

PERFORMANCE DE REATOR UASB NO TRATAMENTO DE VINHAÇA BRUTA PARA PRODUÇÃO DE BIOENERGIA

PERFORMANCE OF A UASB REACTOR TREATING RAW VINASSE FOR BIOENERGY PRODUCTION

Daniel Dias da Silva¹, André Felipe de Melo Sales Santos²

¹ Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil – enge.daniel.dias@gmail.com

² Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil – andre.felipesantos@ufrpe.br

RESUMO

A transição para uma matriz energética descarbonizada e a bioeconomia circular impulsionam a valorização de resíduos agroindustriais. No setor sucroenergético, destaca-se a vinhaça, gerada na proporção de 10 a 15 litros por litro de etanol produzido. Esse efluente apresenta elevada carga orgânica, pH ácido e altos teores de sulfato, podendo causar impactos ambientais quando disposto no solo sem tratamento adequado. Nesse contexto, a digestão anaeróbia em reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) surge como alternativa para o tratamento da vinhaça e a recuperação energética por meio da produção de biogás. Entretanto, a aplicação dessa tecnologia em escala industrial ainda enfrenta desafios relacionados à formação de sulfeto de hidrogênio (H₂S), decorrente da atividade de bactérias redutoras de sulfato, o que reduz o potencial de aproveitamento energético do biogás. Além disso, são escassos os estudos de longa duração realizados em condições reais de operação. Neste estudo, avaliou-se o desempenho de um reator UASB em escala de demonstração industrial (1.000 m³) durante três anos de monitoramento contínuo. O sistema apresentou remoções médias de 92,6% de matéria orgânica, 99,6% de sólidos suspensos, 80,1% de sulfato total, 64,6% de fósforo total e 23,6% de nitrogênio total. O biogás produzido apresentou teor médio de metano de 71%. Contudo, elevadas concentrações de H₂S limitaram a recuperação energética, restringindo a geração elétrica a 0,6 MWh. Os resultados demonstram a viabilidade da tecnologia e a importância de estratégias de dessulfurização para maximizar seu potencial energético.

PALAVRAS-CHAVE: Bioenergia, Reator anaeróbio; Resíduos da indústria sucroalcoólica, Tratamento de Vinhaça.

ABSTRACT

The transition toward a decarbonized energy matrix and the development of a circular bioeconomy have driven the valorization of agro-industrial residues. In the sugarcane industry, vinasse stands out as a major by-product, generated at a rate of 10 to 15 liters per liter of ethanol produced. This effluent is characterized by a high organic load, acidic pH, and elevated sulfate concentrations, which may cause environmental impacts when applied to soil without adequate treatment. In this context, anaerobic digestion in Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactors has emerged as an alternative for vinasse treatment and energy recovery through biogas production. However, the application of this technology at industrial scale still faces challenges related to hydrogen sulfide (H₂S) formation resulting from the activity of sulfate-reducing bacteria, which reduces the energy recovery potential of biogas. Furthermore, long-term studies conducted under real operating conditions remain scarce. This study evaluated the performance of a 1,000 m³ UASB reactor operating at industrial demonstration scale over a three-year continuous monitoring period. The system achieved average removal efficiencies of 92.6% for organic matter, 99.6% for suspended solids, 80.1% for total sulfate, 64.6% for total phosphorus, and 23.6% for total nitrogen. The produced biogas presented an average methane content of 71%. However, high H₂S concentrations limited energy recovery, restricting electricity generation to 0.6 MWh. The results demonstrate the feasibility of this technology and highlight the importance of desulfurization strategies to maximize its energy recovery potential.

KEYWORDS: Bioenergy; Anaerobic reactor; Sugarcane industry residues; Vinasse treatment.

INTRODUÇÃO

A transição para uma matriz energética descarbonizada e o avanço da bioeconomia circular têm impulsionado a valorização de resíduos e efluentes agroindustriais como fontes de energia renovável e insumos para processos produtivos sustentáveis (ASLAN et al., 2025).

Nesse contexto, o setor sucroenergético destaca-se pelo elevado potencial de aproveitamento energético de seus subprodutos, especialmente da vinhaça, principal efluente gerado durante a produção de etanol (PENTEADO, 2022).

A vinhaça é produzida em volumes elevados, variando entre 10 e 18 L por litro de etanol produzido, e caracteriza-se por apresentar elevada carga orgânica, demanda química de oxigênio (DQO) entre 40 e 80 g L⁻¹, pH ácido e concentrações significativas de nutrientes e compostos sulfurados (DA SILVA et al., 2019; LÓPEZ et al., 2018).

As características físico-químicas da vinhaça (tabela 1) variam em função da matéria-prima utilizada, do tipo de mosto, das condições de cultivo da cana-de-açúcar e dos parâmetros operacionais da destilaria (ESPINOZA-ESCALANTE et al., 2009; KEE, 2025). Essas variações influenciam diretamente o potencial de biodegradação do efluente, a produção de biogás e o desempenho dos sistemas de tratamento anaeróbio (BALAKRISHNAN, 2024; MAKWAKWA, 2026).

Tabela 1. Características físico-química da vinhaça de diferentes tipos de mosto

Parâmetros	Médias		
	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2–5,0	3,5–4,6	4,4–4,6
Temperatura (°C)	80–100	80–100	80–100
DBO ₅ (g L ⁻¹ O ₂)	25,0	6,0–16,5	19,8
DQO (g L ⁻¹ O ₂)	65,0	15–35	45,0
Sólidos totais (g L ⁻¹)	81,5	23,7	52,7
Sólidos voláteis (g L ⁻¹)	60,0	20,0	40,0
Sólidos fixos (g L ⁻¹)	21,5	3,7	12,7
Nitrogênio (g L ⁻¹)	0,45–1,60	0,15–0,70	0,48–0,71
Cálcio (g L ⁻¹)	0,45–5,18	0,13–1,54	1,33–4,57
Magnésio (g L ⁻¹)	0,42–1,52	0,20–0,49	0,58–0,70
Sulfato (g L ⁻¹)	6,40	0,60–0,76	3,70–3,73

Fósforo (g L ⁻¹)	0,10–0,29	0,09–0,50	0,09–0,20
Carbono (g L ⁻¹)	11,2–22,9	5,7–13,4	8,7–12,1
Potássio (g L ⁻¹)	3,74–7,83	1,01–2,10	3,34–4,60
Cobre (g L ⁻¹)	—	0,001–0,078	—
Ferro (g L ⁻¹)	—	0,045–0,110	—
Manganês (g L ⁻¹)	—	0,001–0,005	—
Zinco (g L ⁻¹)	—	0,002–0,003	—

Entre as tecnologias disponíveis para o tratamento da vinhaça, os reatores anaeróbios de alta taxa, especialmente os do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), destacam-se pela elevada retenção de biomassa, capacidade de operar com altas cargas orgânicas e potencial de recuperação energética por meio da produção de biogás (CHERNICHARO, 2016; MAINARDIS et al., 2020).

Os reatores UASB podem alcançar elevadas eficiências de remoção de matéria orgânica (superior a 70%), convertendo parte significativa da carga biodegradável em metano (CH₄), combustível renovável de elevado valor energético (BOIOCCHI et al., 2022; DA SILVA et al., 2019).

Entretanto, sua aplicação em escala industrial ainda enfrenta desafios relacionados à competição entre bactérias redutoras de sulfato (BRS) e arqueias metanogênicas, favorecendo a formação de sulfeto de hidrogênio (H₂S) no biogás (PARSAEE, 2019). Além de reduzir a eficiência da metanogênese, o H₂S apresenta caráter corrosivo e limita o aproveitamento energético do sistema (WESTERMANN & AHRING, 1987).

Embora a digestão anaeróbia da vinhaça tenha sido amplamente estudada, a maior parte das informações disponíveis foi obtida em escala laboratorial ou piloto. Assim, ainda são escassos os dados de longo prazo obtidos em condições reais de operação, especialmente sobre estabilidade biológica, remoção de poluentes e desempenho energético de unidades industriais.

Diante desse cenário, este estudo avaliou o desempenho operacional de um reator UASB em escala de demonstração industrial (1.000 m³), empregado no tratamento anaeróbio de vinhaça para produção de energia elétrica. A avaliação foi realizada a partir do monitoramento contínuo da unidade durante três anos (36 meses), com foco na eficiência de remoção de poluentes, na estabilidade operacional do processo, na qualidade do biogás produzido e nos fatores que influenciam o aproveitamento energético do sistema.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da unidade de demonstração para tratamento de vinhaça

A avaliação foi realizada na unidade de valorização energética de vinhaça desenvolvida pela Cetrel Bioenergia Ltda. e atualmente pertencente à Usina JB (Grupo Alcoolquímica Ltda.).

A unidade, em escala de demonstração industrial, ocupa aproximadamente 7.000 m² e utiliza um reator anaeróbio do tipo UASB modificado, com volume útil de 1.000 m³.

O sistema possui motorizador com potência nominal de 1 MW e trata aproximadamente um quarto da vinhaça gerada durante a produção de etanol.

O processo é constituído por três etapas: (i) pré-tratamento da vinhaça; (ii) digestão anaeróbia; e (iii) aproveitamento energético do biogás.

Na etapa de pré-tratamento, a vinhaça bruta proveniente da destilaria, com temperatura entre 90 e 95 °C e pH entre 3,5 e 4,5, é resfriada em trocador de calor de placas acoplado a uma torre de resfriamento até aproximadamente 40 °C, temperatura adequada à operação mesofílica do reator. Em seguida, o efluente é encaminhado para um tanque cilíndrico vertical de 300 m³, dimensionado para vazão máxima de 60 m³ h⁻¹, onde ocorre a sedimentação dos sólidos decantáveis e o resfriamento complementar da vinhaça.

Na etapa de digestão anaeróbia, a vinhaça pré-tratada é bombeada para o reator UASB, cujas dimensões são 12 m × 14 m × 6 m, correspondendo ao volume útil de 1.000 m³. Durante a digestão anaeróbia, a matéria orgânica é convertida em biogás por microrganismos anaeróbios. O biogás produzido é coletado na parte superior do reator e conduzido a um gasômetro de dupla membrana com capacidade de 500 m³, onde permanece armazenado até sua utilização.

O efluente tratado é destinado à fertirrigação dos canais juntamente com a vinhaça excedente da usina. O lodo anaeróbio permanece retido no reator para manutenção da biomassa ativa.

Na etapa de recuperação energética, o biogás armazenado é encaminhado a um motorizador do ciclo Otto, com potência nominal de 1 MW e eficiência elétrica aproximada de 39%, para geração de energia elétrica.

Parâmetros analíticos

Foram monitorados os seguintes parâmetros da vinhaça: demanda química de oxigênio (DQO), pH, temperatura, alcalinidade total (AT), ácidos graxos voláteis (AGV), nitrogênio total, fósforo total e enxofre total.

O lodo granular anaeróbio foi caracterizado sob os seguintes parâmetros: pH, Série de sólidos e Nutrientes.

As análises foram realizadas seguindo aos protocolos do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al. 2005) no Laboratório da unidade de Bioenergia da planta industrial (Cetrel Bioenergia Ltda. e Usina JB S.A.).

As análises do biogás foram realizadas por cromatografia gasosa em amostragem em triplicata. As amostras foram transportadas após a coleta na entrada do Gasômetro da Unidade em bags de polietileno de 1L e prontamente lavadas para análise no laboratório do Grupo de Resíduos Sólido (GRS/DEC/UFRPE).

Parâmetros operacionais e de desempenho

O desempenho do sistema foi avaliado por meio de parâmetros operacionais, indicadores de estabilidade do processo anaeróbio, produção de biogás e desempenho energético.

Os parâmetros operacionais incluíram eficiência de remoção de DQO, vazão de operação, carga orgânica volumétrica aplicada (COV) e tempo de detenção hidráulica (TDH).

A estabilidade do processo foi avaliada pela relação entre ácidos graxos voláteis e alcalinidade total (AGV/AT) e pelo consumo de agente alcalinizante por metro cúbico de vinhaça tratada.

A produção de biogás foi analisada por meio da vazão de biogás, relação entre volume de vinhaça tratada e volume de biogás produzido e teor de metano.

O desempenho energético foi avaliado pela relação entre o volume de vinhaça tratada e a energia elétrica gerada (MWh).

Banco de dados do monitoramento, pontos de amostragem e análise estatística

Os dados analisados foram referentes às características qualitativas da vinhaça, do lodo anaeróbio e da produção de biogás, obtidos ao longo de três safras consecutivas (setembro a março), durante a operação do sistema.

O monitoramento e, conseqüentemente, a obtenção

dos dados foram realizados em diferentes pontos do processo da unidade de tratamento de vinhaça, definidos como: P0 (entrada – vinhaça bruta), P1 (saída do tanque de mistura), P4 (entrada do reator UASB) e P5 (saída do reator UASB), permitindo a avaliação do desempenho em cada etapa do tratamento.

Os dados operacionais foram organizados e tabelados em planilhas eletrônicas Microsoft Excel 2010® ao longo do período monitorado.

Com a consolidação desses dados, foi realizada análise estatística descritiva, incluindo o cálculo de médias, desvio-padrão, valores máximos e mínimos e coeficiente de variação. Adicionalmente, foram construídos gráficos do tipo boxplot com o auxílio dos softwares SPSS Statistics 2022® e Origin 2019b®, visando à visualização da dispersão e variabilidade dos dados.

Por fim, os resultados obtidos foram comparados com dados reportados na literatura científica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise das características físico-químicas da vinhaça

Os resultados do monitoramento da unidade estão apresentados na Tabela 2 e nas Figuras 1 e 2.

A Tabela 2 compila a estatísticas descritivas (médias, máximos, mínimos, desvios-padrão, coeficientes de variação (CV) e o número de determinações (ND) para três pontos de amostragem: P0, P1 e P5.

De forma geral, as características físico-químicas da vinhaça bruta (P0-P1) apresentaram similaridade com os estudos anteriores de Orlando & Leme (1984) e Cortez et al. (1992) para vinhaça predominantemente de caldo, enquanto os efluentes tratados (P5) foram consistentes com sistemas anaeróbios reportados na literatura de España-Gamboa et al., (2017); López et al., (2018) e Contreras-Contreras et al., (2020), embora variações sejam esperadas devido à heterogeneidade do substrato e às condições operacionais.

pH

O pH apresentou valor médio de 3,2 nos pontos P0 e P1 (Figura 1A), caracterizando a elevada acidez típica da vinhaça bruta e estando em concordância com os valores reportados na literatura para vinhaça proveniente de mosto de caldo (ORLANDO & LEME, 1984; CORTEZ et al., 1992). Em contrapartida, o efluente tratado (P5) apresentou pH médio de 7,1, evidenciando a eficiência do sistema na neutralização do efluente.

Essa alteração é fundamental para a estabilidade da digestão anaeróbia, uma vez que valores próximos da neutralidade favorecem a atividade dos microrganismos metanogênicos (CAMPOS, 2009). O ajuste do pH foi promovido pela recirculação da vinhaça tratada e pela dosagem de solução de NaOH a 40%, garantindo condições adequadas para a operação do reator.

Os valores observados no ponto P5 são consistentes com os relatados por López et al. (2018) e Contreras-Contreras et al. (2020), que também destacam a importância da manutenção do pH próximo à neutralidade para a estabilidade operacional do reator e para o aproveitamento agronômico do efluente tratado.

Temperatura

A temperatura apresentou redução progressiva entre os pontos P0 e P1, com decréscimo de 37,8% (Figura 1B). As temperaturas médias foram de aproximadamente 55,88 °C em P0 e 45,1 °C em P1, valores superiores à faixa ideal de operação mesofílica do reator.

De acordo com Campos (2009), variações de temperatura podem afetar diretamente a atividade dos microrganismos anaeróbios, influenciando a cinética metabólica, o equilíbrio iônico e a solubilidade dos substratos.

No presente estudo, esse efeito foi minimizado pela recirculação da vinhaça tratada (≈32 °C), que promoveu a homogeneização térmica no tanque de mistura, onde a temperatura foi estabilizada em 32,2 °C.

Dessa forma, o sistema operou dentro da faixa mesofílica (20–40 °C), considerada a mais adequada para a estabilidade e eficiência da digestão anaeróbia.

Tabela 2. Características físico-químicas da vinhaça bruta e tratada

Vinhaça bruta – P0					
PARÂMETROS	Média e desvio padrão	Máximo	Mínimo	CV	ND
pH	3,2 ± 0,4	5,11	2,68	0,12	349
Temperatura (°C)	55,88 ± 9,3	78,5	30,0	0,17	336
DQO (mg.L ⁻¹ .O ₂)	42.123,4 ± 15.936,8	102.447,	11.223,0	0,38	312
Sólidos Sedimentáveis (mg.L ⁻¹)	169,2 ± 182,7	990,0	0,00	-	268
Nitrogênio Total (mg.L ⁻¹)	194,3 ± 128,7	450,0	20,0	0,66	27
Nitrogênio Amoniacal (mg.L ⁻¹)	9,2 ± 5,7	25,0	1,8	0,62	27
Sulfato Total (mg.L ⁻¹)	1.017,4 ± 384,1	2,100,0	390,0	0,38	27
Fósforo Total (mg.L ⁻¹)	354,4 ± 347,2	987,0	6,3	-	26
Vinhaça bruta (resfriada) – P1					
PARÂMETROS	Média e desvio padrão	Máximo	Mínimo	CV	ND
pH	3,2 ± 0,3	5,1	2,7	0,05	405
Temperatura (°C)	45,1 ± 5,6	58,7	29,0	0,12	406
DQO (mg.L ⁻¹ .O ₂)	35.134,2 ± 13.106,6	90.910,0	9.986,0	0,37	403
Sólidos Sedimentáveis (mg.L ⁻¹)	12,7 ± 60,6	900,0	0,00	-	370
Vinhaça tratada – P5					
PARÂMETROS	Média e desvio padrão	Máximo	Mínimo	CV	ND
pH	7,1 ± 0,40	8,01	6,35	0,05	413
Temperatura (°C)	32,2 ± 3,41	32,17	20,00	0,11	410
DQO (mg.L ⁻¹ .O ₂)	3.106,3 ± 2.734,6	13.494,0	29,0	0,88	403
Sólidos Sedimentáveis (mg.L ⁻¹)	0,63 ± 2,15	30,40	0,00	-	379
Alcalinidade Total (mg.L ⁻¹)	4.062,8 ± 840,41	6.195,0	1.113,0	0,21	413
AGV (mg.L ⁻¹)	1.183,4 ± 418,00	3.060,5	216,00	0,35	413
AGV/AT	0,29	0,50	0,49	0,19	413
Sulfetos (mg.L ⁻¹)	7.682,8 ± 4.724,70	18.525,0	1.850,0	0,62	46
Nitrogênio Total (mg.L ⁻¹)	148,50 ± 145,60	475,00	10,00	-	27
Nitrogênio Amoniacal (mg.L ⁻¹)	11,46 ± 20,128	70,00	1,00	-	27
Sulfato Total (mg.L ⁻¹)	272,93 ± 255,063	950,00	19,00	0,93	27
Fosforo Total (mg.L ⁻¹)	152,42 ± 128,431	432,00	1,70	-	26

Matéria orgânica (DQO)

A DQO apresentou valores médios de 42.123,4 mg L⁻¹ em P0 e 35.134,2 6 mg L⁻¹ em P1, compatíveis com os valores reportados para vinhaça por Orlando & Leme (1984) e Cortez et al. (1992).

Após o tratamento anaeróbio, observou-se redução expressiva para 3.106,3 mg L⁻¹ em P5, correspondendo a uma eficiência média de remoção de 92,6% (Figura 1C).

Essa elevada eficiência evidencia o bom desempenho do reator UASB na remoção da matéria orgânica, superando os valores reportados por España-Gamboa et al. (2017), que obtiveram remoção de 48% em sistemas

alimentados com vinhaça diluída, e por Contreras-Contreras et al. (2020), que relataram eficiências entre 49% e 58% sob diferentes condições operacionais.

O desempenho observado pode ser atribuído às condições operacionais adotadas na unidade, que favoreceram a estabilidade da digestão anaeróbia.

O controle do pH por meio da recirculação da vinhaça tratada e da dosagem de NaOH manteve o meio próximo à neutralidade, condição essencial para a atividade dos microrganismos metanogênicos. Além disso, a estabilização da temperatura na faixa mesofílica, o controle da vazão de alimentação e do tempo de detenção hidráulica (TDH), bem como a aplicação controlada da carga orgânica volumétrica, contribuíram para manter elevada atividade biológica e favorecer a conversão da matéria orgânica em biogás.

A elevada remoção de DQO também está diretamente relacionada ao potencial de recuperação energética da vinhaça, uma vez que a fração biodegradável da matéria orgânica constitui o principal substrato para a produção de metano.

Assim, a elevada eficiência alcançada demonstra não apenas a capacidade do sistema em reduzir a carga orgânica do efluente, mas também em maximizar o aproveitamento energético do processo anaeróbio.

Alcalinidade, AGV e relação AGV/AT

A estabilidade do processo anaeróbio é amplamente avaliada pela alcalinidade e pelos ácidos graxos voláteis (AGVs) do que pelo pH isoladamente (ELAZHAR, 2022). A relação AGV/AT é um indicador amplamente utilizado para controle operacional de digestores (ANGELIDAKI & AHRING, 1997; ELAZHAR, 2022).

Os valores médios obtidos foram 4,062.8 mg L⁻¹ (AT) e 1,183.4 mg L⁻¹ (AGV), resultando em uma relação AGV/AT média de 0.28 (Figura 1-D e E). Este valor encontra-se dentro da faixa de estabilidade operacional, inferior a 0,4, indicando que o reator operou sob condições estáveis, sem evidências de acidificação do processo anaeróbio (FIRMINO, 2013).

Nutrientes (N, P e S)

Os nutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S) desempenham papel fundamental na digestão anaeróbia, pois participam do metabolismo microbiano e influenciam diretamente a estabilidade do processo. Em sistemas anaeróbios, sua disponibilidade é frequentemente avaliada pela relação DQO:N:P de aproximadamente

500:5:1, considerada adequada para o desenvolvimento da biomassa (DEL VECCHIO, 2024).

O nitrogênio total (NT) apresentou concentração média de 194,3 mg L⁻¹ em P1 e 148,50 mg L⁻¹ em P5 (Figura 2A), correspondendo a uma remoção média de 23%. Os valores observados na alimentação do reator foram compatíveis com aqueles descritos por Orlando & Leme (1984) e Cortez et al. (1992) para vinhaça proveniente predominantemente de mosto de caldo. Para o efluente tratado, os resultados também se mantiveram próximos aos reportados por España-Gamboa et al. (2017), embora inferiores ao valor médio de 408 ± 91 mg L⁻¹ descrito pelos autores.

O nitrogênio amoniacal (NA) apresentou concentrações médias de 9,2 mg L⁻¹ em P1 e 11,46 mg L⁻¹ em P5 (Figura 2D). Os valores observados na entrada do sistema foram semelhantes aos relatados por Orlando & Leme (1984) e Cortez et al. (1992), enquanto no efluente tratado permaneceram inferiores aos descritos por España-Gamboa et al. (2017). Essas concentrações indicam que a amonificação ocorreu sem acúmulo excessivo de nitrogênio amoniacal, reduzindo o risco de inibição da atividade metanogênica.

O fósforo total (PT) apresentou redução média de 57%, passando de 354,4 mg L⁻¹ em P1 para 152,42 mg L⁻¹ em P5 (Figura 2B). Apesar da remoção observada, as concentrações finais permaneceram na faixa reportada por España-Gamboa et al. (2017), indicando que parte desse nutriente permanece disponível no efluente tratado. Esse comportamento é esperado, uma vez que o fósforo é parcialmente assimilado pela biomassa anaeróbia, mas não é removido de forma expressiva durante a digestão anaeróbia.

De forma geral, os resultados de nitrogênio e fósforo indicam que o efluente tratado mantém potencial para aproveitamento agrícola como biofertilizante, embora sua composição dependa das condições operacionais do sistema, como tempo de detenção hidráulica (TDH), temperatura de operação e estabilidade microbiológica do processo.

O enxofre (S), embora seja um nutriente essencial em baixas concentrações, pode comprometer o desempenho da digestão anaeróbia quando presente em excesso, devido à competição entre bactérias redutoras de sulfato (BRS) e Arqueas metanogênicas pelo mesmo substrato (CAMPOS, 2009). Nessas condições, a redução do sulfato favorece a formação de sulfeto de hidrogênio (H₂S), composto que pode reduzir a produção de metano e comprometer o aproveitamento energético do biogás.

Neste estudo, a concentração média de sulfato foi reduzida de 1.017,4 mg L⁻¹ em P0 para 272,93 mg L⁻¹ em P5, correspondendo a uma eficiência média de remoção de 73,2%, valor compatível com os relatos por Orlando & Leme (1984) e España-Gamboa *et al.* (2017).

Em contrapartida, foram observadas elevadas concentrações de sulfetos no efluente tratado (7.682,8 mg L⁻¹; Figura 2C), superiores às reportadas por Contreras-Contreras *et al.* (2020). Esse comportamento sugere intensa atividade das bactérias redutoras de sulfato e explica os elevados teores de H₂S observados no biogás,

fator que limitou o potencial de recuperação energética da unidade.

A elevada variabilidade das concentrações de compostos sulfurados provavelmente está associada às características da vinhaça processada ao longo do período de monitoramento. Por se tratar de uma destilaria anexa, a usina alterna a produção de açúcar e etanol conforme as demandas de mercado, utilizando diferentes tipos de mosto, o que resulta em variações sazonais na composição físico-química da vinhaça e, consequentemente, na disponibilidade de compostos sulfurados para o processo anaeróbio.

Figura 1 - Gráficos boxplot (parâmetros físico-químicos)

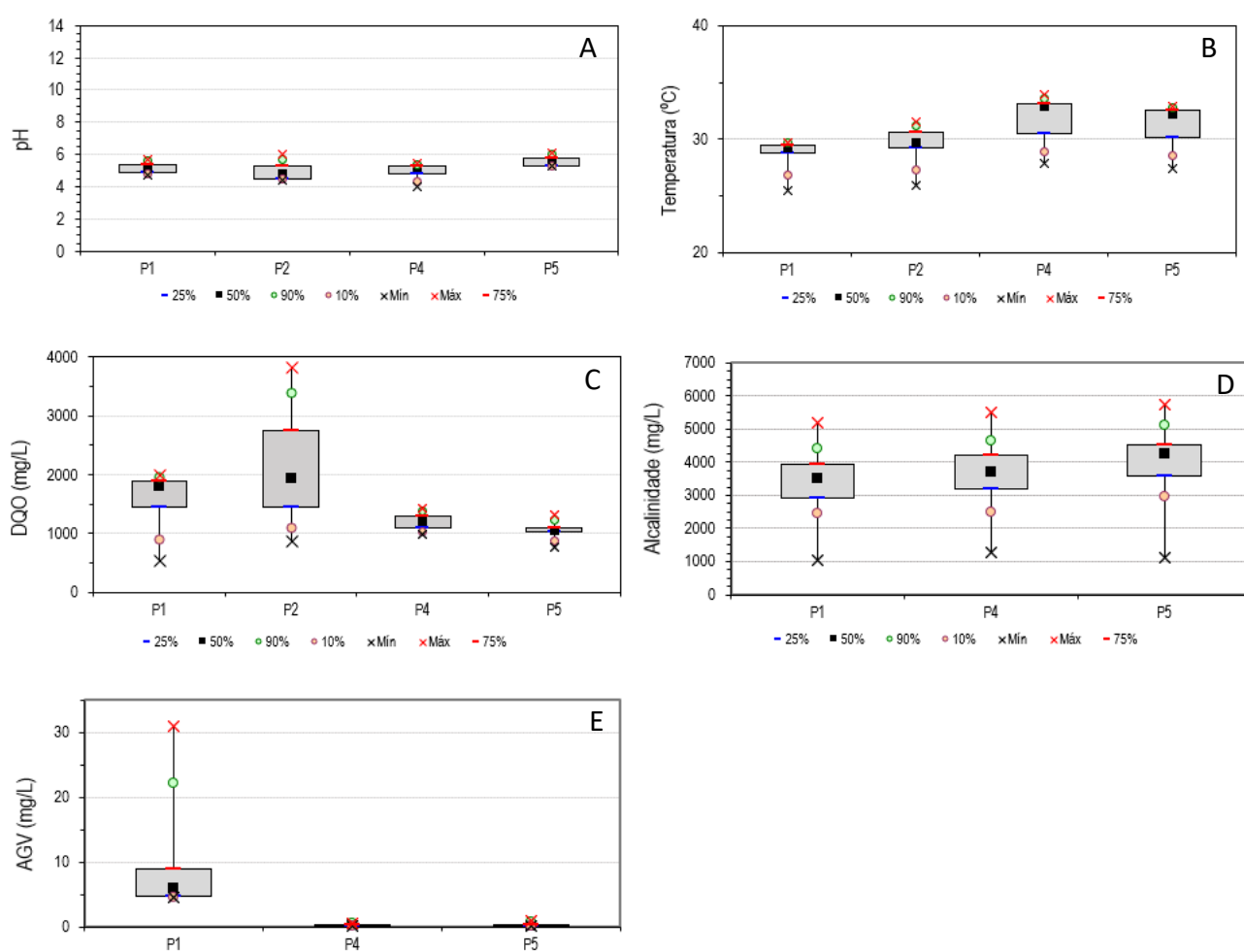
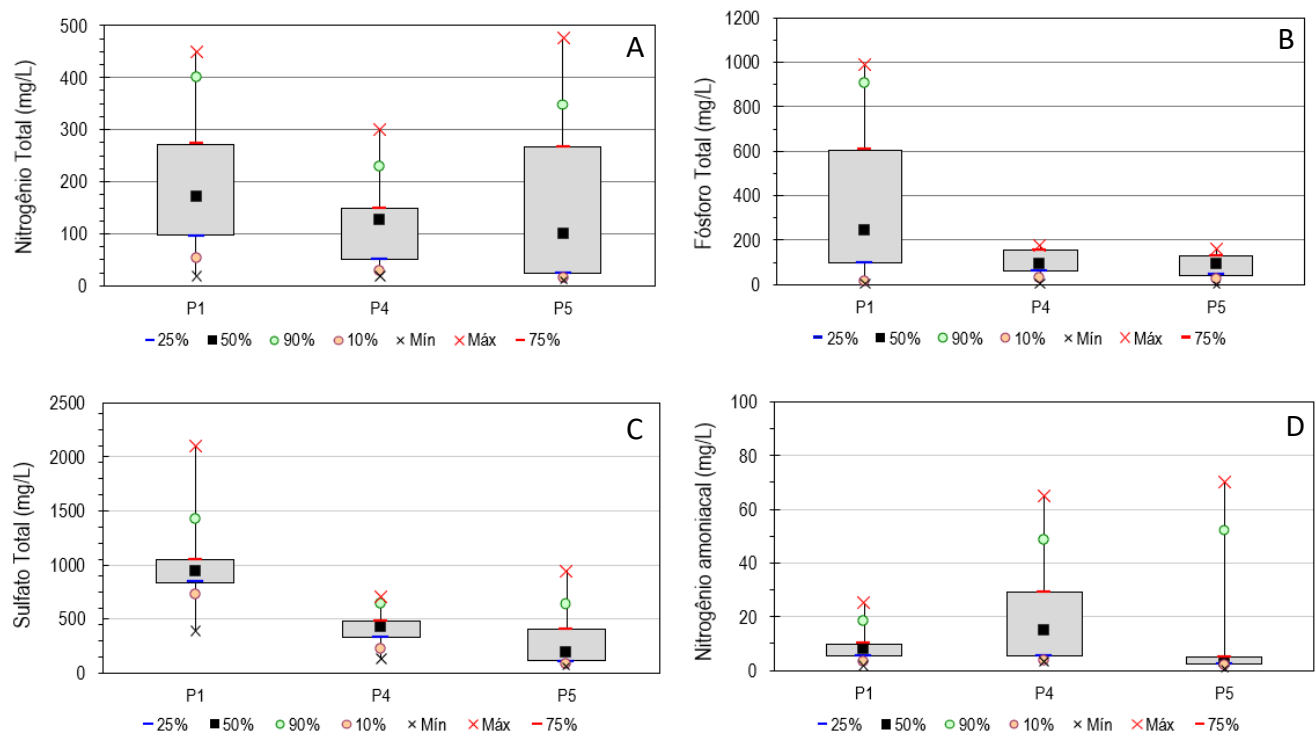


Figura 2 - Gráficos boxplot (nutrientes)



Avaliação das características físico-químicas do lodo anaeróbio obtido do reator

Na Figura 3, pode-se observar as características morfológicas do lodo granular (elutriado) que foi utilizado. Verificou-se granulometria elevada (0,5-0,8mm) e cor negra dos grânulos, caracterizada pela presença de sulfetos no meio líquido.

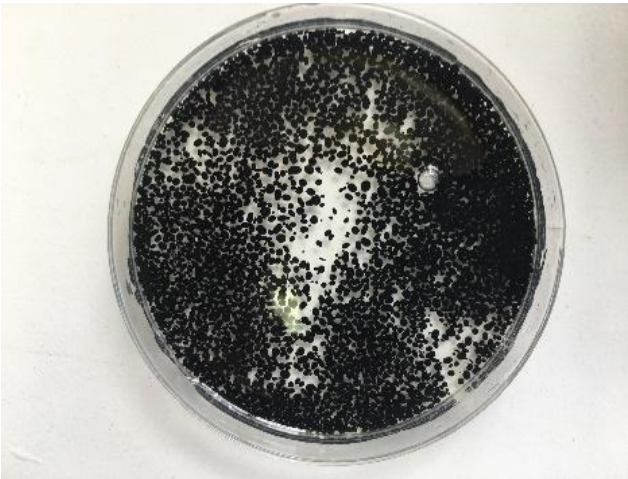


Figura 3. Aspecto do lodo granular obtido do reator UASB

Na Tabela 3 são apresentadas as características do lodo anaeróbio granular obtido no reator UASB. Os resultados indicam elevados teores de sólidos totais voláteis (STV),

refletindo a elevada fração orgânica presente no material e sugerindo potencial para aproveitamento em aplicações que demandem aporte de matéria orgânica ao solo.

A relação C/N observada também indica características compatíveis com materiais orgânicos utilizados em processos de condicionamento e melhoria da qualidade do solo. Entretanto, a efetiva utilização agrônômica do lodo requer avaliações complementares, incluindo a determinação de macro e micronutrientes, metais potencialmente tóxicos e o atendimento à legislação aplicável.

Adicionalmente, o lodo granular anaeróbio apresenta potencial para reutilização como inóculo em sistemas anaeróbios semelhantes, devido à elevada concentração de biomassa especializada e à sua estrutura granular, característica amplamente reconhecida por favorecer a partida e a estabilização operacional de reatores anaeróbios.

Tabela 3. Características físico-químicas do lodo anaeróbio granular obtido do reator UASB

Parâmetros	Média	Desvio-padrão	CV (%)
pH	7,73	0,004	0,06
STV (%)	79,68	0,255	0,32
STF (%)	20,32	0,255	1,26
N (%)	6,75	-	-
C (%)	37,1	-	-

S (%)	2,45	-	-
H (%)	2,27	-	-
C/N	5,5	-	-

Legenda: C/N=relação carbono/nitrogênio; CV=coeficiente de variação

Avaliação das características do biogás gerado e suas potencialidades de aproveitamento energético

Na Figura 4, apresenta-se a caracterização média do biogás gerado na unidade de tratamento de vinhaça (reator UASB). Observou-se que os percentuais de metano comuns em processos anaeróbios se situam entre 50-70% em concentração de CH₄, sendo o biogás gerado com excelente potencial de aproveitamento energético, seja para geração de energia (queima em caldeiras, motogeradores, microturbinas) ou podendo ainda ser utilizado para produção de GNV (gás natural veicular) após purificação e concentração por processos adicionais.

Na unidade estudada o Biogás gerado era queimado para produção de energia elétrica interligada a rede de distribuição (GRID).

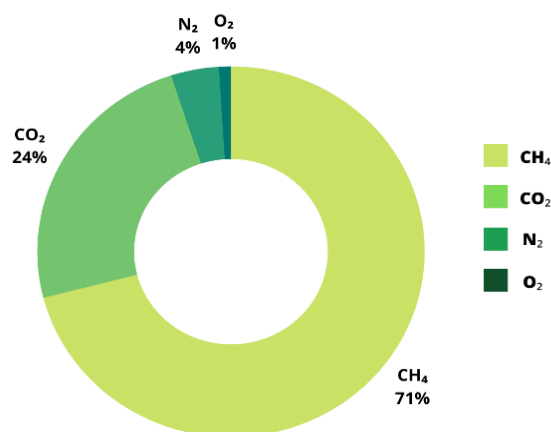


Figura 4. Característica média do biogás gerado na unidade tratamento de vinhaça estudada (reator UASB)

Parâmetros Operacionais e de desempenho do reator

Na Tabela 4 são apresentados os principais indicadores de performance operacional e de processo observados na unidade de demonstração.

Performance biológica e eficiências de remoção

A unidade demonstrou uma performance biológica excepcional no que tange à remoção de carga orgânica. A eficiência de DQO de ~92% supera significativamente a média reportada na literatura para reatores UASB tratando vinhaça, que geralmente oscila entre 70% e 80%.

Este resultado indica uma biomassa adaptada e condições hidráulicas favoráveis, apesar da Carga Orgânica Volumétrica (COV) de 6 kgDQO/m³.dia ainda ser considerada baixa para o potencial do sistema (que suportaria até 20 kgDQO/m³.dia).

A relação AT/AGV de ~0,28 confirma, entretanto, que o sistema operou em uma faixa de estabilidade segura, sem riscos de acidificação que poderiam levar a falência do reator.

Tabela 4. Parâmetros relacionados a performance ao reator UASB e motogerador

Parâmetro	Valor médio	Conclusão
Carga orgânica volumétrica (COV)	6 kgDQO/m ³ .dia	Valor Baixo, pode atingir até 20 kgDQO/m ³ .dia
Vazão máxima de vinhaça bruta	até 6 m ³ /h	Varia a depender das características da vinhaça
Eficiência de remoção em DQO	~92 %	Acima das expectativas para UASB (70%)
Eficiência de remoção em NT	~22%	Valor normal para UASB
Eficiência de remoção em PT	~57%	Valor normal para UASB
Eficiência de remoção em ST	~73	Indicativo de alta geração de H ₂ S; elevada interferência na metanogênese pelas BRS
Relação AT/AGV	~0,28	Dentro da faixa limite (0,1-0,35)
Potência nominal de operação do motogerador (1MWh)	~0,6 MWh	Abaixo do valor nominal (40%)
Porcentagem de metano no Biogás	~71%	Valor normal para UASB
Concentração de H ₂ S no Biogás	3000-5000ppm	Valor muito acima do comum em biogás comum, mas possível para efluentes com elevado teor de enxofre (Toxicidade elevada)
Vazão média de biogás	~60m ³ /h	Valor Baixo, pode atingir até 300 m ³ /h
Relação biogás/vinhaça tratada	10 m ³ CH ₄ /m ³ vinhaça	Dentro do esperado (10-12 m ³ CH ₄ / m ³ vinhaça)

Legenda: NT=Nitrogênio total; PT=Fósforo Total; ST=Enxofre total; AGV=Ácidos graxos voláteis; At=Alcalinidade total

Concentração de enxofre e inibição por BRS

O principal gargalo operacional identificado reside na dinâmica da concentração do enxofre presente no biogás

na forma de H_2S e proveniente da redução de sulfato presente no efluente pelas BRS (bactérias redutoras de sulfato). A eficiência de remoção de enxofre de ~73% e devido ao processo de Filtro biológico aerado utilizado na unidade. Entretanto, a concentração de H_2S no biogás da ordem de 3000-5000 ppm são críticas, independente da eficiência de remoção visto que:

- Impacto na metanogênese: a elevada atividade das bactérias redutoras de sulfato (BRS) que competem diretamente com as *Arqueas* metanogênicas pelo substrato na presença de sulfato.
- Toxicidade: níveis de H_2S acima de 3000 ppm são altamente tóxicos para o consórcio microbiano e corrosivos para a infraestrutura e também problemáticos para segurança operacional na unidade de bioenergia
- Rendimento de biogás: embora a relação biogás/vinhaça ($10 \text{ m}^3/\text{m}^3$) esteja no padrão esperado, a vazão média de biogás de $60 \text{ m}^3/\text{h}$ é apenas 20% do potencial máximo de $300 \text{ m}^3/\text{h}$, sugerindo que o sistema está operando subutilizado ou sofrendo inibição parcial.

Limitações energéticas e conversão

A performance do motorizador é o ponto mais sensível da análise. A geração de 0,6 MWh representa apenas 60% da capacidade nominal (1 MWh), operando 40% abaixo do esperado. Esta ineficiência está diretamente ligada à qualidade do biogás: o alto teor de H_2S exige sistemas de purificação (dessulfurização) robustos para evitar danos ao motor e perda de rendimento térmico. A porcentagem de metano (~71%) é satisfatória, confirmando que a qualidade do biocombustível não é o principal problema, mas sim a presença de H_2S e sua influência na competição entre BRS e *Archeas* metanogênicas levando a uma redução na vazão volumétrica.

Medidas mitigadoras para melhoria da performance

Para elevar a unidade da escala de demonstração para a escala plena e comercial, as seguintes intervenções são sugeridas:

- Aumento gradual da COV: elevação gradual da COV para patamares próximos a 15-20 $\text{kgDQO}/\text{m}^3\text{d}$, visando maximizar a produção volumétrica de biogás e aproveitar a estabilidade do reator (relação AT/AGV de 0,28).

- Dessulfurização pré-combustão: instalar sistema de dessulfurização (filtros de carvão ativado ou lavadores biológicos de gases, como bio-scrubbers) para reduzir a concentração do H_2S a níveis inferiores a 500 ppm. A redução do H_2S protege o motorizador, contra a corrosão e favorece contribui com aumento da eficiência da digestão anaeróbia reduzindo a competição das BRS e metanogênica.
- Fertirrigação e tratamento terciário: as baixas eficiências de remoção de nitrogênio (22%) e Fósforo (57%) são comuns nos tratamentos anaeróbios. Caso o descarte da vinhaça tratada não seja via fertirrigação, sistemas complementares (como lodos ativados ou processos de oxidação avançada) seriam necessários para atender legislações ambientais mais restritivas.
- Controle da inibição por sulfato: avaliar a micro aeração do reator ou a precipitação química de sulfetos para reduzir a toxicidade às *Arqueas* metanogênicas e minimizar a interferência das BRS na metanogênese.

CONCLUSÕES

A unidade de demonstração apresentou elevado desempenho no tratamento da vinhaça, alcançando eficiência de remoção de matéria orgânica superior aos valores normalmente reportados para reatores UASB. Entretanto, a operação ocorreu aquém de sua capacidade potencial, com uma Carga Orgânica Volumétrica máxima de $6 \text{ kgDQO}/\text{m}^3\text{.dia}$ e vazão de biogás $\sim 60 \text{ m}^3/\text{h}$, significativamente inferiores aos limites de projeto de $20 \text{ kgDQO}/\text{m}^3\text{.dia}$ e $300 \text{ m}^3/\text{h}$, respectivamente. O principal limitador técnico identificado foi a alta concentração de H_2S no biogás, decorrente da elevada concentração de sulfato na vinhaça bruta e da consequente concorrência da atividade de bactérias redutoras de sulfato (BRS), com as *Archeas* metanogênicas o que manteve a performance do motorizador a biogás em 60% de sua potência nominal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de Pernambuco e ao PIBIC/UFRPE/CNPq pela Concessão da Bolsa de iniciação Científica. Também agradecemos a Usina JB e a Cetrel pela disponibilização das informações e ao Laboratório GRS pelas análises de biogás realizadas.

REFERÊNCIAS

ANGELIDAKI, I.; AHRING, B.K. Codigestion of olive oil mill wastewaters with manure, household waste or sewage sludge. **Biodegradation**, v.8, n.4, p.221-226, 1997.

APHA et al. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21. ed. Washington: American Public Health Association, 2005.

ASLAN, N. et al. Circular economy approach to promote sustainable energy from waste. **Sustainable Futures**, v. 10, p. 101-238, 2025.

BALAKRISHNAN, D. Exploring the potential of sugarcane vinasse for biogas and biofertilizer Production: A catalyst for advancing the bioeconomy. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 61, p. 103474, 2024.

BOIOCCHI, R. et al. Modeling and optimization of an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) system treating blackwaters. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.10, n.3, p. 107614, 2022.

CAMPOS, J.R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores anaeróbios**. 2.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2016.

CONTRERAS-CONTRERAS, J.A. et al. Polyphenols from sugarcane vinasses, quantification, and removal using activated carbon after biochemical treatment in laboratory-scale thermophilic upflow anaerobic sludge blanket reactors. **Water, Air, and Soil Pollution**, v.231, n.8, p.1-12, 2020.

CORTEZ, L. et al. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, v.2, n.2, p.1-17, 1992.

DA SILVA, M.M. et al. Aproveitamento da vinhaça residual da produção do etanol para geração de biogás. **RETEC-Revista de Tecnologias**, v.12, n.2, p.5-10, 2019.

DEL VECCHIO, G.R.S. **Codigestão anaeróbia de melaço e torta de filtro de cana-de-açúcar em reatores UASB em série: efeitos da carga orgânica volumétrica e adição de biochar**. 2024. 139p. (Dissertação de mestrado).

ELAZHAR, M. et al. Influence of volatile fatty acids/alkalinity ratio on methane production during mesophilic anaerobic digestion: stability, efficiency and optimization. **Desalination and Water Treatment**, v. 257, p. 142-149, 2022.

ESPAÑA-GAMBOA, E. et al. Pretreatment of vinasse from the sugar refinery industry under non-sterile conditions by *trametes versicolor* in a fluidized bed bioreactor and its effect when coupled to an UASB reactor. **Journal of Biological Engineering**, v.11, n.1, p.1-11, 2017.

ESPINOZA-ESCALANTE, F.M. et al. Anaerobic digestion of the vinasses from the fermentation of Agave tequilana Weber to tequila: the effect of pH, temperature and hydraulic retention

time on the production of hydrogen and methane. **Biomass and Bioenergy**, v.33, n.1, p.14-20, 2009.

FIRMINO, P.I.M. **Tratamento anaeróbio e microaeróbio de águas sintéticas contaminadas com BTEX**. 2013. 183p. (Tese de doutorado).

KEE, W.C. et al. Advanced treatment of sugarcane vinasse via hybrid photocatalytic sequencing batch biofilm reactor (HP-SBBR): A combined physicochemical and biological approach. **Bioresource Technology Reports**, v.32 p. 102335, 2025.

LÓPEZ, I. et al. Anaerobic treatment of sugar cane vinasse: treatability and real-scale operation. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v.93, n.5, p.1320-1327, 2018.

MAINARDIS, M. et al. Up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) technology for energy recovery: a review on state-of-the-art and recent technological advances. **Bioengineering**, v.7, n.2, p.43, 2020.

MAKWAKWA, D.H. et al. Enzymatic pre-treatment of red meat abattoir effluent to reduce fat, oil and grease while enhancing biogas generation. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**. v. 14, p. 101424, 2026.

ORLANDO, F.J.; LEME, E.J. Utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira. **1º Simpósio sobre Fertilizantes na Agricultura Brasileira**. v.10. p. 451-475. 1984.

PARSAEE, M. et al. A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and Bioenergy**, v.122, p.117-125, 2019.

PENTEADO, M.C. **Cenários para Produção de Biometano a partir de Resíduos do Setor Sucroenergético Paranaense**. 2022. 76p. (Dissertação de mestrado).

WESTERMANN, P.; AHRING, B.K. Dynamics of methane production, sulfate reduction, and denitrification in a permanently waterlogged alder swamp. **Applied and Environmental Microbiology**, v.53, n.11, p.2554-2559, 1987.