor custo.

O volume de 2 ml da cultura mista de microrganismos redutores de sulfato foram enriquecidos em meio Postgate e equilibrados com uma atmosfera anaeróbica em pH 7,2 e agitados a 120 rpm e a 38°C por 7 dias.

2.7 Quantificação do teor de sulfato

As concentrações de sulfato foram avaliadas pelo método turbidimétrico (KOLMERT; WIKSTRÖM, 2000). Esse método baseia-se na precipitação dos íons sulfato como sulfato de bário. As amostras analisadas para quantificação do teor de sulfato foram tratadas com um excesso de cristais de acetato de zinco di-hidratado para precipitar o sulfeto dissolvido como sulfeto de zinco.

No referido método que a fixação do sulfeto impede a oxidação para sulfato. Para a análise foram utilizados tubos de centrífuga de 1,5 mL, retirou-se do meio uma alíquota de 1,0 mL a qual foi adicionada aproximadamente 0,01 g de

acetato de zinco por agitação durante 5 seg. A mistura então foi centrifugada por 10 minutos a 6.000 rpm a 4°C. Em seguida, 50 µL do sobrenadante foi misturado com 950 µL do fluido de condicionamento em um novo tubo de microcentrífuga e agitado novamente por 5 s. Aproximadamente 0,01 g de cristais triturados de cloreto de bário di-hidratado foi adicionado à mistura, que foi novamente agitada por mais 15 s. Logo após, a absorvância relativa foi lida em 420 nm usando um espectrofotômetro UV/Visível. As calibrações padrões foram preparadas usando sulfato de sódio e água deionizada.

2.8 Análise Estatística dos Dados

Quatro amostras foram utilizadas para cada teste experimental, e os resultados foram apresentados como valores médios. Além disso, tanto a incerteza da média de um determinado parâmetro quanto sua propagação foram correlacionadas. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e o teste de Tukey foi realizado para identificar diferenças significativas entre os valores médios (ALI; BHASKAR, 2016). Foi aplicado um delineamento composto central rotacional (CCRD) (KHIDHIR; HAMADI, 2018) para identificar as condições operacionais definidora das contribuições de cada um dos três parâmetros de controle.

2.9 Planejamento Experimental

A metodologia de superfície de resposta (MSR) foi utilizada para analisar os efeitos e interações das variáveis independentes nas taxas de conversão e remoção de sulfato. Além disso, foi utilizada para determinar as condições mais adequadas para usar a poda de árvores sonicadas como única fonte de carbono. O design experimental e a análise foram realizados utilizando o software STATISTICA de StatSoft®, Versão 12. A análise estatística do modelo foi realizada para avaliar a análise de variância e medir a validade de ajuste de um modelo de previsão. O referido modelo estatístico gerado foi validado por meio da realização de experimentos nas condições mais adequadas determinadas. A Tabela 1 apresenta as variáveis independentes e os níveis codificados. Com o início da operação em bateladas, após a inoculação, o pH diminuiu e se manteve principalmente entre 6 e 7. Um delineamento central composto rotacional (DCCR) foi aplicado às três variáveis independentes: Tempo de sonicação dos resíduos agroflorestais em minutos (X_1); Concentração inicial do sulfato em mg/L (X_2) e; Razão DQO/[SO₄=] (X_3). Para uso de BRSs a literatura recomenda faixa de temperatura de 20 até 35°C (MOOSA; NEMATİ; HARRISON, 2002); Razão DQO/[SO₄=] de até 6,7 (SIPMA

et al., 1999) e; concentração inicial de gipsita em tono de 2200 mg/L (LEBEDEV; KOSORUKOV, 2017).

Tabela 1 - Valores reais e codificados dos fatores para a aplicação do delineamento compostocentral rotacional (DCCR) à conversão biológica de sulfato contido em resíduos de gesso utilizando resíduos de poda de árvores como fonte de carbono

Variável indepen.	-1,68	-1	0	+1	+1,68
Tempo de sonicação (X ₁), min	43,2	50,0	60,0	70,0	76,8
Concentração Inicial de sulfato (X ₂), mg/L	1863	2000	2200	2400	2536
Razão DQO/[SO ₄ =] (X ₃), -	2,3	3,0	4,0	5,0	5,7

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Redução Percentual de Sulfato

A Tabela 2 lista a matriz de planejamento com os resultados dos experimentos realizados, devido à aplicação de um DCCR, tendo como variável dependente a redução biológica percentual de sulfato (Y). Foram registradas e analisadas as correlações existentes entre essa variável resposta e as variáveis independentes do processo. Variações individuais e axiais dos fatores demonstram numericamente que um aumento das três variáveis levou a um aumento da redução percentual de sulfato pelas BRSs. No ponto central identificou-se um valor máximo para a variável resposta, caracterizando uma possível região de formação de pico para a superfície de resposta conforme Rasheed e colaboradores (2023).

A aplicação da ANOVA foi necessária para testar a significância e adequação do modelo previsto pela técnica estatística de metodologia de superfície de resposta – MSR (CHEN et al., 2022). As médias dos quadrados são obtidas dividindo a soma dos quadrados de cada uma das duas fontes de variação, o modelo e a variância do erro, pelos respectivos graus de liberdade.

Tabela 2 - Matriz de planejamento com respostas à aplicação do DCCR à redução percentual de sulfato (Y) contido em resíduos de gesso utilizando resíduos de poda de árvores como fonte de carbono.

Ensaio	*X ₁	*X ₂	*X ₃	Y (%)
1	-1,000	-1,000	-1,000	73,01
2	-1,000	-1,000	1,000	76,23
3	-1,000	1,000	-1,000	77,25
4	-1,000	1,000	1,000	78,97
5	1,000	-1,000	-1,000	80,01
6	1,000	-1,000	1,000	80,54
7	1,000	1,000	-1,000	80,77
8	1,000	1,000	1,000	77,99
9	-1,682	0,000	0,000	70,01
10	1,682	0,000	0,000	76,11

11	0,000	-1,682	0,000	76,05
12	0,000	1,682	0,000	80,07
13	0,000	0,000	-1,682	76,96
14	0,000	0,000	1,682	80,08
15	0,000	0,000	0,000	84,97
16	0,000	0,000	0,000	85,29
17	0,000	0,000	0,000	84,21
18	0,000	0,000	0,000	85,89

(X₁) - Tempo de sonicação, min; (X₂) Concentração Inicial de sulfato, mg/L; (X₃) Razão DQO/[SO₄²⁻]

A razão de variância de Fisher (F), que é uma medida estatisticamente válida de quão bem os fatores descrevem a variação nos dados em torno de sua média, pode ser calculado a partir da ANOVA; dividindo-se a média dos quadrados devido à variação do modelo pela média dos quadrados em função da variação do erro. No caso dos resultados obtidos neste trabalho a Tabela de ANOVA mostrada a seguir (Tabela 3), permite interpretar a validade dos resultados obtidos experimentalmente. Além disso, a adequação do modelo deve também ser verificada pelo coeficiente de determinação (R²), ou variância explicada. Quando expresso como porcentagem, o R² é interpretado como a variabilidade percentual na resposta explicada pelo modelo estatístico. Neste caso obteve-se R² igual a 0,9426, o que significa que o modelo de previsão obtido com a aplicação deste DCCR explica 94,26% da variabilidade do fenômeno estudado (ALMAN-ABAD; PIRKHARRATI; ASADZADEH, 2020), neste caso a redução percentual de sulfato contido em resíduos de gesso, tendo como fonte de carbono resíduo agroflorestal sonicado.

Tabela 3 – Resultados da análise de variância (ANOVA) aplicada aos dados de eficiência percentual de remoção biológica de sulfato contido em resíduos de gesso utilizando resíduos de poda de árvores como fonte de carbono (R² = 94,26%; R = 0,8780)

Fator	Soma Quadrática (SS)	Graus de Liberdade (df)	Média Quadrática (MS)	Constante de Fisher (F)	Valor de p
(1)X1 (L)	42,5604	1	42,5604	86,9289	0,002612
X1 (Q)	183,1852	1	183,1852	374,1528	0,000302
(2)X2 (L)	10,4579	1	10,4579	21,3601	0,019069
X2 (Q)	52,5250	1	52,5250	107,2814	0,001920
(3)X3 (L)	4,6130	1	4,6130	9,4220	0,054583
X3 (Q)	44,4755	1	44,4755	90,8404	0,002450
1L by 2L	9,6141	1	9,6141	19,6367	0,021354
1L by 3L	6,4620	1	6,4620	13,1986	0,035918
2L by 3L	2,8920	1	2,8920	5,9069	0,093296
Lack of Fit	16,2227	5	3,2445	6,6269	0,075244
Pure Error	1,4688	3	0,4896		
Total SS	308,0072	17			

Variáveis independentes: X₁ – Tempo de sonicação, min; X₂ – Concentração inicial de

sulfato, mg/L; X_3 – Razão DQO/[SO₄⁼], -; L – Termo linear; Q – Termo quadrático.

Os termos lineares e quadráticos dos fatores apresentaram-se com importância estatística, à exceção do termo da razão DQO/[SO₄⁼] em sua forma linear. Contudo, o valor de p para o referido termo é muito próximo de 0,05 (0,054), o que permitiu a aprovação desse termo para compor o modelo quadrático de previsão. No caso das interações entre os três fatores, apenas a interação entre a concentração inicial de sulfato e a razão DQO/[SO₄⁼] não se apresentou estatisticamente significativa. Além disso, o modelo não apresentou falta de ajuste e o erro experimental foi de apenas de 2,8%, estatisticamente aceitável até um valor máximo de 10%, conforme recomendado por Calado e Montgomery (2003).

Como forma de ilustrar e dispor em ordem decrescente os efeitos principais e interações entre as variáveis independentes, ou fatores, apresenta-se o diagrama de Pareto (De LEON; GRIMA; TORT-MARTORELL, 2006) responsável por uma demonstração gráfica dessa ordem de significância estatística (Figura 3). Além dessa ordem de significância observa-se que apenas a interação entre X₂ e X₃ não é significativa. Dessa forma, o modelo matemático de regressão para a redução biológica de sulfato por BRS, ajustado aos fatores codificados, é dado a seguir (Equação 1):

$$Y (\%) = 84,99 + 1,77 \cdot X_1 - 3,81 \cdot X_1^2 + 0,87 \cdot X_2 - 2,81 \cdot X_2^2 + 0,58 \cdot X_3 - 1,87 \cdot X_3^2 - 1,10 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,90 \cdot X_1 \cdot X_3 \quad (1)$$

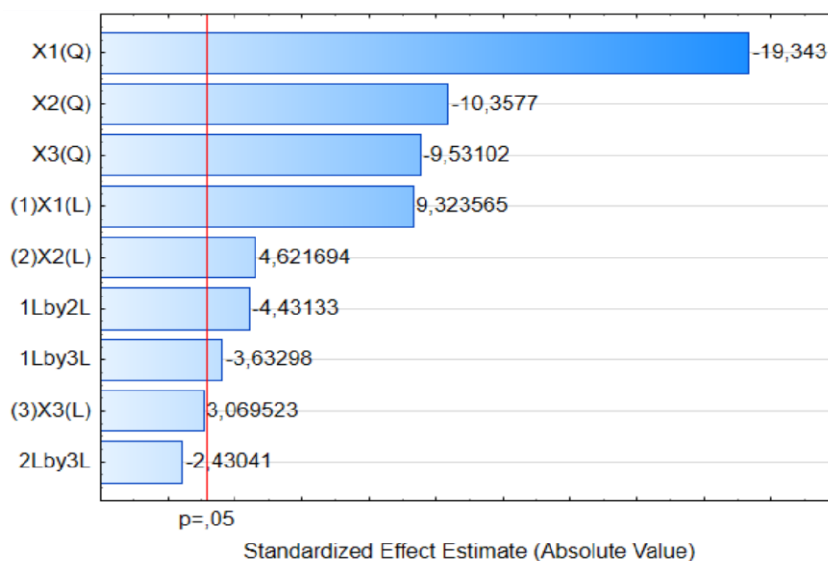


Figura 3 – Diagrama de Pareto aplicado à redução biológica de sulfato contido em resíduos de gesso utilizando resíduos de poda de árvores utilizados como fonte de carbono. Variáveis codificadas: Tempo de sonicação dos resíduos agroflorestais (X₁), min ; Concentração Inicial de sulfato (X₂), mg/L; Razão DQO/[SO₄²⁻] (X₃).

Na Figura 4, observa-se uma superfície de resposta positiva em relação as variáveis X_1 (Tempo de sonicação dos resíduos agroflorestais) e X_2 (Concentração inicial de sulfato). O tempo de sonicação de 60 minutos corrobora resultados obtidos por Hilman e colaboradores (2021) que constataram melhores extrações por cerca de 60 minutos, uma vez que as para esses tempos as ondas ultrassônicas desestabilizam as paredes celulares. Por outro lado, em um período muito grande, o rendimento da extração se tornará constante ou diminuirá, à medida que atinge o estado de equilíbrio. Nesta fase, o solvente será reabsorvido pelas partículas de tecido rompidas, diminuindo o rendimento. Observa-se ainda na projeção da superfície de resposta, no quase paralelismo das curvas de nível sobre plano horizontal da Figura 4 uma fraca interação entre as variáveis X_1 e X_2 .

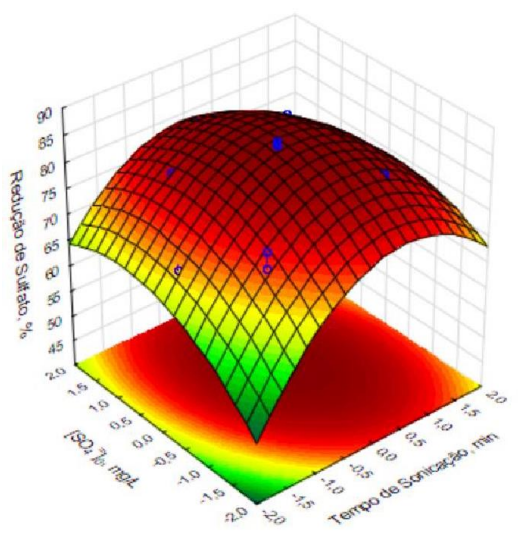


Figura 4 – Redução percentual de sulfato em função das variáveis independentes: Tempo de sonicação (X_1) e Concentração inicial de sulfato (X_2)

A Figura 5 ilustra os efeitos do tempo de sonicação (X_1) e a razão Razão DQO/[$\text{SO}_4^{=}$] (X_3). A relação DQO/[$\text{SO}_4^{=}$], em algumas situações, tem sido considerada um fator-chave na regulação da redução biológica de sulfato, pois determina a competição entre as BRSs e as bactérias metanogênicas (BM) por compostos monoméricos (por exemplo, açúcares, aminoácidos) e por H_2 ou acetato (SARTI et al., 2009). Contudo, as BMs nem sempre são encontradas em consórcios de bactérias redutoras de sulfato. As BRSs e BMs são dois grupos distintos de microorganismos anaeróbicos que desempenham papéis diferentes na degradação da matéria orgânica em ambientes anaeróbicos. Embora esses dois grupos de bactérias possam coexistir em alguns ambientes

anaeróbicos, não é necessário que eles estejam sempre presentes juntos em consórcios. A presença de ambos os grupos dependerá das condições específicas do ambiente, incluindo a disponibilidade de sulfato e a natureza da matéria orgânica presente. Em algumas situações, pode haver competição entre SRB e bactérias metanogênicas pelos substratos disponíveis, o que pode afetar a predominância de um grupo sobre o outro. Contudo, um ambiente controlado, inoculado com um consócio de BRS coletado em minas de gipsita, fonte de carbono sonicada e meio de cultura modificado, apresentou uma melhor performance de redução biológica para DQO/[SO₄⁼] da ordem de 4. Nesta Figura 5 também se observa uma fraca interação entre as variáveis independentes X₁ e X₃, assim como ocorreu com X₁ e X₂, conforme estudos realizados por Najib et al. (2017).

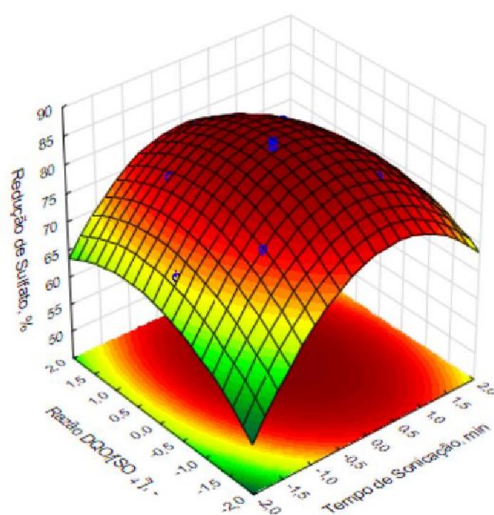


Figura 5: Tempo de sonicação (X₁) versus Razão DQO/[SO₄⁼] (X₃)

A Figura 6 destaca os efeitos promovidos pelas variáveis concentração inicial de sulfato (X₂) e Razão DQO/[SO₄²⁻] (X₃). A taxa de redução biológica de sulfato por BRS depende da concentração de sulfato disponível. Ou seja, quanto maior a concentração inicial de sulfato inorgânico, geralmente mais rápido ocorrerá o processo de redução, desde que todos os outros fatores sejam adequados (como pH, temperatura e nutrientes). Contudo, em concentrações elevadas de sulfato, pode ocorrer um efeito inibitório sobre as BRS, prejudicando o desempenho das bactérias, diminuindo sua atividade metabólica e reduzindo a eficiência da redução de sulfato. A relação entre a DQO (Demanda Química de Oxigênio) e a concentração de íons sulfato é importante porque reflete a relação entre a quantidade de matéria orgânica

disponível (representada pela DQO) e a quantidade de sulfato presente. Uma relação adequada pode ser necessária para um desempenho eficiente da redução de sulfato, pois as bactérias utilizam a matéria orgânica como fonte de carbono e energia durante o processo de redução. Como demonstrado no gráfico da Figura 6, com o aumento dos valores de ambos os efeitos, concentração inicial de sulfato e razão DQO/[SO₄⁼], prevaleceu o efeito inibitório da elevação da concentração de sulfato perante a razão DQO/[SO₄⁼]. Portanto, para melhorar a redução biológica de sulfato por BRS, é importante considerar a concentração inicial de sulfato inorgânico, garantindo que ela esteja em um intervalo adequado para promover uma redução eficaz, ao mesmo tempo em que se mantém uma relação adequada entre DQO e sulfato. Esses parâmetros podem variar dependendo das condições específicas do sistema e das características das BRS envolvidas no processo. Najib e colaboradores (2017) também utilizou a metodologia de superfície de resposta para investigar o efeito da fonte de carbono no crescimento e remoção de sulfato. Todos os parâmetros foram selecionados em três níveis. Algumas condições ótimas da redução biológica de sulfato foram próximas aos valores obtidos por este trabalho, como por exemplo um pH de 7,19 (7,2 neste trabalho) e concentração inicial de sulfato de 2153,15 mg/L (2200 mg/L neste trabalho). A relação DQO (Demanda Química de Oxigênio) para concentração inicial de sulfato (DQO/SO₄⁼) foi da ordem de 2,72 (4 neste trabalho), resultando em uma remoção de sulfato de 98% (85,9% neste trabalho). Contudo, deve-se salientar, quanto à uma menor conversão neste trabalho, que o biorreator utilizado por Najib e colaboradores foi do tipo UASB, o qual por ser contínuo permite a retirada do H₂S do meio, com conseqüente redução do efeito inibitório desse componente gasoso (BRAHMACHARIMAYUM, B.; MOHANTY, M.P.; GHOSH, 2019).

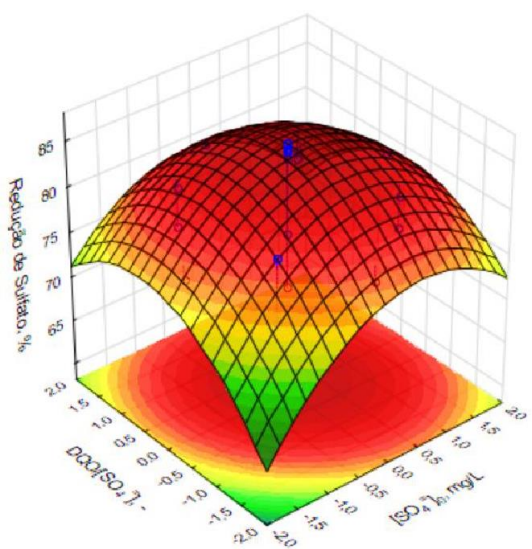


Figura 6: Concentração inicial de sulfato (X_2) versus Razão DQO/[SO_4^-] (X_3)

A função de desirability, ou de desejabilidade, é uma ferramenta utilizada para escolher um ponto ótimo global em um conjunto de pontos ótimos locais (CANDIOTI et al., 2014). Ela ajuda a avaliar e comparar diferentes soluções com base em múltiplos critérios de desejabilidade.

O software Statistica utilizado neste trabalho permitiu a aplicação da ferramenta “Desirability” e a Figura 7 é o resultado gráfico para a redução biológica percentual do sulfato em função das três variáveis independentes do DCCR aplicado. Um ponto de máximo global, ou de desejabilidade é indicado pela referida figura. Dessa forma, a condição de desejabilidade encontrada para as diferentes condições locais de otimização local, obtidas pelo DCCR foi: Tempo de sonicação dos resíduos de poda (X_1) de 60 minutos; - Concentração inicial do sulfato (X_2), de 2200 mg/L; - Razão DQO/[SO_4^-] (X_3), de 4, coincidindo com valores de otimalidades locais.

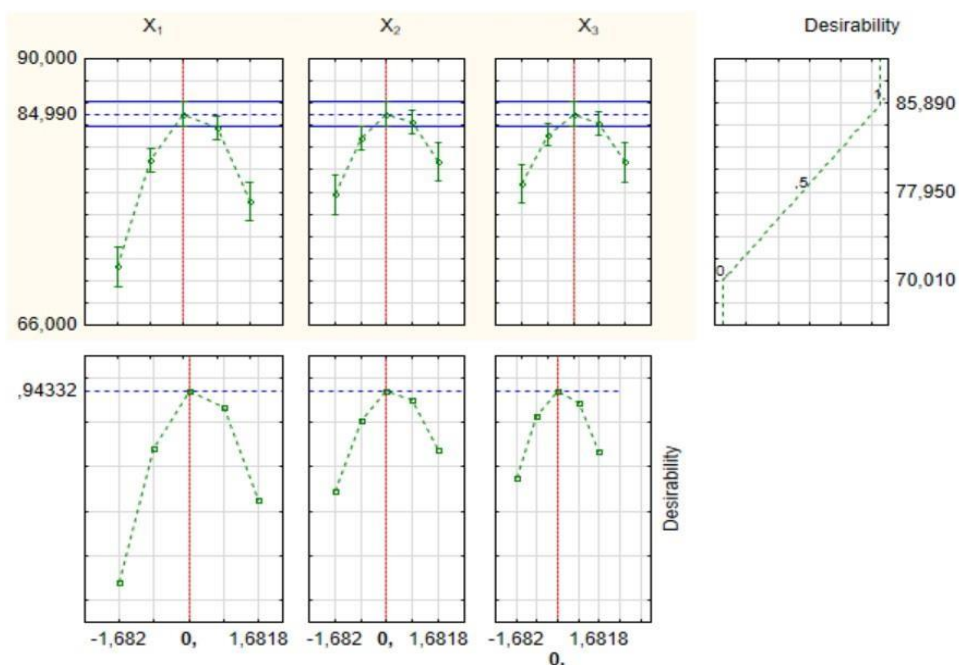


Figura 7 – Determinação gráfica da condição de desejabilidade para a redução biológica desulfato contido em resíduos de gesso e utilizando poda de árvores como fonte de carbono
 Tempo de sonicação (X_1), min; Concentração Inicial de sulfato (X_2), mg/L; Razão DQO/[SO_4^-] (X_3).

4. CONCLUSÃO

Neste estudo, desenvolvemos com sucesso um processo de redução biológica de sulfato em resíduos de gesso, fazendo uso de resíduos de poda de árvores como uma valiosa fonte de carbono. A utilização desses resíduos não apenas se mostrou eficaz na redução de sulfato, mas também trouxe consigo uma série de benefícios ambientais e sociais, incluindo a promoção da sustentabilidade, o estímulo à economia local, a gestão responsável de resíduos e a conservação de florestas.

As condições operacionais ideais foram determinadas por meio de um delineamento composto central rotacional (DCCR), considerando variáveis como o tempo de sonicação dos resíduos de poda, a concentração inicial de sulfato e a razão DQO/[SO₄⁼]. Com a ajuda de um consórcio de bactérias redutoras de sulfato (BRS), alcançamos uma impressionante eficiência na redução de sulfato, atingindo cerca de 85,9%. Além disso, demonstrou-se a validade do modelo de previsão, realizando experimentos de acordo com as condições previstas, o que confirma a robustez do processo. Utilizando a função de desejabilidade, selecionou-se um ponto que atendesse a múltiplos critérios de desejabilidade, garantindo uma abordagem holística para a escolha das melhores condições.

Este estudo não apenas representa um avanço na redução sustentável de sulfato, mas também ilustra como resíduos anteriormente considerados passivos ambientais, como os de poda de árvores e de gesso, podem ser transformados em recursos valiosos. Ao incorporar essas práticas ambientalmente conscientes, abre-se caminho para uma importante etapa no processo de recuperação de enxofre, contribuindo para um ambiente mais limpo e sustentável.

REFERÊNCIAS

- ALI, Z.; BHASKAR, S.B. Basic statistical tools in research and data analysis. *Indian J. Anaesth.* 2016, 60, 662–669. DOI: 10.4103/0019-5049.190623
- ALMAN-ABAD, Z.S. ; PIRKHARRATI, H. ; ASADZADEH, F. (2020) Application of response surface methodology for optimization of zinc elimination from a polluted soil using tartaric acid. *Adsorp Sci Tech* 38(3–4):79–93
- ARSLAN, F.; GÜVEN, Z.B.; ARSLAN, U.Y. et al. Solvent extraction of nickel from iron and cobalt containing sulfate solutions. *Material Sci & Eng.* 2023;7(1):1-5. DOI: 10.15406/mseij. 2023.07.00195

BARTON, Larry L.; DUARTE, Americo G.; STAICU, Lucian C.. Genomic insight into iron acquisition by sulfate-reducing bacteria in microaerophilic environments. *Biometals*, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 339-350, 29 jun. 2022. **Springer Science and Business Media LLC**. <http://dx.doi.org/10.1007/s10534-022-00410-8>.

BARI, S.; CHATTERJEE, A.; MISHRA, S. (2016). Ultrasonication assisted and surfactant mediated synergistic approach for synthesis of calcium sulfate nano-dendrites. **Ultrasonics Sonochemistry**, 31, 39–50. doi:10.1016/j.ultsonch.2015.11.024 10.1016/j.ultsonch.2015.11.024

BERNARDEZ, L.A.; DE ANDRADE LIMA, L.R.P.; DE JESUS, E.B.; RAMOS, C.L.S.; ALMEIDA, P.F. A kinetic study on bacterial sulfate reduction. **Bioprocess Biosyst Eng** (2013) 36:1861–1869 DOI 10.1007/s00449-013-0960-0

BILAL, U.; IMRANA, I.; DARMAM, S. (2021). Gravimetric Determination of Sulphate in Some Selected Industrial Effluents. **FUDMA JOURNAL OF SCIENCES**, 4(4), 290 - 294. <https://doi.org/10.33003/fjs-2020-0404-484>

BRAHMACHARIMAYUM, B.; MOHANTY, M.P.; GHOSH P.K. (2019), Theoretical and practical aspects of biological sulfate reduction: a review, **Global NEST Journal**, 21(2), 222-244.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares [recurso eletrônico] / coordenação de André Luiz Felisberto França... [et. al.]. – Brasília, DF: MMA, 2022.

BUCUR, M.-P.; RADULESCU, M.-C.; RADU, G.L.; BUCUR, B. Cavitation-Effect-Based Treatments and Extractions for Superior Fruit and Milk Valorisation. **Molecules** 2023, 28, 4677. <https://doi.org/10.3390/molecules28124677>

CALADO, V.; MONTGOMERY, D.C. **Planejamento de Experimentos Usando o Statistica**. Rio de Janeiro: E-papers, 2003.

CETECIOGLU, Z., DOLFING, J., TAYLOR, J., PURDY, KJ, & EYICED, Ö. (2019). The COD/sulfate ratio does not affect methane yield and microbial diversity in anaerobic digesters. **Water Research**. doi:10.1016/j.waters.2019.02.038

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 431, de 25 de maio de 2011. Altera o art. 3º da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso. Diário Oficial da União, Brasília, DF.

CANDIOTI, L.V.; DE ZAN, M.M.; CAMARA, M.S.; GOICOECHEA, H.C. Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development. **Talanta** 124(2014) 123–138. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.01.034>

DAVIES, L.A.; DARGUE, A.; DEAN, J.R.; DEARY, M.E. Use of 24 kHz ultrasound to improve sulfate precipitation from wastewater, *Ultrason. Sonochem.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.08.017>

De LEON, G.; GRIMA, P.; TORT-MARTORELL, X. Selecting Significant Effects in Factorial Designs Taking Type II Errors into Account. **Quality and Reliability Engineering International** 2006; 22(7):803-810. DOI: 10.1002/qre.729.

DIAO, Chengyu; YE, Weizhuo; YAN, Jia; HAO, Tianwei; HUANG, Lei; CHEN, Yongheng; LONG, Jianyou; XIAO, Tangfu; ZHANG, Hongguo. Application of microbial sulfate- reduction process for sulfate-laden wastewater treatment: a review. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 52, p. 103537, abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103537>.

DING, He; CHANG, Jinhu; HE, Fei; GAI, Shili; YANG, Piaoping. Hydrogen Sulfide: an emerging precision strategy for gas therapy. *Advanced Healthcare Materials*, [S.L.], v. 11, n. 4, p. 2101984, 27 nov. 2021. **Wiley**. <http://dx.doi.org/10.1002/adhm.202101984>.

DONG, Y.; WANG, J.; GAO, Z.; DI, J.; WANG, D.; GUO, X.; HU, Z.; GAO, X.; WANG, Y. Study on Growth Influencing Factors and Desulfurization Performance of *Sulfate Reducing Bacteria* Based on the Response Surface Methodology. **ACS Omega**. 2023 Jan 20;8(4):4046-4059. doi: 10.1021/acsomega.2c06931. PMID: 36743035; PMCID: PMC9893483.

EL-MALEK, Fady Abd; ROFEAL, Marian; ZABED, Hossain M.; NIZAMI, Abdul-Sattar; REHAN, Mohammad; QI, Xianghui. Microorganism-mediated algal biomass processing for clean products manufacturing: current status, challenges and future outlook. **Fuel**, [S.L.], v. 311, p. 122612, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122612>.

GRGAS, D.; RUKAVINA, M.; BESLO, D.; ŠTEFANAC, T.; CRNEK, V.; ŠIKIĆ, T.; HABUDA-STANIĆ, M.; LANDEKA DRAGIĆEVIĆ, T. The Bacterial Degradation of Lignin—A Review. **Water** 2023, 15, 1272. <https://doi.org/10.3390/w15071272>

GONG, Xuzhong; ZHANG, Tong; ZHANG, Junqiang; WANG, Zhi; LIU, Junhao; CAO, Jianwei; WANG, Chuan. Recycling and utilization of calcium carbide slag - current status and new opportunities. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], v. 159, p. 112133, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2022.112133>.

GUEDRI, Abdessalam; YAHYA, Kawthar; HAMDY, Noureddine; BAEZA-URREA, Oscar; WAGNER, Jean-Frank; ZAGRARNI, Mohamed Faouzi. Properties Evaluation of Composite Materials Based on Gypsum Plaster and *Posidonia Oceanica* Fibers. **Buildings**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 177, 9 jan. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/buildings13010177>.

HAN, Sirui; LI, Yingxi; GAO, Haichun. Generation and Physiology of Hydrogen Sulfide and Reactive Sulfur Species in Bacteria. *Antioxidants*, [S.L.], v. 11, n. 12, p. 2487, 17 dez. 2022. **MDPI AG**. <http://dx.doi.org/10.3390/antiox11122487>.

HE, Zhengbin; WANG, Zhenyu; ZHAO, Zijian; YI, Songlin; MU, Jun; WANG, Xiaoxu. Influence of ultrasound pretreatment on wood physiochemical structure. **Ultrasonics Sonochemistry**, [S.L.], v. 34, p. 136-141, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.05.035>.

HILMAN, A.; SUHAIDI, I.; AZHARI, K.K.; BHANDARI, B.; SANTOSO, U.; ARDIANSYAH, J.E.; YUSRINI, E.; ROMAULI, N.D.M.; HILMAN, A.; SINAMO, K.N.; SYAHPUTRA HARAHAP, E.; ADDINA, S. Effect of temperature and time treatment of Ultrasound-assisted extraction on the properties of bengkoang water-soluble polysaccharides. **E3S Web Conf.** 2021; 332:08004.

KHIDHIR, A.G.; HAMADI, A.S. Central composite design method for the preparation, stability and properties of water-in-diesel nano emulsions. **Adv. Chem. Eng. Sci.** 2018,8, 176–189. DOI: 10.4236/aces.2018.83012

KHANNA, N.; DAS, D. Biohydrogen production by dark fermentation. **WIRES – Energy and Environmental.** Volume 2, Issue 4, July/August 2013, Pages 401-421

KIJANAPANICH, P.; ANNACHHATRE, A.P.; LENS, P.N.L. ChemInform Abstract: Biological Sulfate Reduction for Treatment of Gypsum Contaminated Soils, Sediments, and Solid Wastes. **Environmental Science and Technology**, may 2014, 44(10) DOI: 10.1080/10643389.2012.743270

KIKOT, P.; VIERA, M.; MIGNONE, C.; DONATI, E. Study of the effect of pH and dissolved heavy metals on the growth of sulfate-reducing bacteria by a fractional factorial design. **Hydrometallurgy** 2010, 104, 494–500. DOI: 10.1016/j.hydromet.2010.02.026

KOUSHI, P.; REMOUNDAKI, E.; HATZIKIOSEYAN, A.; TSEZOS, M. Sulphate-reducing bioreactors: current practices and perspectives. In: Conference Proceedings of The Hellenic Water Association. May 10-12 2015.

KUSHKEVYCH, I.; KOVÁŘOVÁ, A.; DORDEVIC, D.; GAINE, J.; KOLLAR, P.; VÍTEZOVÁ, M.; RITTMANN, S.K.-M.R. Distribution of Sulfate-Reducing Bacteria in the Environment: Cryopreservation Techniques and Their Potential Storage Application. **Processes** 2021, 9, 1843. <https://doi.org/10.3390/pr9101843>

KOLMERT, A.; WIKSTRÖM P, Hallberg KB (2000) A fast and simple turbidimetric method for the determination of sulfate in sulfatereducing bacterial cultures. **J Microbiol Methods** 41:179–184. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(00\)00154-8](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(00)00154-8)

LEBEDEV, A.L.; KOSORUKOV, V.L. (2017) Gypsum Solubility in Water at 25°C. **Geochemistry International**, Vol. 55, No. 2, pp. 205–210.

LI, J., CAI, M.-H., MIAO, Y., LUO, G., LI, W.-T., LI, Y., & LI, A.-M. (2019). Bacterial community structure and predicted function in an acidogenic sulfate reducing reactor: Effect of organic carbon to sulfate ratios. **Bioresource Technology**, 293, 122020. doi:10.1016/j.biortech.2019.1220

LIN, Bobo; WANG, Shasha; ZHOU, Anqi; HU, Qiurui; HUANG, Gangliang. Ultrasound-assisted enzyme extraction and properties of Shatian pomelo peel polysaccharide. *Ultrasonics Sonochemistry*, [S.L.], v. 98, p. 106507, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106507>.

MADIGAN, M.T.; MARTINKO, J.M.; PARKER, J. (1997) Brock Biology of Microorganisms. 8th Edition, Prentice Hall International, Inc., New York.

MANKAR, Akshay R.; PANDEY, Ashish; MODAK, Arindam; PANT, K.K.. Pretreatment of lignocellulosic biomass: a review on recent advances. *Bioresource Technology*, [S.L.], v. 334, p. 125235, ago. 2021. **Elsevier BV**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125235>.

MARIETOU, Angeliki; KJELDSEN, Kasper U.; GLOMBITZA, Clemens; JØRGENSEN, Bo Barker. Response to substrate limitation by a marine sulfate-reducing bacterium. *The ISME Journal*, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 200-210, 20 jul. 2021. Springer Science and BusinessMedia LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41396-021-01061-2>.

MARTÍNEZ-PATIÑO, J.C.; GULLÓN, B.; ROMERO, I.; RUIZ, E.; BRNCIC, M.; ZELABUR, J.S.; CASTRO, E. Optimization ultrasound assiste extraction of biomass from olive trees using surface response methodology. **Ultrasonics Sonochemistry** 2019, 51: 487-495. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.031>.

MOOSA, S.; NEMATI, M.; HARRISON, T.L. A kinetic study on anaerobic reduction of sulphate, Part I: Effect of sulphate concentration. **Chemical Engineering Science**, 2002. 57(14): p. 2773-2780.

NAJIB, T.; SOLGI, M.; FARAZMAND, A.; HEYDARIAN, S.M.; NASERNEJAD, B. (2017) Optimization of sulfate removal by sulfate reducing bacteria using response surface methodology and heavy metal removal in a sulfidogenic UASB reactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2017.06.016>

OJO, A.O.; DE SMIDT, O. Lactic Acid: A Comprehensive Review of Production to Purification. **Processes** 2023, 11, 688. <https://doi.org/10.3390/pr11030688> POSTGATE, J.R. *The Sulfate-Reducing Bacteria*. 2nd ed. Cambridge University Press;1984. 199 p.

PAROT, Maxime; RODRIGUE, Denis; STEVANOVIĆ, Tatjana. High purity softwood lignin obtained by an eco-friendly organosolv process. **Bioresource Technology Reports**, [S.L.], v. 17, p. 100880, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100880>.

QIAN, Z.; TIANWEI, H.; MACKEY, H.R.; van LOOSDRECHT, M.C.M.; GUANGHAO, C. Recent advances in dissimilatory sulfate reduction: From metabolic study to application. **Water Research**, Volume 150, 1 March 2019, Pages 162-181. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.018>

RASHEED, S.; HASHMI, I.; ZHOU, Q.; KIM, J.K.; CAMPOS, L.C. Central composite rotatable design for optimization of trihalomethane extraction and detection through gas chromatography: a case study. **International Journal of Environmental Science and Technology** (2023) 20:1185–1198 <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04070-6>

SARTI, A.; SILVA, A.J.; ZAIAT, M.; FORESTI, E. (2009), The treatment of sulfate-rich wastewater using an anaerobic sequencing batch biofilm pilot-scale reactor. **Desalination**, 249(1), 241-246.

SATO, Y.; HAMAI, T.; HORI, T. et al. Year-Round Performance of a Passive Sulfate- Reducin Bioreactor that Uses Rice Bran as an Organic Carbon Source to Treat Acid Mine Drainage. *Mine Water Environ* 37, 586–594 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0489-6>

SANCHETI, Sonam V.; GOGATE, Parag R. A review of engineering aspects of intensification of chemical synthesis using ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, [S.L.], v. 36, p. 527-543, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.08.009>.

SIPMA, J.; LENS, P.; VIEIRA, A.; MIRON, Y.; van LIER, J.B.; HULSHOFPOL, L.W.; LETTINGA, G. Thermophilic sulphate reduction in upflow anaerobic sludge bed reactors under acidifying conditions. **Process Biochemistry**, 1999. 35(5): p. 509-522.

THAKUR, Payal; ALABA, Mathew O.; RAUNIYAR, Shailabh; SINGH, Ram Nageena; SAXENA, Priya; BOMGNI, Alain; GNIMPIEBA, Etienne Z.; LUSHBOUGH, Carol; GOH, Kian Mau; SANI, Rajesh Kumar. Text-Mining to Identify Gene Sets Involved in Biocorrosion by Sulfate-Reducing Bacteria: a semi-automated workflow. *Microorganisms*, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 119, 3 jan. 2023. **MDPI AG**. <http://dx.doi.org/10.3390/microorganisms11010119>.

SHAYEGAN, J., GHAVIPANJEH, F., AND MIRJAFARI, P. (2005). The effect of influent COD and upflow velocity on the behavior of sulfate-reducing bacteria. **Process Biochemistry**, 40(7), 2305–2310. doi:10.1016/j.procbio.2004.09.005

TRAN, T.T.T.; KANNOORPATTI, K.; PADOVAN, A.; THENNADIL, S. Sulphate- Reducing Bacteria's Response to Extreme pH Environments and the Effect of TheirActivities on Microbial Corrosion. **Appl. Sci.** 2021, 11, 2201. <https://doi.org/10.3390/app11052201>

VALDÉS, G.; MENDONÇA, R.T.; AGGELIS, G. Lignocellulosic Biomass as a Substratefor Oleaginous Microorganisms: A Review. **Appl. Sci.** 2020, 10, 7698. <https://doi.org/10.3390/app10217698>

WU, W.; LI, P.; HUANG, L.; WEI, Y.; LI, J.; ZHANG, L.; JIN, Y. The Role of Lignin Structure on Cellulase Adsorption and Enzymatic Hydrolysis. *Biomass* 2023, 3, 96-107. <https://doi.org/10.3390/biomass3010007>

ZHAO, Chaorui; CHEN, Nan; LIU, Tong; FENG, Chuanping. Effects of adding different carbon sources on the microbial behavior of sulfate-reducing bacteria in sulfate- containing wastewater. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 392, p. 136332, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136332>.

ZIAEI-RAD, Z.; PAZOUKI, M.; FOOLADI, J.; AZIN, M.; GUMMAD, S.N.; ALLAHVERDI, A. Investigation of a robust pretreatment technique based on ultrasound-assisted, cost-effective ionic liquid for enhancing saccharification and bioethanol production from wheat straw. **Sci Rep** 13, 446 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27258-9>

CAPÍTULO III

CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Foram identificadas condições operacionais adequadas para testes de biorredução de sulfato inorgânico, com auxílio de um pré-tratamento de poda de resíduos agroflorestais, utilizando ondas ultrassônicas, e favorecendo a atuação de um consórcio de bactérias BRS;

- A biodisponibilização de celulose foi constatada com testes para detecção da presença de glicose enzimática, demonstrando eficiência e economia, além de dar à metodologia proposta um forte caráter de sustentabilidade;

- Foram definidas várias condições ótimas locais para a biorredução de sulfatos com base na aplicação de um planejamento experimental do tipo DCCR, tendo-se obtido um modelo de previsão para a etapa de biorredução do sulfato contido nos resíduos de gesso;

- A ferramenta Desirability auxiliou na escolha de um ponto ótimo global para a biorredução do sulfato inorgânico contido em resíduos de gesso.

Apêndice

REDUÇÃO SUSTENTÁVEL DE SULFATO: Perspectivas e Aplicações
para Resíduos Agroflorestais e Esgoto Sanitário
SUSTAINABLE REDUCTION OF SULPHATES: Perspectives and
Applications for Agroforestry Waste and Sanitary Sewage

RESUMO

Este artigo de revisão explora estratégias biotecnológicas sustentáveis para a conversão de compostos de sulfato e resíduos lignocelulósicos. A compreensão das propriedades do sulfato e a utilização de bactérias redutoras de sulfato (BRS) têm mostrado aplicações promissoras no tratamento de efluentes, drenagem de minas e remoção de sulfato e metais pesados de águas residuais. Diversos fatores ambientais influenciam a atividade metabólica das BRS, incluindo pH, temperatura, relação DQO/SO₄⁼ e íons concomitantes. No contexto de uma bioeconomia sustentável, a conversão de resíduos lignocelulósicos em produtos de valor agregado apresenta desafios que são abordados por meio de técnicas de pré-tratamento físico, como moagem, extrusão, irradiação por micro-ondas e ultrassom. Essas abordagens ecologicamente amigáveis têm demonstrado eficiência na valorização de resíduos provenientes da poda de árvores urbanas. O artigo também explora o papel essencial desempenhado pelos biorreatores na transformação de matérias-primas em produtos bioquímicos desejáveis. Diferentes tipos de biorreatores, incluindo batelada, tanque agitado contínuo, airlift, leito fluidizado, UASB e coluna de bolhas, são também discutidos, destacando-se suas vantagens e desvantagens específicas, sempre com o objetivo final de promover a redução sustentável do sulfato como foco central deste trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: biorreatores, biotecnologia, BRS, resíduos agroflorestais, esgoto sanitário.

ABSTRACT

This review article explores sustainable biotechnological strategies for the conversion of sulfate compounds and lignocellulosic waste. Understanding the properties of sulfate and utilizing sulfate-reducing bacteria (SRB) have shown promising applications in effluent treatment, mine drainage, and the removal of sulfate and heavy metals from wastewater. Several environmental factors influence SRB metabolic activity, including pH, temperature, DQO/SO₄⁼ ratio, and concomitant ions. In the context of a sustainable bioeconomy, the conversion of lignocellulosic waste into value-added products presents

challenges that are addressed through physical pre-treatment techniques, such as grinding, extrusion, microwave irradiation, and ultrasound. These eco-friendly approaches have demonstrated efficiency in valorizing waste from urban tree pruning. The article also explores the essential role played by bioreactors in the transformation of raw materials into desired biochemical products. Different types of bioreactors, including batch, continuous stirred-tank, airlift, fluidized bed, UASB, and bubble column reactors, are also discussed, highlighting their specific advantages and disadvantages, all with the ultimate goal of promoting sustainable sulfate reduction as the central focus of this work.

KEYWORDS: bioreactors, biotechnology, SRB, agroforestry residues, sewage.

1. INTRODUÇÃO

O gesso é produzido a partir da desidratação parcial do mineral Gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sendo essencialmente um sulfato de cálcio semi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Produzido, processado e convertido em vários produtos, o gesso é amplamente utilizado na indústria da construção civil como importante componente de pré-moldados como placas de teto, blocos de divisórias, placas de divisórias (drywalls), sancas, revestimentos de paredes, entre outras aplicações (Guedri et al., 2023). As atividades de construção, reforma ou demolição geram grandes quantidades de resíduos chamados resíduos de construção e demolição (RCD). Uma composição típica de RCD inclui madeira, concreto, rochas, papel, plástico, resíduos de gesso e metais pesados.

O gesso é uma parte significativa dos resíduos gerados durante a construção e reforma de estruturas residenciais e prediais. A presença de gesso nos resíduos de construção e demolição pode ter benefícios, mas também pode apresentar riscos devido aos altos níveis de sulfato e metais pesados (Bumanis et al., 2022; Cordon et al., 2019; Camarini and Pinheiro, 2014). A reutilização dos RCD para atividades de construção é limitada devido ao alto teor de sulfato. Além disso, o descarte de RCD em aterros sanitários pode levar à formação de sulfeto biogênico, causando problemas ambientais (Kijjanapanich et al., 2014).

Nos últimos anos, a construção civil abriu mais espaço para a incorporação de novas tecnologias que pudessem conciliar rapidez, economia e sustentabilidade, visando diminuir o custo das obras e manter o padrão de qualidade (Ghaffar et al., 2020). Uma das maneiras de uso sustentável desse material é a partir da reciclagem ou reaproveitamento, de modo que seja

possível sua reinserção de seus resíduos em processos produtivos e o descarte desses resíduos da construção e demolição.

A redução biológica de sulfato contido em resíduos de gesso, incluindo-se os produzidos por RCD, tem despertado cada dia mais o interesse da comunidade científica. Conforme Zang et al. (2022) a busca por materiais alternativos para serem utilizados no processo de biorremediação de sulfatos ou extração de enxofre de resíduos de gesso, por bactérias redutoras de sulfato (BRS). Dessa forma, este estudo aborda, assim, questões cruciais relacionadas ao uso sustentável de resíduos de gesso, com especial ênfase nos resíduos agroflorestais (provenientes da poda de árvores) e do tratamento de esgoto sanitário, destacando a importância da pesquisa para promover a redução sustentável do sulfato e sua relevância no contexto mais amplo dessas fontes de resíduos.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Importâncias ambiental e industrial do sulfato

O sulfato, radical básico do ácido sulfúrico, é um dos ânions existentes em maior quantidade na natureza. Tem origem nas águas subterrâneas oriundo de rochas carbonáticas compostas por calcita, dolomita e aragonita. Também devem ser incluídos minerais secundários como a gipsita, a pirita e, pela oxidação de sulfetos iônicos, compostos de metais de drenagem ácida de minas, assim como de efluentes de várias indústrias, como as de mineração, pecuária, alimentos processados, papel e celulose, corantes, detergentes, entre outras (Zhang et al., 2020; Runtti et al., 2018; Kijjanapanich et al., 2014).

A maior fatia consumidora de enxofre está na indústria de fertilizantes para agricultura, que consome cerca de 60% da produção global (Alexander et al., 2023). Utilizado como nutriente essencial para as plantas, a maior parte dos sulfatos é usada na forma de ácido sulfúrico para produzir ácido fosfórico e a partir deste, o fósforo, outro elemento nutricional essencial na fertilização de plantações. Com a queda nas emissões de enxofre, devido às restrições ambientais, os solos apresentam empobrecimento deste elemento e por isso a necessidade de reposição (Wagenfeld et al., 2019). Na indústria de polímeros, sulfatos também podem ser aplicados tanto como matéria-prima como catalisadores de reações de síntese, como a vulcanização na fabricação de pneus mais duros e resistentes ao calor, conforme Wagenfeld et al. (2019). Além disso, a produção de baterias contendo metais sulfurosos pode aumentar a potência de armazenamento das mesmas com o menor custo, como por exemplo um fator importante para armazenamento de energia renovável.

Sulfato pode causar poluição das águas superficiais e subterrâneas, acidificação dos solos, levar a corrosão e/ou incrustação em tubulações, estruturas e equipamentos, além de retardo nos sistemas de irrigação e drenagem de água (Brahmacharimayum et al., 2019). Quando em contato com animais, incluindo os seres humanos, grandes ingestões de sulfato alteram os níveis de metahemoglobina e sulfemoglobina causando sintomas como desidratação e diarreia (Runtti et al., 2018). Nos seres vivos viventes em águas doces podem ser letais devido à quebra do equilíbrio osmótico pois a alta concentração dos sulfatos leva a salinização da água.

2.2. Bactérias redutoras de sulfato

As bactérias redutoras de sulfato são procariontes que atuam de forma essencial em ambientes anaeróbios e sua utilização em processos biotecnológicos como a biorredução do sulfato em tratamento de efluentes, drenagem de minas e em compostos de sulfato de cálcio, desempenhando papel fundamental na produção de enxofre e no ciclo do carbono (Kushkevych et. al., 2021; Ayangbenro et al., 2018). Segundo esses autores, são microrganismos que possuem uma grande variedade metabólica, utilizando diversas fontes de substâncias orgânicas e inorgânicas para geração de energia.

As bactérias redutoras de sulfato são de grande importância ecológica na biodegradação da matéria orgânica em todos os ambientes anaeróbios ricos em sulfatos. Essas bactérias representam um grupo diversificado de anaeróbios obrigatórios que prosperam em ambientes anóxicos, contendo materiais orgânicos e sulfato (Tang et al., 2009). Segundo os referidos estudiosos, algumas dessas espécies têm a capacidade de sobreviver na presença de oxigênio, sendo subdivididas em proteobactérias e em bactérias gram positivas, englobando espécies psicrófilas ou extremófilas com capacidade de se reproduzir em baixas temperaturas. Reforçam ainda estes autores que as bactérias mesófilas estão inseridas na maioria dos microrganismos com crescimento ótimo em temperatura que varia entre 20°C e 45°C, e as termófilas, que conseguem sobreviver e desenvolver-se em temperaturas acima de 70°C como as *Termodessulfobactéria* e *Termodessulfovibrio*.

Algumas BRS anaeróbias obrigatórias desempenham papel importante na redução de compostos do enxofre utilizando o sulfato (SO_4^-) comoceptor de elétrons, em seu metabolismo, gerando como produto o sulfeto de hidrogênio - H_2S (Tian et al. 2017). Essas BRS estão presentes em ambientes

como ecossistemas de água doce e marinha, fontes hidrotermais, áreas anaeróbicas do solo e zonas úmidas e utilizam o hidrogênio da matéria orgânica para obtenção de energia por oxidação. Na redução de sulfato, os doadores de elétrons são os ácidos graxos de cadeia curta como o lactato, o acetato, ácidos de cadeia longa, e compostos aromáticos (Dordevié et al., 2021). Embora sejam microrganismos que estão envolvidos em processos de corrosão metálica têm-se mostrado de forma promissora na remoção de sulfato e metais pesados de águas residuais e no emprego do uso de tecnologias como marcadores ambientais, com o objetivo de contribuir na análise da corrosão (Asif et al., 2021).

Nos processos sulfidogênicos, a produção de H_2S envolve o metabolismo de microrganismos com capacidade de reduzir compostos que contém enxofre, como também, de oxidar fontes de carbonos orgânicos e inorgânicos para seu crescimento (Kijjanapanich et al., 2014). O sulfeto de hidrogênio é o principal produto da decomposição da matéria orgânica originada de resíduos industriais, a qual sofre ação de microrganismos quimilitróficos que fazem parte do metabolismo anaeróbico de determinados grupos de bactérias redutoras de sulfato.

A redução biológica por BRS é uma das alternativas para mitigar a emissão de sulfato originado das atividades industriais como na produção de fertilizante, borracha, pigmentos, mineração, esgotos domésticos, entre outras, que podem provocar contaminação das águas residuais em virtude da lixiviação para o solo e águas subterrâneas (Reis et al., 2022). A transformação inicia-se na redução de sulfatos utilizando fontes de carbono baratas. O mecanismo básico utilizado pelas BRS na redução de sulfato consiste na redução dissimilatória de sulfato e no aproveitamento das fontes de carbono como doadores de elétrons, para promover a produção do H_2S , a exemplo das *Desulfobacter* e *Desfulvibrio*, classificadas como sulfidogênicas, considerando sua capacidade de usar o sulfato como fonte de energia, utilizando-o nas reações para produzir nova biomassa (Zhang et al., 2016).

As BRS são ubíquas no ambiente natural e podem utilizar lactato de sódio, etanol, H_2 e outros doadores de elétrons para reduzir o íon sulfato em condições anaeróbicas (ou anóxicas), produzindo sulfeto (incluindo $S^{=}$, HS^- e H_2S) para precipitar metais pesados e produzir substâncias alcalinas para melhorar o pH. As SRB desempenham um papel importante no ciclo biogeoquímico do enxofre e no processo microbiano de dessulfurização (Muhammad et al., 2018). Esses estudos realizados por Muhammad et al. (2018) mostraram que as BRS podem remover sincronicamente íons de sulfato

e metais pesados. A taxa de fixação de íons de ferro, cobre, chumbo e outros metais pesados pode chegar a 87-100%. A porcentagem de remoção de Mn^{2+} e Pb^{2+} pelas BRS pode ser de 93% e 90%. As SRB também têm um bom efeito de remoção de sulfato e metais pesados em DAM. A adequação do ambiente ao crescimento das SRB pode melhorar a atividade metabólica das bactérias.

As interações entre diferentes tipos de BRS, bactérias metanogênicas e outras bactérias são de grande interesse ecológico e biotecnológico. No entanto, como essas interações são afetadas por variáveis ambientais, como concentrações de sulfato, substratos de carbono e razões de demanda química de oxigênio (DQO) para sulfato, ainda precisa ser decifrado (Chen et al., 2019). Além disso, o modo operacional dos biorreatores também tem um efeito significativo no enriquecimento microbiano com base na teoria de seleção r/K (Guo et al., 2022). A teoria de seleção r/K descreve dois tipos de estrategistas em ecossistemas: o estrategista r , que se adapta a ambientes ricos em recursos, e o estrategista K , que se adapta a ambientes com recursos limitados. Esses dois tipos de estrategistas têm características de crescimento e nichos ecológicos diferentes. Dentro de comunidades microbianas dinâmicas e diversas em ecossistemas de DA, os estrategistas r/K podem ser classificados com base em suas taxas de crescimento específicas e afinidades por substratos de acordo com a equação de Monod (Hou et al., 2019). Para entender melhor como as comunidades microbianas respondem a ambientes ricos ou limitados em recursos durante a digestão anaeróbica (DA) associada à redução de sulfato, Chen e colaboradores (2019) implementaram dois modos operacionais: enchimento rápido e enchimento lento. O modo de enchimento rápido fornece substratos de forma intermitente, criando gradientes de substratos que podem favorecer tanto estrategistas r quanto K . Em contraste, o modo de enchimento lento mantém concentrações de substrato relativamente baixas e constantes, o que pode beneficiar a adaptação de estrategistas K . O estudo utilizou etanol e acetato como fontes de carbono orgânico para uma análise comparativa, pois o etanol pode enriquecer BRS com metabolismo incompleto, enquanto o acetato pode enriquecer BRS com metabolismo completo.

Como constatado por Liu et al. (2018) a atividade das BRS é mais forte em temperaturas em torno de 30°C, enquanto é fraca em temperaturas de 50°C. Baixas temperaturas e baixos valores de pH podem reduzir a eficiência de redução de sulfato pelas BRS. O $S^{=}$ tem um efeito inibitório sobre o crescimento das BRS, e a inibição aumenta com o aumento da concentração de $S^{=}$. Diferentes valores de $DQO/SO_4^{=}$ afetam o ambiente simbiótico entre as

BRS e os metâgenos, levando ao crescimento de cepas dominantes diferentes e afetando indiretamente a eficiência de redução de sulfato. A relação DQO/SO₄²⁻ mais adequada para a dessulfurização pelas BRS é de 0,5 a 1,5 teoricamente, mas na prática, devido à falta de doadores de elétrons, o SO₄²⁻ não pode ser reduzido efetivamente para H₂S pelas BRS quando o valor de DQO/SO₄²⁻ está entre 0,5 e 1,5. O valor mais adequado de DQO/SO₄²⁻ para uma boa eficiência de dessulfurização é de 1,5 a 2,5.

O frasco Erlenmeyer oferece várias vantagens para cultivos microbianos quando utilizado como um biorreator em escala de batelada (Schirmer et al., 2022), uma vez que também são de fácil manuseio e permitem a agitação eficaz do meio de cultura. Embora sejam usados em pequena escala em laboratórios, os princípios e condições de cultivo podem muitas vezes ser escalados para biorreatores maiores, permitindo uma transição suave da pesquisa de laboratório para processos em escala maior. Esses frascos permitem fácil monitoramento das culturas, o que é importante para acompanhar o crescimento microbiano, a produção de metabólitos e outros parâmetros relevantes. O processo pode ocorrer com ou sem agitação e aeração por difusão (Incubadora Shaker com Agitação Orbital e Aquecimento). Dong et al. (2023) utilizou frascos Erlenmeyer para acompanhar o crescimento de BRS. Tais bactérias exibiram uma curva de crescimento do tipo "S" sendo quantificada sua fase logarítmica de crescimento por um período de 14 a 86 horas, demonstrando alta atividade e um metabolismo de crescimento robusto. Para isto a faixa de temperatura ideal para as foi de 32 a 35°C, onde sua atividade foi a mais elevada. À medida que a concentração de S₂⁻ no sistema de cultivo aumentava gradualmente, a atividade das BRS era inibida, podendo levar até mesmo à morte das células. As BRS demonstraram ser mais ativas em um intervalo de pH ambiental de 7~8, embora pudessem tolerar valores de pH na faixa de 5~8. A relação entre a demanda química de oxigênio (DQO) e o sulfato (SO₄²⁻) que mais favoreceu o crescimento das BRS foi de 2.

Os reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) podem ser utilizados para tratamento de águas residuais em escala de laboratório, uma vez que desempenha um papel essencial no tratamento de efluentes ricos em sulfato. Bertolino et al. (2013) trabalharam com redução biológica de sulfato em um UASB em condições deficientes de mistura, obtendo resultados bem aquém do esperado. Contudo, ao melhorar as condições de mistura com recirculação de biomassa e aumentar a velocidade de fluxo ascendente, a taxa de remoção de sulfato aumentou significativamente, alcançando 89% de remoção. Isso destacou a importância das condições de mistura no desempenho desse

biorreator para degradação do substrato e redução de sulfato. Dessa forma, a ausência de diretrizes definidas para o projeto de geometria, seleção de materiais, construção, regras de operação e, especialmente, as condições de partida, dificultam significativamente os pesquisadores que desejam conduzir testes de tratabilidade usando reatores UASB em escala laboratorial (Pererva et al., 2020; Najib et al., 2017). Contudo, a maioria dos estudos presentes na literatura não fornece detalhes sobre a construção e as condições operacionais desses reatores, dificultando a replicação dos experimentos.

Kijjanapanich et al. (2014) investigaram a remoção biológica de sulfato de um lixiviado gerado a partir de RCD e avaliaram o efeito da configuração do biorreator nesse processo. Esses pesquisadores usaram diferentes configurações de biorreatores, incluindo um biorreator de fluxo ascendente (UASB), um biorreator do tipo *GasLift* anaeróbico com membrana (GLAM) e um biorreator de fluxo descendente (Leito Fluidizado Invertido - LFI). Eles monitoraram parâmetros importantes, como a remoção de sulfato, a produção de sulfeto, o consumo de alcalinidade e a formação de ácido sulfídrico. Os resultados do estudo mostraram que as três configurações de biorreator podem ser utilizadas no tratamento do lixiviado de RCD, alcançando uma eficiência de remoção de sulfato na faixa de 75-85%. Nesses sistemas, as BRS utilizaram o sulfato presente no lixiviado. Uma concentração elevada de cálcio teve um impacto negativo nos grânulos do UASB, resultando na precipitação de CaCO_3 na superfície dos grânulos. Por outro lado, uma concentração de cálcio de até 1000 mg/L não afetou adversamente a eficiência de remoção de sulfato dos sistemas LFI e GLAM. Os efluentes desses bioprocessos ainda apresentaram alta concentração de sulfeto (exceto o GLAM) e cálcio, os quais precisam ser removidos antes de reutilizar a água no processo de lixiviação ou antes de descartá-la no meio ambiente.

Tem sido apontada na literatura uma competição existente entre as bactérias redutoras de sulfato e as metanogênicas, em virtude as suas condições de vida serem semelhantes, sendo por isso um fator que inspira cuidados na redução biológica de sulfatos. Essa condição competitiva favorece aos substratos como hidrogênio e acetato, provocando uma inibição na DA, impedindo uma melhor produção de biogás, devido ao coeficiente de afinidade do hidrogênio ser maior para as BRS, deixando as metanogênicas em desvantagem para o consumo desse íon. Entretanto, no estudo realizado por Wei et al. (2018) foi demonstrado que quando existiu a presença de ferro de valência zero em um biorreator anaeróbico, a ação das metanogênicas foi melhorada, tendo em vista, que houve considerável degradação de propionato

e inibição do sulfato existente em excesso no lodo. Dessa forma, na escolha do material de confecção do biorreator isto deve ser levado em conta.

Kanazawa et al. (2020) conduziram experimento para melhorar o rendimento da produção metano, mesmo com auxílio de sulfato. Estes pesquisadores utilizaram um novo processo de pré-tratamento para o excesso de adicionando gesso em pó (sulfato de cálcio) obtido de resíduos de pré-moldados. Quando sulfato de cálcio foi adicionado ao excesso de lodo gerado por uma estação de tratamento de águas residuais municipais, a produção de acetato foi aumentada devido à redução do sulfato e a liberação de fósforo foi reduzida pela formação de fosfato de cálcio. No experimento de pré-tratamento realizado a 25°C e com um tempo de retenção do lodo (TRL) de 10 dias, utilizando sulfato de cálcio, foram produzidos $1935 \pm 395 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de acetato com $1070 \pm 255 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de sulfato, que foi reduzido. Foram observadas bactérias do gênero *Desulfobulbus*, capazes de oxidar matéria orgânica de forma incompleta para acetato, no lodo pré-tratado. O lodo pré-tratado foi posteriormente utilizado para digestão anaeróbia mesófila. O rendimento de metano do lodo pré-tratado foi 1,2 vezes maior do que o do lodo não pré-tratado em um TRL de 30 dias, indicando que o pré-tratamento usando gesso em pó pode melhorar a produção de metano. O fósforo foi liberado do lodo não pré-tratado no digestor. No entanto, observou-se uma diminuição no teor de fósforo, resultando em um lodo digerido contendo fosfato de cálcio que é útil para a agricultura. Observou-se então que o uso do gesso como parte do processo de pré-tratamento visa especificamente à redução do sulfato presente no lodo. Devido a presença de bactérias redutoras de sulfato (BRS) os autores demonstraram como a redução biológica de sulfato também desempenha um papel fundamental na otimização da produção de metano a partir de resíduos orgânicos, como parte de um processo de tratamento de águas residuais, destacando a importância dessa abordagem em processos ambientalmente sustentáveis.

Conforme pesquisa realizada por Zhang et al. (2022) com o rápido crescimento da economia e da população, os efluentes contendo sulfato provenientes de atividades industriais e humanas tornaram-se gradualmente uma ameaça potencial à segurança ecológica. Além disso, o mecanismo de influência de fatores ambientais na atividade metabólica de uma BRS foi analisado sob a perspectiva de pH, temperatura, relação DQO/SO₄⁼, doadores de elétrons, potencial de oxidação-redução, tempo de retenção hidráulica, íons concomitantes e efeito sintrófico/competitivo, aplicações e estratégias de aprimoramento para BRS. Segundo os referidos autores, as análises devem

focar em: genes funcionais e enzimas, na redução de assimilação de sulfato, pesquisa com capacidade de oxidação completa, estabelecimento de modelos matemáticos que simulem a atividade metabólica e sua eficiência, no desenvolvimento de novas fontes de carbono adequadas, no valor potencial de metais pesados, na recuperação de enxofre elementar, na redução de sulfato e na exploração do mecanismo de interação entre bactérias que respiram organohaletos (Liu et al., 2018).

A drenagem ácida de minas (DAM) é um dos problemas ambientais mais sérios enfrentados pela indústria de mineração. O pH dessas águas residuais geralmente é ácido e rico em íons de sulfato, íons de ferro e íons metálicos tóxicos em concentrações específicas (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , etc.). A absorção de Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} e outros íons metálicos pesados presentes na DAM pode ocorrer na cadeia alimentar e afetar a saúde humana. O método microbiano utilizando bactérias redutoras de sulfato como a cepa dominante é uma tecnologia promissora para o tratamento de DAM (Yuya et al., 2019). O método anteriormente citado apresenta as vantagens de alta eficiência, baixo consumo de energia e amigável ao meio ambiente, o que tem despertado a atenção dos pesquisadores.

Na liberação descontrolada da DAM, devido à importância do tratamento dessa drenagem e à alta concentração de sulfato e íons metálicos em ambientes ácidos, os processos sulfidogênicos são considerados mais eficazes, devido às vantagens como o melhor espessamento do lodo metálico e menor solubilidade (Bayrakdar et al., 2009). Uma vez que as águas residuais da mineração geralmente contêm baixas concentrações de substâncias orgânicas, é muitas vezes necessário adicionar uma fonte de carbono adequada para promover a redução biológica do sulfato. Para constatar se a fonte de carbono pode afetar significativamente o desempenho do biorreator nas várias etapas, incluindo a partida, a operação e a acumulação de sulfeto, Zhao et al. (2010) realizaram experimentos com quatro biorreatores de tanque agitado contínuo (CSTB) em paralelo, com um volume efetivo de 1 litro cada. Os reatores foram alimentados com água residuária sintética e operados com diferentes fontes de carbono: melaço, lactato, glicose e acetato/etanol. Quando a remoção de sulfato estava estável em cada reator, o lodo ativado foi amostrado para análise da comunidade microbiana. Algumas bactérias redutoras de sulfato podem utilizar lactato, etanol e acetato diretamente na redução de sulfato. O lactato é um doador de elétrons superior em termos de energia e biomassa, acelerando o início do processo biológico. O lactato também permite a adaptação de uma variedade maior de BRS em comparação

com outros substratos. Os biorreatores alimentados com lactato apresentaram um início mais rápido, melhor desempenho e produção estável de produtos finais. Etanol e acetato são alternativas, mas os biorreatores alimentados com esses substratos levaram mais tempo para atingir a operação estável devido à obtenção de menos energia e à presença relativamente menor de BRS para a oxidação de acetato e etanol (Widdel, 1998).

2.3. Fontes sustentáveis de carbono e de nutrientes

Governos de todo o mundo estão planejando uma transição de uma economia baseada em combustíveis fósseis para uma bioeconomia sustentável, a fim de reduzir a dependência de recursos fósseis e as emissões de dióxido de carbono. Dessa forma, à medida que a substituição de recursos fósseis aumenta, a disponibilidade de biorrecursos se torna mais importante. Para enfrentar possíveis escassezes de materiais lignocelulósicos, fontes subutilizadas, como resíduos de poda de árvores urbanas, podem ser mobilizadas (Hagel et al., 2021). As atividades de poda de árvores, geralmente realizadas por motivos de segurança, são consideradas custos para os municípios. Ao valorizar os resíduos de poda, os custos podem ser compensados. Atualmente, esses resíduos são principalmente utilizados para geração de energia ou descartados. Devido ao conhecimento limitado sobre a valorização dos resíduos de poda de árvores, Hagel et al. (2021) acreditam que investigar a qualidade e o processamento desse biorrecurso é um empreendimento valioso.

Tem sido objetivo de estudos a aplicação de tecnologias ambientais para obtenção de nutrientes e fontes de energia a partir de resíduos industriais, objetos biológicos e poluentes orgânicos (Kanda et al., 2019). Nos últimos anos, tem havido uma tendência de redução no uso de fertilizantes fosfatados, potássicos e nitrogenados, o que está associado a uma diminuição nos recursos naturais necessários para produzir tais fertilizantes. A solução para esse problema pode ser o uso de resíduos orgânicos que contenham fósforo (P), nitrogênio (N) e potássio (K) (Xie et al., 2023). Um desses resíduos é o lodo de esgoto. O lodo de esgoto contém em média 1 a 3% de nitrogênio, 1 a 5% de fósforo e 0,2% a 0,7% de potássio, sendo, portanto, uma excelente fonte para isolamento ou recuperação de elementos biogênicos (Tao, 2019).

2.4. Pré-tratamento de biomassa lignocelulósica

Vários fatores contribuem para a resistência das biomassas

lignocelulósicas (BLC) à conversão em produtos de valor agregado, como biocombustíveis, produtos químicos e materiais. Essa recalcitrância é devido à presença de uma estrutura cristalina da celulose o grau de lignificação e a heterogeneidade estrutural e complexidade dos constituintes da parede celular (Baruah et al., 2018). A escolha de uma técnica de pré-tratamento mais adequada depende do tipo da BLC utilizada, pois a composição de celulose, hemicelulose e lignina pode variar entre diferentes fontes lignocelulósicas (Siddique et al., 2023; Matheri et al., 2018). Neste trabalho foi dada preferência à revisão de métodos físicos de pré-tratamento, em virtude do forte caráter ambientalmente amigável de tais procedimentos.

O pré-tratamento físico das biomassas lignocelulósicas (BLC), característica dos resíduos agroflorestais, compreende uma etapa prévia essencial antes de outros métodos de pré-tratamento (Galić et al., 2021). Um dos objetivos deste pré-tratamento é reduzir o tamanho das partículas, o que resulta no aumento da área superficial e na diminuição do grau de polimerização e da cristalinidade da biomassa. Por exemplo, a moagem é empregada para reduzir a cristalinidade e o tamanho das partículas da biomassa lignocelulósica. Ela pode reduzir o tamanho das partículas para até 0,2 mm. Um estudo realizado por Chang et al. (1997) revelou que partículas de biomassa com tamanho inferior a 0,4 mm não têm um efeito notável no rendimento da hidrólise. A extrusão é considerada como uma das técnicas de pré-tratamento físico mais comumente utilizada. Essa técnica é baseada na ação de um ou dois parafusos que giram em um cilindro apertado, o qual é equipado com controle de temperatura (Zhang et al., 2020). O uso da irradiação por micro-ondas como um método de aquecimento não convencional para o pré-tratamento das biomassas lignocelulósicas sob um campo eletromagnético aplicado. O primeiro estudo de pré-tratamento por irradiação de micro-ondas foi realizado por Ooshima et al. (1984) e, desde então, esse método tem sido considerado conveniente devido a várias vantagens, incluindo operação fácil, eficiência energética, formação mínima de inibidores e alta capacidade de aquecimento em um curto período de tempo (Camani et al., 2020). O pré-tratamento de biomassa lignocelulósica por ultrassom (US), que é baseado no princípio da cavitação através do uso de radiação ultrassônica. A cavitação, ou formação de micro- e nanobolhas acústicas no interior do líquido, gera forças de cisalhamento que quebram a estrutura complexa em rede das BLC e promovem a extração de compostos desejados, como celulose, hemicelulose e/ou lignina (Muthuvelu, et al., 2019). A escolha dos solventes (água, soluções aquosas diluídas de ácidos inorgânicos ou alcalinos, solventes orgânicos ou

líquidos iônicos) é crucial para determinar as condições ideais para os pré-tratamentos por ultrassom (Suresh et al., 2020). Vários fatores influenciam o tratamento por US, incluindo a frequência do ultrassom, a duração da sonicação, a potência do gerador ultrassônico e a temperatura.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Compreender as propriedades do sulfato e explorar estratégias de conversão biológica, juntamente com o uso de resíduos agroflorestais e esgoto sanitário, pode desempenhar um papel fundamental na promoção de práticas sustentáveis de manejo desse composto, com impactos positivos no meio ambiente e na saúde humana.

As bactérias redutoras de sulfato (BRS) têm a capacidade de utilizar uma ampla variedade de fontes de substâncias orgânicas e inorgânicas para gerar energia. Essas bactérias desempenham um papel significativo em diversas biotecnologias, incluindo o tratamento de efluentes, drenagem de minas e remoção de sulfato e metais pesados de águas residuais. No entanto, a atividade metabólica das BRS é sensível a uma série de fatores ambientais, como pH, temperatura, relação DQO/SO₄²⁻, doadores de elétrons, potencial de oxidação-redução, tempo de retenção hidráulica e presença de íons concomitantes.

Para promover a eficiência das BRS, é essencial otimizar as condições ambientais, como temperatura e pH, para cada espécie. Além disso, o controle da concentração de íons sulfeto e a manutenção da relação adequada entre DQO e sulfato são cruciais para garantir a eficácia da redução de sulfato. A competição por substratos entre as BRS e as bactérias metanogênicas também deve ser considerada em processos de digestão anaeróbia.

Outro ponto importante abordado neste estudo é o uso de resíduos lignocelulósicos na transição para uma bioeconomia sustentável. O pré-tratamento dessas biomassas por meio de técnicas físicas, como moagem, extrusão, irradiação por micro-ondas e ultrassom, pode facilitar sua conversão em produtos de valor agregado. A escolha da técnica de pré-tratamento deve ser guiada pelas características da biomassa e pelos objetivos econômicos do processo.

Resumindo, a compreensão das propriedades do sulfato, juntamente com o uso estratégico de bactérias redutoras de sulfato e a valorização de resíduos agroflorestais, desempenha um papel importantíssimo na busca por práticas mais sustentáveis no manejo desse composto. A otimização das condições ambientais e o pré-tratamento de biomassas lignocelulósicas são

passos importantes em direção a uma bioeconomia mais sustentável. Portanto, os biorreatores desempenham um papel fundamental como ferramentas essenciais para avanços na biotecnologia, possibilitando processos biológicos e bioquímicos eficientes e controlados.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os autores são gratos à Escola Unicap-Icam Tech da Universidade Católica de Pernambuco e ao Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI), Recife-PE.

REFERÊNCIAS

Alexander, P., Arneth, A., Henry, R., Maire, J., Rabim, S., and Rounsevell, M.D.A. 2023. High energy and fertilizer prices are more damaging than food export curtailment from Ukraine and Russia for food prices, health and the environment. *Nature Food*, 4: 84–95. doi: 10.1038/s43016-022-00659-9.

Asif, M., Aziz, A., Ashraf, G., Iftikhar, T., Sun, Y., and Liu, H. 2021. “Turning the Page: advancing detection platforms for sulfate reducing bacteria and their perks.” *The Chemical Record*, 22: 1-15. <https://doi.org/10.1002/tcr.202100166>.

Ayangbenro, A.S., Olanrewaju, O.S., and Babalola, O.O. 2018. “Sulfate-Reducing Bacteria as an Effective Tool for Sustainable Acid Mine Bioremediation.” *Frontiers In Microbiology*, 9: 1-10. doi: 10.3389/fmicb.2018.01986.

Baruah, J., Nath, B.K., Sharma, R., Kumar, S., Deka, R.C., Baruah, D.C., and Kalita, E. 2018. “Recent Trends in the Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Value-Added Products.” *Front. Energy Res.* 6: 1-19. doi: 10.3389/fenrg.2018.00141.

Bayrakdar, A., Sahinkaya, E., Gungor, M., Uyanik, S. and Atasoy, A.D. 2009. “Performance of sulfidogenic anaerobic baffled reactor (ABR) treating acidic and zinc-containing wastewater.” *Bioresource Technology*, Volume 100, 4354-4360. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.028>.

Bertolino, S.M., Silva, L.A.M., Aquino, S.F., and Leão, V.A. 2015. “Comparison

of Uasb and Fluidized-Bed Reactors for Sulfate Reduction.” *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32: 59 – 71. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20150321s00003158>.

Brahmacharimayum, B., Mohanty, M.P., and Ghosh, P.K. 2019. “Theoretical and Practical Aspects of Biological Sulfate Reduction: a review.” *Global Nest Journal*, 2: 222-244. DOI: 10.30955/gnj.002577.

Bumanis, G., Zorica, J., Korjakins, A., and Bajare, D. 2022. “Processing of Gypsum Construction and Demolition Waste and Properties of Secondary Gypsum Binder”. *Recycling*, 7, 1-13. <https://doi.org/10.3390/recycling7030030>.

Camani, P.H., Anholon, B.F., Toder, R.R., and Rosa, D.S. .2020. “Microwave-assisted pretreatment of eucalyptus waste to obtain cellulose fibers.” *Cellulose* 27: 3591–3609. DOI: 10.1007/s10570-020-03019-7.

Camarini, G., and Pinheiro, S.M.M. 2014. “Microstructure of recycled gypsum plaster by SEM.” *Adv. Mater. Res.* 912-914: 243–246. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.912-914.243.

Chen, J., Wade, M.J., Dolfing, J. and Soyer, O.S. 2019. “Increasing sulfate levels show a differential impact on synthetic communities comprising different methanogens and a sulfate reducer.” *J. R. Soc. Interface.*, 16, p. 20190129. DOI: 10.1098/rsif.2019.0129.

Cordon, H.C.F., Cagnoni, F.C., and Ferreira, F.F. 2019. “Comparison of physical and mechanical properties of civil construction plaster and recycled waste gypsum from São Paulo, Brazil.” *Journal of Building Engineering*, 22: 504-512. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.01.010>.

Dong, Y., Wang, J., Gao, Z., Di, J., Wang, D., Guo, X., Hu, Z., Gao, X., and Wang, Y. 2023. “Study on Growth Influencing Factors and Desulfurization Performance of Sulfate Reducing Bacteria Based on the Response Surface Methodology.” *ACS OMEGA*, 8: 4046–4059. DOI: 10.1021/acsomega.2c06931.

Dordević, D, Jančíková, S., Vítězová, M., and Kushkevych, I. 2021. “Hydrogen sulfide toxicity in the gut environment: meta-analysis of sulfate-reducing and lactic acid bacteria in inflammatory processes.” *Journal of Advanced Research*, 27: 55-69. <https://doi.org/10.3390/cells11060978>.

Galić, M., Stajić, M., Vukojević, J. and Čilerdžić, J. 2021. “Obtaining

Cellulose Available Raw Materials by Pretreatment of Common Agroforestry Residues With *Pleurotus* spp.” *Front. Bioeng. Biotechnol.* 9:720473. doi: 10.3389/fbioe.2021.720473

Ghaffar, S.H., Burman, M., and Braimah, N. 2019. “Pathways to circular construction: An integrated management of construction and demolition waste for resource recovery.” *J. Clean. Prod.* 244, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118710>.

Guedri, A., Yahya, K., Hamdi, N., Baeza-Urrea, O., Wagner, J.F., and Zagarni, M.F. 2023. “Properties Evaluation of Composite Materials Based on Gypsum Plaster and *Posidonia Oceanica* Fibers.” *Buildings*, 13: 1-15. <https://doi.org/10.3390/buildings13010177>.

Guo, Q., Yin, Q., Du, J., Zuo, J. and Wu, G. 2022. “New insights into the r/K selection theory achieved in methanogenic systems through continuous-flow and sequencing batch operational modes.” *Sci. Total Environ.*, 807, Article 150732. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150732>.

Hagel, S., Lüssenhop, P., Walk, S., Kirjoranta, S., Ritter, A., Bastidas Jurado, C.G., Mikkonen, K.S., Tenkanen, M., Körner, I., and Saake, B. 2021. “Valorization of Urban Street Tree Pruning Residues in Biorefineries by Steam Refining: Conversion Into Fibers, Emulsifiers, and Biogas.” *Front. Chem.*, 9: 1-15. DOI: 10.3389/fchem.2021.779609.

Hou, L., Griswold, N., Ji, J. and Hu, Z. 2019. “Specific affinity and relative abundance of methanogens in acclimated anaerobic sludge treating low-strength wastewater.” *Appl. Microbiol. Biot.*, 104: 291-302. 291–302 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10149-x>

Kanazawa, S., Matsuura, N., Honda, R., and Yamamoto-Ikemoto, R. 2020. “Enhancement of methane production and phosphorus recovery with a novel pre-treatment of excess sludge using waste plaster board.” *Journal of Environmental Management*, 255: 109844-59. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman-.2019.109844>.

Kanda, M., Malovanyy, M., Tymchuk, I., and Odnorih, Z. 2019. “Evaluation of the degree of environmental hazard from environmental pollution in the area of poultry farms impact.” *Environmental Problems*, 4: 161–166. <https://doi.org/10.23939/ep2019.03.161>.

Kijjanapanich, P., Do, A.T., Annachhatre, A.P., Esposito, E.G., Yeh, D.H., and Lens, P.N.L. 2014. "Biological sulfate removal from construction and demolition debris leachate: Effect of bioreactor configuration." *Journal of Hazardous Materials*, 269: 38–44. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.10.015.

Kushkevych, I., Hýžová, B., Vítězová, M., and Rittmann, S.K.M.R. 2021. "Microscopic Methods for Identification of Sulfate-Reducing Bacteria from Various Habitats." *International Journal of Molecular Sciences*, 22: 1-27. doi: 10.3390/ijms22084007.

Liu, Z., Li, L., Li, Z., and Tian, X 2018. "Removal of sulfate and heavy metals by sulfate-reducing bacteria in an expanded granular sludge bed reactor." *Environ Technol.*, 39: 1814-1822. doi: 10.1080-/09593330.2017.1340347.

Liu, Z., Yin, H., Lin, Z., and Dang, Z. 2018. "Sulfate-reducing bacteria in anaerobic bioprocesses: basic properties of pure isolates, molecular quantification, and controlling strategies." *Environmental Technology Reviews*, 7: 46-72. <https://doi.org/10.1080/21622515.2018.1437783>.

Matheri, A.N., Ntuli, F., Ngila, J.C., Seodigeng, T., Zvinowanda, C., and Njenga, C.K. 2018. "Quantitative characterization of carbonaceous and lignocellulosic biomass for anaerobic digestion." *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 92: 9-16. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.070.

Méndez, G., Trueba, G., Sierra-Alvarez, R. and Ochoa-Herrera, V. 2021. "Treatment of acid rock drainage using a sulphate-reducing bioreactor with a limestone precolumn." *Environmental Technology*, Environmental Technology, DOI: 10.1080/09593330.2021.1968039.

Muhammad, S. N., Kusin, F. M., and Madzin, Z. 2018. "Coupled physicochemical and bacterial reduction mechanisms for passive remediation of sulfate- and metal-rich acid mine drainage." *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 15: 2325–2336. DOI: 10.1007/s13762-017-1594-6.

Muthuvelu, K.S., Rajarathinam, R., Kanagaraj, L.P., Ranganathan, R.V., Dhanasekaran, K., and Manickam, N.K. 2019. "Evaluation and characterization of novel sources of sustainable lignocellulosic residues for bioethanol production using ultrasound-assisted alkaline pre-treatment." *Waste Manag.* 87: 368–74. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.015>.

Najib, T. Solgi, M., Farazmand, A., Heydarian, S.M., and Nasernejad, B. 2017. "Optimization of sulfate removal by sulfate reducing bacteria using response surface methodology and heavy metal removal in a sulfidogenic UASB reactor." *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5: 3256-3265. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.06.016>.

Ooshima, H., Aso, K., Harano, Y. and Yamamoto, T. 1984. "Microwave treatment of cellulosic materials for their enzymatic hydrolysis." *Biotechnol Lett* 6, 289–294 (1984). <https://doi.org/10.1007/BF00129056>

Pererva, Y., Miller, C.D., and Sims, R.C. 2020. "Approaches in Design of Laboratory-Scale UASB Reactors." *Processes*, 8: 1-26. <https://doi.org/10.3390/pr8060734>.

Reis, J.M. dos, Aguiar, A.B.S., Freitas, G., Vassoler, V.C., Barros, G.V. L., Santos, G.E., Ramirez, I., and Rodriguez, R.P. 2022. "Metals removal techniques from wastewater: a literature review." *Research, Society and Development*, 11: 1-18. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i2.26100>.

Runtti, H., Tolonen, E., Tuomikoski, S., Luukkonen, T., and Lassi, U. 2018. "How to tackle the stringent sulfate removal requirements in mine water treatment – a review of potential methods." *Environmental Research* 167: 207–222. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.07.018>.

Sato, Y., Hamai, T., Hori, T. et al. Desulfosporosinus spp. were the most predominant sulfate-reducing bacteria in pilot- and laboratory-scale passive bioreactors for acid mine drainage treatment. *Appl Microbiol Biotechnol* 103, 7783–7793 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10063-2>

Schirmer, C., Eib, R., Maschke, R.W., Mozaffari, F., Junne, S., Daumke, R., Ottinger, M., G'hmann, R., Ott, C., Wenk, I., Kubischik, J., and Eib, D. 2022. "Single-use Technology for the Production of Cellular Agricultural Products: Where are We Today?" *Chem. Ing. Tech.*, 94: 2018–2025. <https://doi.org/10.1002/cite.202200092>.

Schirmer, C., Maschke, R., Pörtner, R., and Eibl, D. 2021. "An overview of drive systems and sealing types in stirred bioreactors used in biotechnological processes." *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105: 2225 - 2242. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11180-7>.

Siddique, M., Mengal, A.N., Khan, S., Ali khan, L., and Kaka, E.K. 2023. "Pretreatment of lignocellulosic biomass conversion into biofuel and biochemical: a comprehensive review." *MOJ Biol Med.*, 8: 39–43. DOI: 10.15406/mojbm.2023.08.00181.

Struk, M., Sepúlveda-Munoz, C.A., Kushkevych, I., and Munoz, R. 2023. "Photoautotrophic removal of hydrogen sulfide from biogas using purple and green sulfur bacteria." *Journal of Hazardous Materials*, 443: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130337>.

Suresh, T., Sivarajasekar, N., Balasubramani, K., Ahamad. T., Alam, M., and Naushad, M. 2020. "Process intensification and comparison of bioethanol production from food industry waste (potatoes) by ultrasonic assisted acid hydrolysis and enzymatic hydrolysis: Statistical modelling and optimization." *Biomass Bioenergy.*, 14: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105752>.

Tang, K., Baskaran, V., and Nemati, M. 2009. "Bacteria of the sulphur cycle: an overview of microbiology, biokinetics and their role in petroleum and mining industries." *Biochemical Engineering Journal*, 44: 73-94. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2008.12.011>.

Tao, R. (2019). Nutrient and organic matter removal from wastewaters with microalgae. PhD thesis, Environmental Technology, Université Paris-Est; Paris, 153, France.

Tian, H., Gao, P., Chen, Z., Li, Y., Li, Y., Wang, Y., Zhou, J., Li, G., and Ma, T. 2017. "Compositions and Abundances of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Microorganisms in Water-Flooded Petroleum Reservoirs with Different Temperatures in China." *Frontiers In Microbiology*, 08, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00143>.

Villa-Gomez, D., Ababneh, H., Papirio, S., Rousseau, D., and Lens, D.N.L. 2022. "Effect of Sulfide Concentration on the Location of the Metal Precipitates in Inversed Fluidized Bed Reactors." *JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS*, 192: 200–207. <http://hdl.handle.net/1854/LU-3239953>.

Wagenfeld, J.G., Al-Ali, K., Almheiri, S., Slavens, A.F., and Calvet, N. 2019. "Sustainable applications utilizing sulfur, a by-product from oil and gas industry: A state-of-the-art review." *Waste Manag.*, 15: 78-89. doi: 10.1016/j.wasman.2019.06.002.

Wei, J., Hao, X., Van Loosdrecht, M.C.M., and Li, Ji. 2018. "Feasibility analysis of anaerobic digestion of excess sludge enhanced by iron: a review." *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 89: 16-26. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.042>.

Widdel, F. 1988. "Microbiology and ecology of sulfate and sulfur-reducing bacteria." In: Zehnder, A.J.B. (Ed.), *Biology of Anaerobic Microorganisms*. John Wiley and Sons, New York, pp. 469–585.

Xie, S., Tran, H-T., Pu, M., and Zhan, T. 2023. "Transformation characteristics of organic matter and phosphorus in composting processes of agricultural organic waste: Research trends." *Materials Science for Energy Technologies*, 6: 331-342. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2023.02.006>.

Yuya, S., Hamai, T., Tomo, A., Tomohiro, I., Mikio, K., Hiroshi, H., and Takeshi, S. 2019. "Desulfosporosinus spp. were the most predominant sulfate-reducing bacteria in pilot- and laboratory-scale passive bioreactors for acid mine drainage treatment." *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 103, 7783–7793. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10063-2>.

Zhang, Q., Wang, H., and Lu, C. 2020. "Tracing sulfate origin and transformation in an area with multiple sources of pollution in northern China by using environmental isotopes and Bayesian isotope mixing model." *Environ Pollut.* 265: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115105>.

Zhang, Y., Li, T., Shen, Y., Wang, L., Zhang, H., Qian, H., and Oi, X. 2020. "Extrusion followed by ultrasound as a chemical-free pretreatment method to enhance enzymatic hydrolysis of rice hull for fermentable sugars production". *Ind Crops Prod.* 149: 112356-112370. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112356>.

Zhang, Y., Zhen, Y., Mi, T., He, H., and Yu, Z. 2016. "Molecular characterization of sulfate-reducing bacteria community in surface sediments from the adjacent area of Changjiang Estuary." *Journal of Ocean University of China*, 15: 107-116. <https://doi.org/10.1007/s11802-016-2781-7>.

Zhang, Z., Zang, C., Yang, Y., Zhang, Z., Tang, Y., Su, P., and Lin, Z. 2022. "A review of sulfate-reducing bacteria: Metabolism, influencing factors and application in wastewater treatment." *Journal of Cleaner Production*, 376: 134109-134121. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134109>.

Zhao, Y.G., Wang, A.J. and Ren, N.Q. 2010. "Effect of carbon sources on sulfidogenic bacterial communities during the starting-up of acidogenic sulfate-reducing bioreactors." *Bioresour Technol.* 101: 2952-9. doi: 10.1016/j.biortech.2009.11.098.