

REUMAM, v. 10, n. 1, p. 199-216, 2025. ISSN Online: 2595-9239.

DOIS PROBLEMAS, UMA SOLUÇÃO ALTERNATIVA E UM PRODUTO: TRATAMENTO DO REJEITO DA LAMA VERMELHA ATRAVÉS DA DECOMPOSIÇÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS PARA OBTENÇÃO DE TERRA FÉRTIL

Simone de Aviz Cardoso¹

Luana Gessica do Carmo da Silva²

Antonio Sergio Costa Carvalho³

RESUMO: A lama vermelha (LV) é um rejeito hidrometalúrgico proveniente da produção de alumina (Al_2O_3) a partir da digestão da bauxita com hidróxido de sódio (NaOH) pelo processo Bayer, por esse motivo é um rejeito cáustico com valores de pH entre 10 a 13. Ao longo dos anos a grande produção desse rejeito vem gerando preocupações, devido a sua natureza alcalina e ao acúmulo em depósitos chamados bacias de rejeitos, que além de ocuparem vastas áreas de terra são responsáveis por diversos impactos ambientais. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi investigar uma forma alternativa de tratamento do rejeito da LV através do processo de neutralização da lama vermelha com resíduos agroindustriais em decomposição anaeróbia na busca de obter terra fértil. Os resíduos agroindustriais foram a casca de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) e a casca de cacau (*Theobroma cacao*). A metodologia foi baseada no trabalho de Holanda *et al.* (2020), onde a decomposição dos resíduos orgânicos ocorre junto a LV e com monitoramento através do pH. A etapa de neutralização com resíduos agroindustriais foi eficiente. Na etapa de produção da terra fértil, observou-se maior taxa de germinação no rejeito tratado com resíduo de cacau, e ao verificar o pH final das amostras de terra, observou-se um retorno do pH a faixa alcalina, devido a ação do aluminato tricálcio (TCA), demonstrando que a forma de neutralização proposta não foi eficiente para neutralizar permanentemente a LV. Portanto, são necessários mais estudos para o aperfeiçoamento da técnica utilizada visando a segurança das terras produzidos.

PALAVRAS-CHAVE: Agroindustrial; Lama vermelha; Tratamento.

TWO PROBLEMS, AN ALTERNATIVE SOLUTION AND ONE PRODUCT: TREATMENT OF RED MUD WASTE THROUGH ANAEROBIC DECOMPOSITION OF AGROINDUSTRIAL WASTE TO OBTAIN FERTILE LAND

ABSTRACT: The red mud (LV) is a hydrometallurgical waste from alumina (Al_2O_3) production from the digestion of bauxite with sodium hydroxide (NaOH) by the Bayer process, for this reason it is a caustic waste with pH values between 10 and 13. Concerns, due to its alkaline nature and accumulation in deposits called tailings basins, which, in addition to occupying vast areas of land, are responsible for several environmental impacts. In this context, the objective of this study was to investigate an alternative way of treating

1 Professor da Universidade Federal do Pará (UFPA). E-mail: simoneaviz@ufpa.br

2 Mestranda pelo Pós-Graduação em Farmacologia e Bioquímica (PPGFarmabio) e discente do Curso de Especialização em Educação Ambiental e Sustentabilidade do Programa de Formação Interdisciplinar em Meio Ambiente (PROFIMA / NUMA / UFPA). E-mail: luagessics@gmail.com

3 Professor da Universidade Federal do Pará (UFPA). E-mail: ascarvalho@ufpa.br

VL waste through the process of neutralizing the red mud with agro-industrial residues in anaerobic decomposition in order to obtain fertile land. The agro-industrial residues were cupuaçu husk (*Theobroma grandiflorum*) and cocoa husk (*Theobroma cacao*). The methodology was based on the work by Holanda *et al.* (2020), where the decomposition of organic waste occurs with VL and with pH monitoring. The neutralization step with agro-industrial residues was efficient. In the fertile land production stage, a higher germination rate was observed in the waste treated with cocoa residue, and when checking the final pH of the soil samples, a return of the pH to the alkaline range was observed, due to the action of the aluminate tricalcium (TCA), demonstrating that the proposed neutralization method was not efficient to permanently neutralize VL. Therefore, further studies are needed to improve the technique used to ensure the safety of the land produced.

KEYWORDS: Agroindustrial; Red mud; Treatment.

DOS PROBLEMAS, UNA ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN Y UN PRODUCTO: TRATAMIENTO DE LODOS ROJOS MEDIANTE DESCOMPOSICIÓN ANAEROBIA DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA OBTENER TIERRAS FÉRTILES

RESUMEN: El lodo rojo (LV) es un desecho hidrometalúrgico de la producción de alúmina (Al_2O_3) a partir de la digestión de bauxita con hidróxido de sodio (NaOH) por el proceso Bayer, por lo que es un residuo cáustico con valores de pH entre 10 y 13. preocupa, por su naturaleza alcalina y acumulación en depósitos denominados balsas de relaves, que además de ocupar vastas extensiones de terreno, son responsables de diversos impactos ambientales. En este contexto, el objetivo de este estudio fue investigar una forma alternativa de tratamiento de los residuos de VL a través del proceso de neutralización del lodo rojo con residuos agroindustriales en descomposición anaerobia con el fin de obtener tierras fértiles. Los residuos agroindustriales fueron cascarilla de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) y cascarilla de cacao (*Theobroma cacao*). La metodología se basó en el trabajo de Holanda *et al.* (2020), donde la descomposición de los residuos orgánicos se da con VL y con monitoreo de pH. La etapa de neutralización con residuos agroindustriales fue eficiente. En la etapa de producción de tierra fértil se observó una mayor tasa de germinación en los residuos tratados con residuos de cacao, y al verificar el pH final de las muestras de suelo se observó un retorno del pH al rango alcalino, por acción del aluminato tricálcico (TCA), demostrando que el método de neutralización propuesto no fue eficiente para neutralizar permanentemente el VL. Por lo tanto, se necesitan más estudios para mejorar la técnica utilizada para garantizar la seguridad de la tierra producida.

PALABRAS CLAVES: Agroindustrial; Lodo rojo; Tratamiento.

INTRODUÇÃO

A lama vermelha (LV) é um rejeito gerado a partir do processo Bayer, cuja técnica utiliza hidróxido de sódio (NaOH) em alta concentração na digestão da bauxita para que seja obtida a alumina (Al_2O_3). Por esse motivo a LV é um rejeito fortemente alcalino e perigoso, pois possui valores de pH entre 10,5 a 13. Ainda que a lavagem da LV ocorra

para a recuperação de NaOH e do alumínio solúvel, a sua alcalinidade continua elevada (Nascimento *et al.*, 2011; Rai *et al.*, 2013; Archambo; Kawatra, 2020).

A indústria de mineração tem uma participação muito importante na economia e desenvolvimento dos estados em que atua, mas é responsável por grandes impactos ambientais. A preocupação com a LV se deve principalmente por dois motivos: a grande quantidade de LV gerada e sua alcalinidade. Ainda que as práticas atuais da indústria envolvam diferentes técnicas para o armazenamento da LV, o descarte é feito em áreas valiosas de terra ou em corpos hídricos. Em alguns casos também pode ocorrer o rompimento de barragens, causando mais danos à vida humana e a biodiversidade local (Magalhães, 2012; Rai *et al.*, 2013; Archambo; Kawatra, 2020; Matos *et al.*, 2020; Wang; Liu, 2021).

A LV ainda é pouco reaproveitada, devido a sua forte alcalinidade e nocividade. Para uma produção anual de aproximadamente 175,5 milhões de toneladas, apenas 3 milhões de toneladas são utilizadas. Há uma busca constante por soluções que forneçam um destino adequado para esse rejeito da indústria hidrometalúrgica. Os principais estudos e pesquisas sobre o aproveitamento da LV são: a incorporação da lama na produção de cerâmica vermelha, produção de agregados para a construção civil, agente adsorventes de gases e matéria-prima secundária para concentração e recuperação de metais de interesse industrial (Magalhães, 2012; Archambo; Kawatra, 2020).

Há também estratégias de biorremediação que tem como objetivo acrescentar propriedades benéficas a LV para que se torne um produto mais semelhante ao solo, melhorando a agregação de partículas e o conteúdo de nutrientes necessários. Os microrganismos tem uma participação importante na biorremediação e na redução de custos relacionados a reutilização da LV, sendo eles capazes, em condições adaptadas ao ambiente da LV, de metabolizar uma variedade de substratos orgânicos de carbono para serem utilizados como insumos microbianos, como celulose e lignina, resíduos provenientes da agroindústria (Klauber; Gräfe; Power, 2011; Bray *et al.*, 2018; Holanda *et al.*, 2020).

Os resíduos sólidos orgânicos normalmente são materiais putrescíveis, que constituem basicamente restos de animais ou vegetais e são provenientes de diversas fontes, doméstica ou urbana (restos alimentares, podas e varrição de ruas e praças), agrícola ou industrial (resíduos de indústria alimentícios, indústria madeireira, frigoríficos, dentre outros), de saneamento básico (lodos de estação e tratamento de

esgoto), entre outras (Rocha, 2016). Assim, os resíduos agroindustriais são resíduos sólidos orgânicos gerados a partir de atividades dos setores agroindustriais.

O crescimento da produção de resíduos agroindustriais se deve ao desperdício, às perdas que podem ocorrer durante a produção e no consumo, e aos materiais que não possuem valor econômico agregado, mas que são gerados ao longo da cadeia agroindustrial. Nesse caso, pode ser destacada a produção de resíduos orgânicos lignocelulósicos e/ou amiláceos, sendo eles cascas, sementes, aparas, etc. (Garcia *et al.*, 2020).

Nas regiões norte, centro-oeste e nordeste do Brasil, parte da agricultura está ligada a frutos considerados exóticos. Pela falta de dados e de informação, as frações de cascas e sementes de frutas, que são consideradas resíduos dos processos de produção, são descartadas e geram problemas ambientais, quando poderiam ser fabricados novos produtos ou subprodutos. Assim, poderiam valorizar aspectos culturais, gerar renda aos produtores ao agregar valor, e consequentemente, reduzir a quantidade de resíduos gerados (Santos *et al.*, 2020).

Portanto, encontrar um novo destino para a LV e aos resíduos agroindustriais pode contribuir com a diminuição dos impactos ambientais causados pelos mesmos. E diante disso, uma das alternativas para a reciclagem da LV é a sua neutralização.

Diante deste contexto, que o objetivo do presente estudo foi investigar a neutralização da LV através da degradação de resíduos agroindustriais para obter uma terra fértil viável para plantio, analisando a eficácia da utilização dos resíduos na redução do pH da LV; realizando o monitoramento do pH das terras produzidas submetidas a diferentes tratamentos; e avaliando o crescimento de milho (*Zea mays* L.) plantado na terra produzida com a mistura de terra preta (adubo) e LV neutralizada.

METODOLOGIA

Os resíduos orgânicos agroindustriais escolhidos foram a casca de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) e a casca de cacau (*Theobroma cacao*). Para o estudo da viabilidade de produção de terra fértil foi empregado, além da LV e dos resíduos orgânicos, água destilada, terra preta (TP) e sementes de milho.

Coleta das amostras

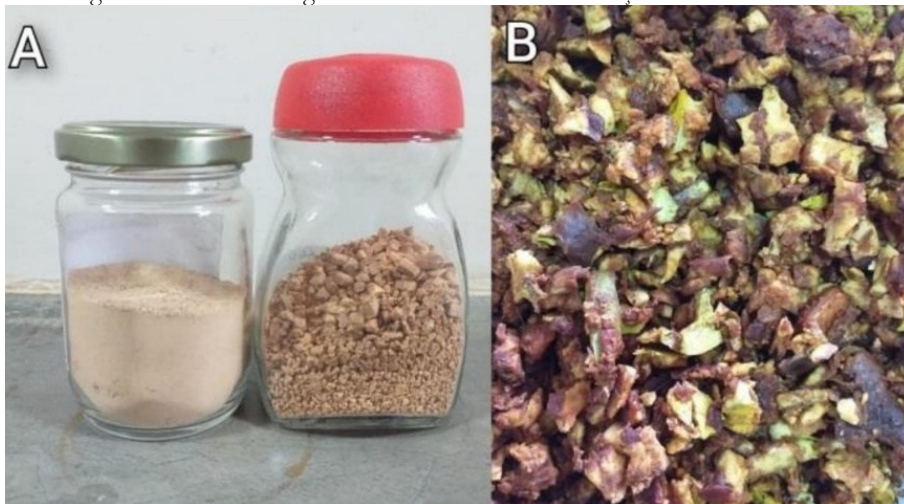
A LV utilizada foi adquirida da empresa Hydro Alunorte, situada no município de Barcarena, no Estado do Pará. As cascas de cupuaçu e cacau foram obtidas de um sítio localizado em Barcarena-PA. A TP foi adquirida de uma feira localizada em um bairro do município de Belém-PA. E as sementes de milho foram adquiridas em supermercado local do município de Belém-PA.

Preparo das amostras

A LV foi armazenada em um balde de plástico em temperatura ambiente. A quantidade de 10g de LV foi misturada em 25 mL de água destilada para a verificação do pH segundo o procedimento descrito por Teixeira *et al.* (2017).

As cascas de cupuaçu foram secas em estufa a 60°C e uma parte foi triturada em moinho de martelo e outra manualmente. As cascas de cacau in natura foram trituradas somente de forma manual. A Figura 1 apresenta a fotografia dos resíduos orgânicos preparados utilizados para a neutralização da LV.

Figura 1 – Resíduos orgânicos utilizados na neutralização da lama vermelha.



(A) Cascas de cupuaçu trituradas em moinho e manualmente; (B) Cascas de cacau trituradas manualmente.

Fonte: elaboração própria.

Neutralização da lama vermelha com os resíduos de cupuaçu e cacau

A metodologia empregada para a neutralização foi baseada no trabalho de Holanda *et al.* (2020), onde a decomposição dos resíduos orgânicos ocorre junto a LV e com monitoramento através do pH.

Para avaliar a neutralização do pH da LV in situ, misturou-se TP (servindo como inóculo microbiano) e resíduos orgânicos, que foram usados como fontes de carbono para a metabolização microbiana (Holanda *et al.*, 2020).

Baseado no trabalho de Holanda *et al.* (2020) com modificações, foram realizados dois tratamentos, um utilizando a casca do cupuaçu seca e o outro a casca de cacau in natura, 5 controles (2 negativos e 3 positivos), utilizaram-se frascos de PET de 350 mL com tampa como recipientes dos testes, pHmetro de bolso para aferição do pH e balança analítica para verificar as massas das amostras. Para cada tratamento houve três testes, sendo eles divididos em grupos A, B e C. Estes grupos receberam, respectivamente, 2,5 g, 5 g e 10 g de LV; e em cada um mais 5 g de TP, 15 g de resíduo orgânico e 100 mL de H₂O destilada, como descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição dos controles e tratamentos usados nos testes de neutralização com casca de cupuaçu e cacau.

Código		Composição			
		LV (g)	TP (g)	Fonte de carbono	Meio
Controle	CN1	10	sem TP	sem carbono	100 mL H ₂ O
Negativo	CN2	10	5	sem carbono	100 mL H ₂ O
Controle Positivo	CP1	2,5	5	sacarose 1%	100 mL H ₂ O
	CP2	5	5	sacarose 1%	100 mL H ₂ O
	CP3	10	5	sacarose 1%	100 mL H ₂ O
Tratamentos	CCUA	2,5	5	15g CCU ^a	100 mL H ₂ O
	CCUB	5	5	15g CCU	100 mL H ₂ O
	CCUC	10	5	15g CCU	100 mL H ₂ O
	CCAA	2,5	5	15g CCA ^b	100 mL H ₂ O
	CCAB	5	5	15g CCA	100 mL H ₂ O
	CCAC	10	5	15g CCA	100 mL H ₂ O

^aCasca de cupuaçu; ^bCasca de cacau.

Fonte: elaboração própria.

Os tratamentos de neutralização ocorreram em recipientes mantidos em temperatura ambiente, vedados e sem agitação. As amostras permaneceram por 20 dias nos recipientes e o pH de cada sistema foi aferido durante 6 dias com intervalos de 3 e 4 dias entre uma medição e outra. O pH das amostras também foram medidos. Todos os testes foram realizados em triplicata. A Figura 2 apresenta a fotografia dos sistemas de neutralização nos recipientes e a Figura 3 apresenta um fluxograma ilustrativo das etapas realizadas nos procedimentos de neutralização da LV.

Figura 2 – Sistemas para neutralização da lama vermelha com casca de cupuaçu e cacau nos recipientes.



Fonte: elaboração própria.

Figura 3 – Fluxograma ilustrado das etapas desenvolvidas na fase de neutralização da LV com os resíduos orgânicos em decomposição.



Fonte: elaboração própria, criado com biorender.com.

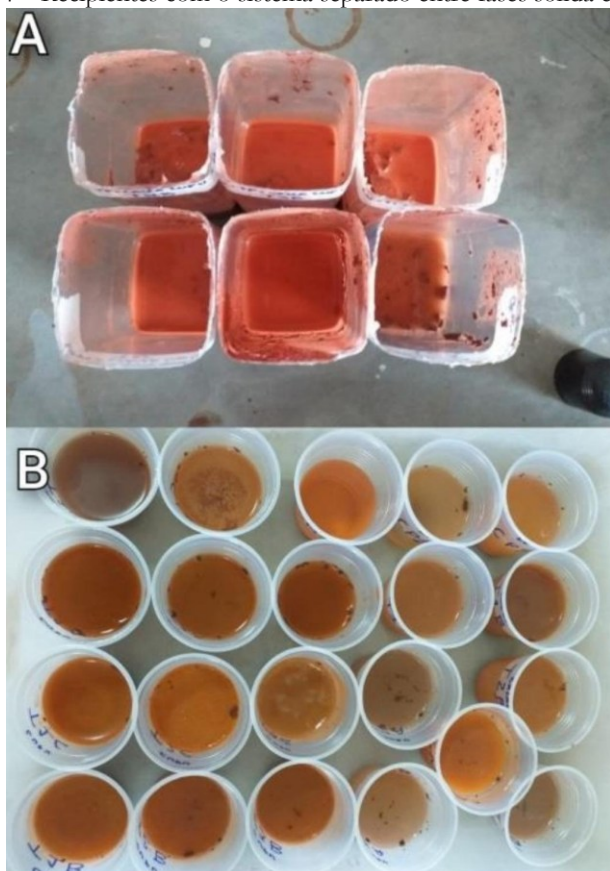
Preparo da terra fértil e plantio de sementes

O sistema após 20 dias de monitoramento do pH apresentou separação entre fases líquida e sólida. A fase líquida contendo água, parte de resíduos orgânicos e parte da LV de cada recipiente foi separado em outros recipientes de 150 mL para serem utilizados

na rega das sementes, restando apenas a parte sólida neutralizada que foi utilizada para compor o solo.

Para preparar a terra fértil, a fase sólida em cada recipiente adicionou-se 30g de TP com o propósito de formar uma terra mais firme e menos aquosa. Os recipientes foram cortados no topo para retirada da tampa de vedação e perfurados quatro vezes no fundo para permitir a drenagem da água de rega. Por fim, cinco sementes de milho foram adicionadas em cada recipiente, sendo elas regadas diariamente, quando necessário, com o líquido separado antes da adição da TP nos frascos (Figura 4).

Figura 4 – Recipientes com o sistema separado entre fases sólida e líquida.



(A) Recipientes com parte do sistema na fase sólida para adição de TP; (B) Recipientes com parte do sistema na fase líquida utilizada na rega das sementes.

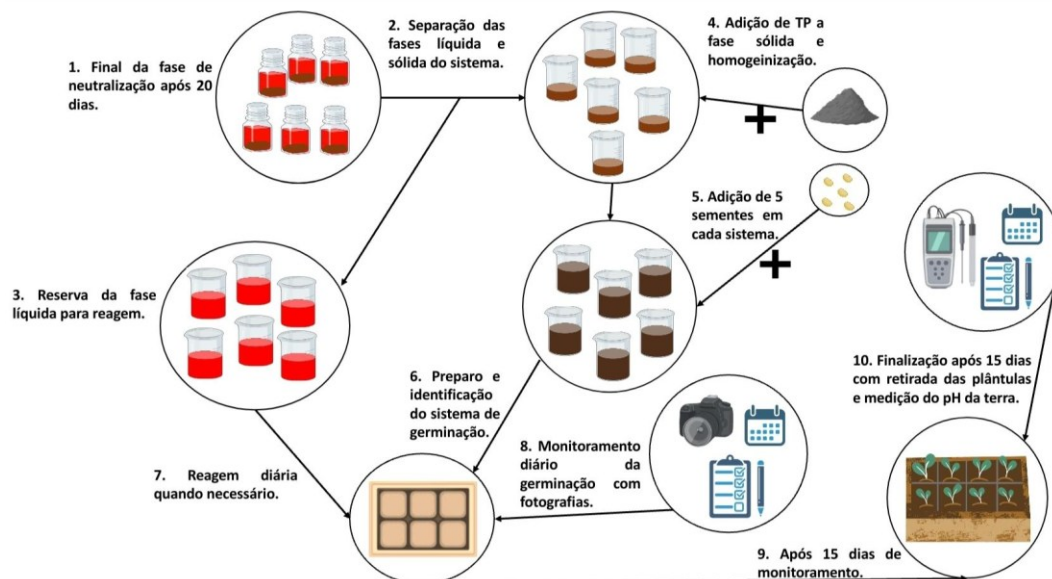
Fonte: elaboração própria.

A germinação e o crescimento das sementes foram acompanhados por 15 dias em luz natural e a frequência da regagem dependia da umidade da terra. Após este período, as plântulas que cresceram e os milhos que não germinaram foram retirados para que o pH da terra de cada sistema fossem medidos e avaliados. Figura 5 apresenta um fluxograma ilustrativo das etapas realizadas nos procedimentos de preparo da terra fértil.

Análise estatística

Todos os ensaios foram realizados em triplicata. Os dados foram avaliados pela análise de variância (ANOVA) utilizando o software *Statistica 10*, apresentados com a média e desvio padrão. A comparação das médias foi realizada pelo teste de Tukey, considerando o nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Figura 5 – Fluxograma ilustrado com as etapas da fase de produção de terra fértil.



Fonte: elaboração própria, produzido com biorender.com e canva.com.

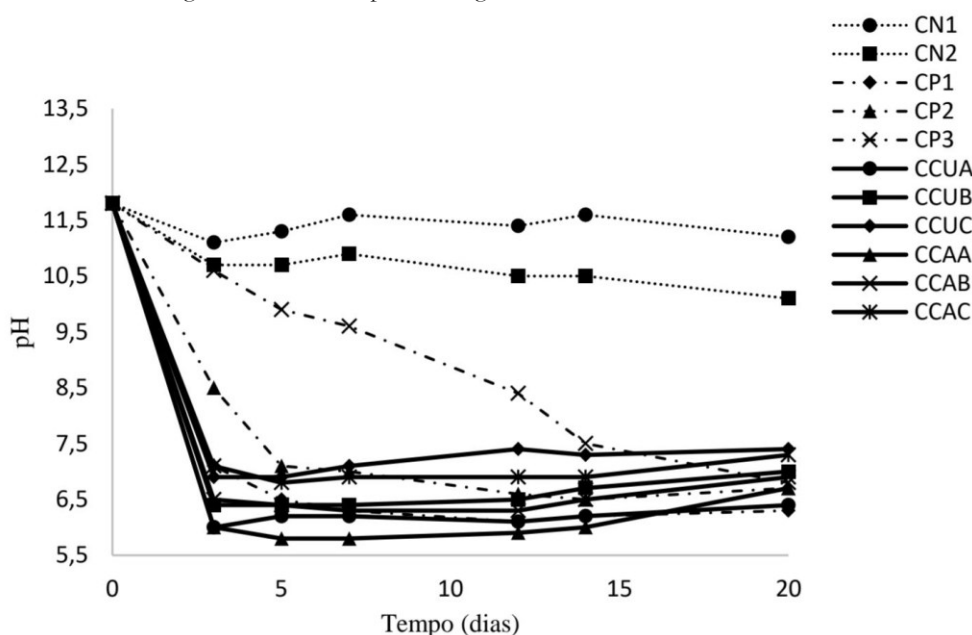
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Lama vermelha neutralizada com a degradação de resíduos orgânicos

Com relação aos valores de pH ao final do período de 20 dias, os tratamentos que continham fonte de carbono foram estatisticamente diferentes dos controles negativos, inferindo-se que a fermentação microbiológica dos resíduos orgânicos é capaz de reduzir o pH da LV. Os resultados podem ser observados na Figura 6 que apresenta as curvas obtidas ao longo de 20 dias de monitoramento do pH. Os tratamentos com os resíduos orgânicos em diferentes massas de LV não apresentaram diferenças significativas em relação aos seus controles positivos com sacarose, indicando que os resíduos escolhidos foram eficientes, possibilitando a fermentação microbiana do carbono orgânico.

Em relação ao tratamento com casca de cupuaçu, o grupo B não apresentou diferença significativa estatisticamente em relação aos grupos A e C, porém entre os grupos A e C houve diferença. Já os grupos do tratamento com cacau não foram significativamente diferentes entre si. Os tratamentos do grupo A e B dos dois resíduos apresentaram os menores valores de pH final, assim como os seus controles CP1 e CP2, demonstrando que além da presença dos resíduos orgânicos utilizados como fonte de carbono, neste caso como esperado a quantidade de massa de LV também influencia no processo de redução do pH.

Figura 6 – Perfil do pH ao longo de 20 dias de monitoramento.



Fonte: elaboração própria, produzido com *Statistica 10*.

Holanda *et al.* (2020), ao estudarem o potencial de uso da lama vermelha como condicionador de solo, utilizaram diferentes fontes de carbono orgânico, como a fibra do mesocarpo de palma, cachos de frutos vazios da palma, torta de decantador de óleo de palma, terra *fuller* (proveniente do processo de branqueamento do óleo de palma) e sementes de açaí. Todos os resíduos utilizados foram capazes de reduzir o pH da LV, mas pela rápida neutralização (em dois dias) e diminuição do teor de sódio, os tratamentos com os resíduos da fibra do mesocarpo de palma e sementes de açaí foram capazes de promover uma melhoria significativa na neutralização da LV.

O sistema produzido com os resíduos de cupuaçu, cacau, LV, TP e água destilada dentro de recipientes vedados, foram propícios para a digestão anaeróbia que em seus

processos há formação de ácidos e CO_2 pela decomposição dos resíduos orgânicos pelos microrganismos e em condições de alcalinidade o CO_2 reage com íon hidróxido (OH^-) produzindo bicarbonato (Eq. 1) que reagirá também com o OH^- gerando carbonato (Eq. 2). As reações de carbonatação consomem dois OH^- para cada dióxido de carbono formado, como descreve Bray *et al.* (2018). A produção de ácidos orgânicos e carbonatação reduzem o pH da LV, de forma que a LV possa ser utilizada ou descartada com segurança. Além de que o uso de ácidos convencionais possui um custo mais alto.

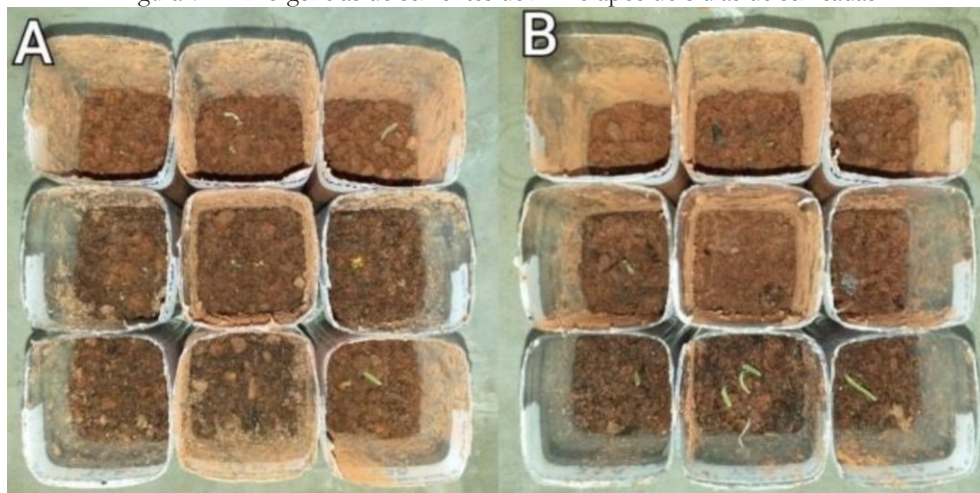


Terra fértil produzida

Germinação das sementes

Segundo Magalhães e Durães (2006), em condições favoráveis de temperatura e umidade, a planta de milho emerge com o surgimento dos coleóptilos entre 4 a 5 dias. As primeiras emergências ocorreram em três dias após a adição de TP (Figura 7).

Figura 7 – Emergências de sementes de milho após dois dias de semeadas.

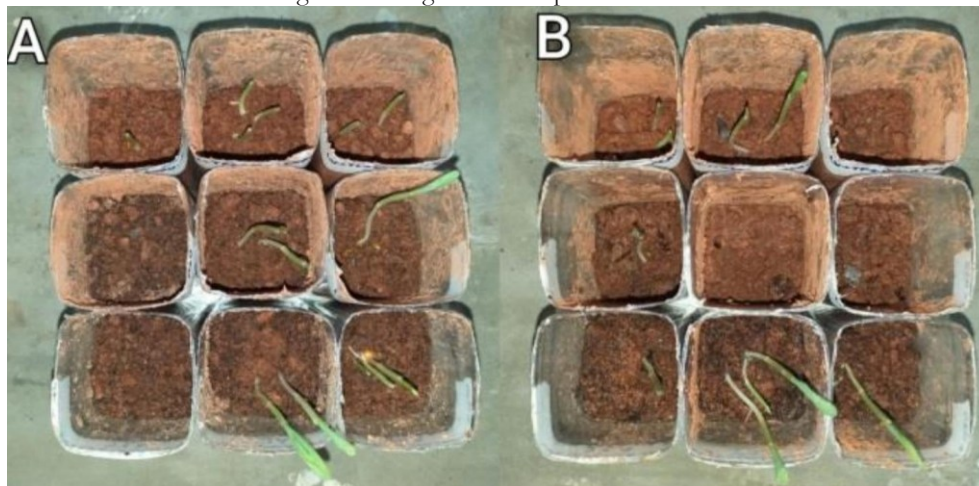


(A) Terra com casca de cupuaçu; (B) Terra com casca de cacau.
Fonte: elaboração própria.

O grupo A e B das terras provenientes dos resíduos de cupuaçu obtiveram o surgimento de 3 emergências cada, já as do grupo C apresentaram 5. Em relação aos grupos A, B e C das terras produzidos a partir dos resíduos de cacau, houveram 5, 1 e 2 emergência, respectivamente. As terras dos controles negativos CN1 e CN2 e controles

positivos CP1 e CP2 apresentaram somente 1 emergência. Dois dias depois surgiram as primeiras folhas (Figura 8).

Figura 8 – Surgimento das primeiras folhas.

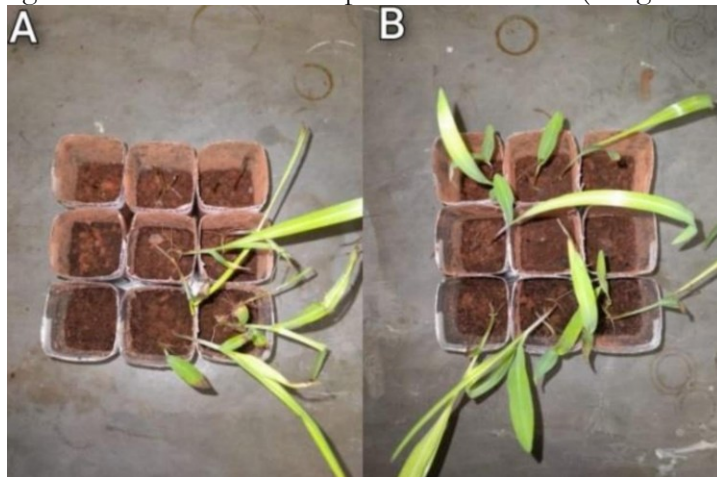


(A) Terra com casca de cupuaçu; (B) Terra com casca de cacau.

Fonte: elaboração própria.

No último dia de acompanhamento do crescimento de plantas nos solos, verificou-se que todas as sementes que germinaram nos solos produzidos com resíduos do cacau conseguiram chegar ao estágio vegetativo 1 (V1), enquanto que nos solos de cupuaçu somente onde germinaram nos grupos A e B houve avanço para o estágio V1 e no grupo C as plântulas não conseguiram se desenvolver (Figura 9).

Figura 9 – Crescimento das plântulas de milho (estágio V1)

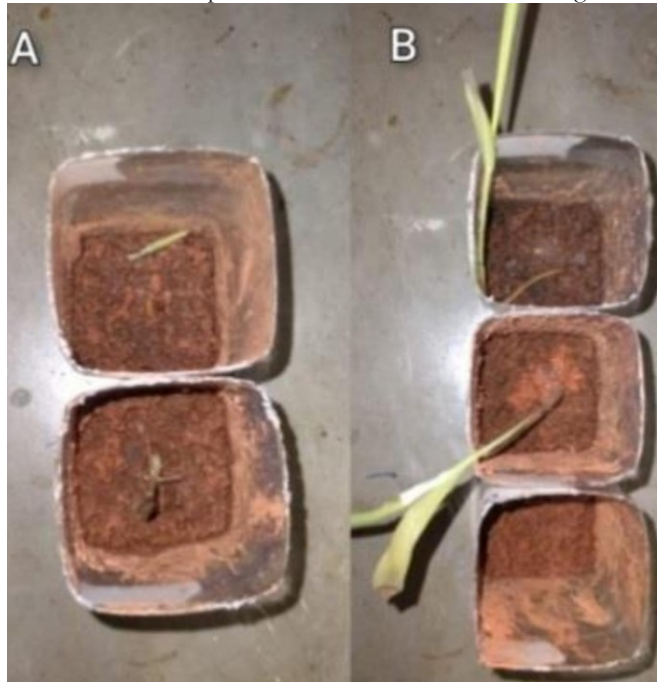


(A) Terra com casca de cupuaçu; (B) Terra com casca de cacau.

Fonte: elaboração própria.

Nos controles negativos, como apresenta a Figura 10, não houve desenvolvimento das plântulas, já em CP1 e CP2 houve avanço de 1 plântula para estágio V1 em cada controle, indicando que as fontes de carbono e TP auxiliaram no crescimento do vegetal.

Figura 10 – Crescimento das plântulas de milho nos controles negativos e positivos.



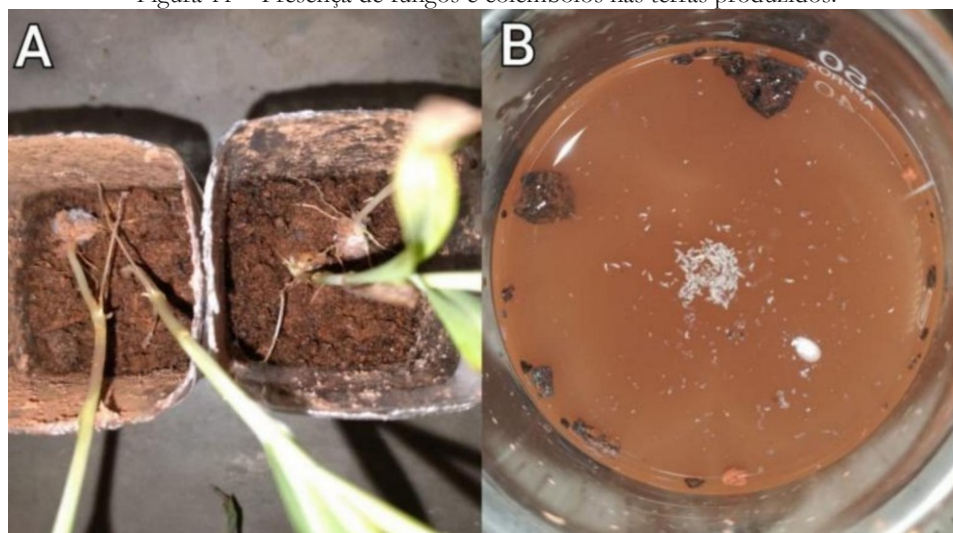
(A) Terra dos controles negativos 1 e 2 (CN1 e CN2); (B) Terra dos controles positivos 1 e 2 (CP1 e CP2).

Fonte: elaboração própria.

O pH final da Terra

Antes da retirada das plantas da terra, foi verificada (Figura 11) a presença de fungos e durante a medição de pH foi observado em maior quantidade nas terras, que tiveram germinações, a presença de colêmbolos, que são artrópodes de tamanho entre 0,2 e 8,0 mm, parentes dos insetos (Zeppelini; Bellini, 2004). Esses organismos são comumente encontrados em solos e a sua preferência são por locais úmidos e que apresentem fonte de alimentação, que nesse caso a preferência é por fungos relacionados à matéria orgânica do solo, bactérias e detritos vegetais. Os colêmbolos podem ser utilizados como bioindicadores em análises de risco ambiental, sendo a espécie *Folsomia candida* muito usada em testes eco toxicológicos padrão ISO 11267 (Castaño-Meneses *et al.*, 2004; ISO, 2014; Zortéa *et al.*, 2015).

Figura 11 – Presença de fungos e colêmbolos nas terras produzidos.



Fonte: elaboração própria.

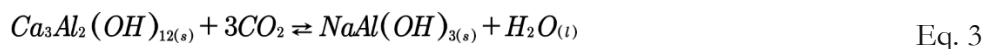
Ao final dos 15 dias de monitoramento, o pH das terras foram medidos e observou-se que todas voltaram a alcalinidade. A maioria apresentou valores de pH estatisticamente iguais mesmo com tratamentos diferentes, exceto a terra correspondente ao tratamento CCAB que foi estatisticamente igual apenas a terra do tratamento de CCUB, sendo estes citados e CCAC diferentes estatisticamente de CN2. Segundo Rai *et al.* (2013), o aumento de pH após a neutralização da LV é conhecido como reversão. Estudos como de Khaitan *et al.* (2009) observaram o rebote do pH com amostras do resíduo da bauxita com CO₂ e foi levantada a hipótese de que a dissolução do aluminato tricálcico (Ca₃Al₂(OH)₁₂), também chamado TCA, na LV neutralizada causa esta reversão. A Tabela 2 apresenta os valores de pH das terras após a retirada das plântulas de milho.

Tabela 2 – Valores de pH das terras após a retirada das plântulas de milho em 15 dias.

Código	pH
CN1	9,4 ± 0,2 ^{bc}
CN2	9,6 ± 0,1 ^b
CP1	9,4 ± 0,1 ^{bc}
CP2	9,5 ± 0,1 ^{bc}
CP3	9,5 ± 0,1 ^{bc}
CCUA	9,3 ± 0 ^{bc}
CCUB	9,2 ± 0,1 ^{ac}
CCUC	9,4 ± 0,1 ^{bc}
CCAA	9,4 ± 0,1 ^{bc}
CCAB	8,9 ± 0,2 ^a
CCAC	9,3 ± 0,2 ^c

Legenda: as letras minúsculas iguais indicam que não houve diferença significativa entre os tratamentos ao nível de 5%
Fonte: elaboração própria.

O TCA é um componente alcalino predominante no resíduo de LV do processo Bayer. O CO₂ produzido pela fermentação microbiana reage principalmente com o componente alcalino mais prevalente na LV, o TCA. Entretanto, o que aumenta a alcalinidade da LV é a dissolução do TCA com o CO₂, expondo os ânions OH⁻ (SMITH *et al.*, 2003). A Eq. 3 apresenta a dissolução do TCA em CO₂.



O TCA é transformado em minerais como o hidróxido de alumínio, se as reações forem incompletas o pH é recuperado, pois as reações são reversíveis, levando ao equilíbrio (SMITH *et al.*, 2003). O uso de CO₂ para neutralizar a LV é eficaz, porém devido a capacidade de minerais como o TCA de tamponar, o pH volta a região de alcalinidade após um curto tempo, logo a neutralização somente com CO₂ não é suficiente para remover sozinha as propriedades perigosas da LV (Archambo; Kawatra, 2020). Assim, a neutralização com resíduos orgânicos pode ser uma alternativa de pré-tratamento da LV.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação sobre a neutralização da LV através da degradação de resíduos agroindustriais para obter uma terra fértil viável para plantio no presente estudo mostrou que os resíduos de cupuaçu e cacau apresentaram eficácia na redução do pH na fase de neutralização da LV, porém cada grupo (A, B e C) não apresentou diferença significativa quanto aos seus respectivos controles (CP1, CP2 e CP3) e nem entre si (exceto CCUA e CCUC), o que indica que as fontes de carbono orgânico não afetaram o grau de neutralização do pH em 20 dias. Porém, os tratamentos com os resíduos orgânicos obtiveram taxas mais rápidas de diminuição de pH e os controles positivos taxas mais lentas, inferindo-se que a fonte de carbono influencia na velocidade de redução do pH.

Também foi constatado que a quantidade de LV utilizada também pode influenciar no valor final do pH. No entanto, devido a ação do aluminato tricálcico (TCA) o pH

do solo retorna a região alcalina, indicando que a utilização de resíduos orgânicos como fontes de carbono não é suficiente para neutralizar permanentemente o pH da LV e para retirar propriedades que possam ser prejudiciais ao meio ambiente. Porém, apesar de não alcançarem o pH ideal, os solos formados a partir da terra preta, LV e resíduos de cupuaçu ou de cacau (principalmente) mostraram potencial para o plantio de espécies como o milho, cujo pH não impediu o crescimento e o surgimento de organismos, mas não se sabe se os solos formados são seguros para o uso.

Portanto, mais estudos são necessários para elaborar uma forma de melhorar a neutralização da LV e verificar a qualidade e segurança das terras produzidas. Testes físico-químicos, novas formulações de materiais e utilização de bioindicadores podem ajudar a compreender o antes e o depois das propriedades da LV e assim indicar uma melhor função.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Faculdade de Biotecnologia do Instituto de Ciências Biológicas da UFPA, à Faculdade de Engenharia Química e à Faculdade de Engenharia de Alimentos do Instituto de Tecnologia da UFPA pelo suporte acadêmico que permitiu a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCHAMBO, M.; KAWATRA, S. K. Red mud: fundamentals and new avenues for utilization. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, [s. l.], p. 1-24, 2020.

BRAY, Andrew W. *et al.* Sustained bauxite residue rehabilitation with gypsum and organic matter 16 years after initial treatment. **Environmental Science & Technology**, v. 52, p. 152-161, 2018.

CASTAÑO-MENESES, G.; PALACIOS-VARGAS, J. G.; CUTZ-POOL, L. Q. Feeding habits of Collembola and their ecological niche. **Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Zoología**, v. 75, p. 135-142, 2004.

GARCIA, Gabriel A. *et al.* Produção de bioetanol a partir do emprego de resíduos de cervejaria e cascas de cacau. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 72., 2020. **Resumos de Comunicações Livres**. Disponível em: <http://livro.sbpnet.org.br/72ra/trabalhos/listatodos.php>. Acesso em: 5 mar. 2023.

HOLANDA, Roseanne Barata *et al.* Bayer process towards the circular economy: soil conditioners from bauxite residue. In: **Light Metals 2020**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 107-114.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11267: Soil quality – inhibition of reproduction of Collembola (*Folsomia candida*) by soil contaminants.** Geneva, 2014. Disponível em: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=57582. Acesso em: 5 mar. 2023.

KHAITAN, S.; DZOMBAK, D. A.; LOWRY, G. V. Mechanisms of neutralization of bauxite residue by carbon dioxide. **Journal of Environmental Engineering**, v. 135, n. 6, p. 433-438, 2009.

KLAUBER, C.; GRÄFE, M.; POWER, G. Bauxite residue issues: II. Options for residue utilization. **Hydrometallurgy**, v. 108, p. 11-32, 2011.

MAGALHÃES, Edilson Marques. **Estudo da extração de compostos de ferro da lama vermelha visando à concentração e/ou extração de compostos de titânio.** 2012. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

MAGALHÃES, Paulo César; DURÃES, Frederico O. M. **Fisiologia da produção de milho.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. (Circular Técnica, 76).

MATOS, Amanda Carolina Santos de *et al.* Processo produtivo da bauxita e da alumina: impactos socioambientais, formas de mitigação e o caso de Barcarena, Pará, Brasil. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 29644-29654, 2020.

NASCIMENTO, C. R. *et al.* Estudo da neutralização de lama vermelha empregando CO₂. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 24., 2011, Salvador. **Anais...** Salvador: ENTMMME, 2011. p. 1358-1364. Disponível em: <https://www.artigos.entmme.org/>. Acesso em: 5 mar. 2023.

RAI, S. *et al.* Feasibility of red mud neutralization with seawater using Taguchi's methodology. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 10, p. 305-314, 2013.

ROCHA, Camila Marçal. **Proposta de implantação de um biodigestor anaeróbio de resíduos alimentares.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

SANTOS, Annanda Carvalho dos *et al.* Frutos amazônicos e do Cerrado: potencial, limitantes e subutilização. In: DAMIANI, Clarissa; MARTINS, Glêndara Aparecida de Souza; BECKER, Fernanda Salomoni (org.). **Aproveitamento de resíduos vegetais: potenciais e limitações.** Palmas: EDUFT, 2020. cap. 4, p. 50-62.

SMITH, Peter G. *et al.* Reactions of carbon dioxide with tri-calcium aluminate. In: **Electrometallurgy and Environmental Hydrometallurgy**. v. 2, 2003.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo.** 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2017.

WANG, Mengfan; LIU, Xiaoming. Application of red mud as an environmental remediation material: a review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 408, 2021.

ZEPPELINI, D. F.; BELLINI, B. C. **Introdução ao estudo dos Collembola**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2004.

ZORTÉA, Talyta *et al.* Influence of cypermethrin on avoidance behavior, survival and reproduction of *Folsomia candida* in soil. **Chemosphere**, v. 122, p. 94-98, 2015.