

CAPTURA DE CO₂ POR TECNOSSOLOS PRODUZIDOS COM REJEITOS DA MINERAÇÃO

Jéssica Weiler^{1,2,3} – jessica.weiler18@gmail.com

¹USPSusten, Superintendência de Gestão Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

²Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Av. Prof. Luciano Gualberto, 1289 - Vila Universitaria, São Paulo - SP, 05508-900

³Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal do Pampa, Rio Grande do Sul, Brasil.

Av. Pedro Anunciação, 111 - Vila Batista, Caçapava do Sul - RS, 96570-000

Colombo Celso Gaeta Tassinari² – ccgtassi@usp.br

²Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Av. Prof. Luciano Gualberto, 1289 - Vila Universitaria, São Paulo - SP, 05508-900

Resumo: Diante das diversas questões de sustentabilidade enfrentadas pelo setor mineral, entram em pauta a necessidade de recuperação de áreas degradadas, o gerenciamento do grande volume de resíduos gerados e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Isso se torna ainda mais relevante para atividades envolvendo combustíveis fósseis, como o carvão mineral. Esse trabalho visa potencializar a captura de carbono e a recuperação de áreas degradadas a partir de Tecnossolos produzidos com rejeitos da mineração de carvão e materiais estratégicos. A captura de carbono foi avaliada por meio de: (i) sequestro mineral pela cal usada como neutralizante e fonte de Ca e Mg, (ii) incorporação de carbono via matéria orgânica do biochar, (iii) ação dos microorganismos utilizados para adicionar biota ao solo e (iv) biomassa vegetal produzida via crescimento vegetal da espécie *Megathyrus Maximus* cv. Mombaça. O crescimento vegetal foi maior quando foi incorporado biochar aos tratamentos, mas menor que o solo local, utilizado como controle. Em relação ao cálculo do potencial da captura de CO₂, os meios mais relevantes para o sistema projetado foram o biochar e a carbonatação mineral. O melhor desempenho obtido é capaz de capturar aproximadamente 65 t CO₂eq ha⁻¹, um valor cerca de cinco vezes maior que os sistemas tradicionalmente utilizados na recuperação de áreas de disposição de rejeitos. O estudo revela uma possibilidade à mineração de carvão de integrar gestão e disposição dos rejeitos, recuperação de áreas degradadas e mitigação de gases de efeito estufa, dentro de um ciclo fechado.

Palavras-chave: Tecnossolos, rejeitos de mineração, carvão mineral, estoque de carbono, gases de efeito estufa.



CO₂ CAPTURE BY TECHNOSOLS PRODUCED WITH MINING WASTE

Abstract: *The mineral sector faces various sustainability issues, including the need to manage waste, recover degraded areas, and reduce greenhouse gas emissions. This becomes even more relevant for activities involving fossil fuels, such as coal. This work aims to enhance carbon capture and recover degraded areas using Technosols produced with coal mining waste and strategic materials. Carbon capture was evaluated through (i) mineral sequestration by the lime used as a neutralizer and source of Ca and Mg, (ii) carbon incorporation via organic matter from biochar, (iii) action of microorganisms used to add biota to the soil and (iv) plant biomass produced via plant growth of the species *Megathyrus Maximus* cv. *Mombasa*. Plant growth was greater when biochar was incorporated into the treatments but lower than the local soil used as a control. Regarding calculating the CO₂ capture potential, biochar and mineral carbonation were the most relevant means for the designed system. The best performance obtained can capture approximately 65 t CO₂eq ha⁻¹, a value approximately five times greater than systems traditionally used to recover waste disposal areas. The study reveals a possibility for coal mining to integrate the management and disposal of tailings, recovery of degraded areas, and mitigation of greenhouse gases within a closed cycle.*

Keywords: *Technosols, tailings, mining coal, carbon stock, greenhouse gases.*

1. INTRODUÇÃO

O aumento da concentração de dióxido de carbono (CO₂), que representa 80% dos GEE, causa distúrbios no ciclo do carbono e de vários outros componentes atmosféricos, afetando também a formação de ozônio (FIELD; RAUPACH, 2004; NEMA; NEMA; ROY, 2012). Os maiores fluxos de emissão de CO₂ se dão pela queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra (RAUPACH et al., 2007). Para impedir maiores impactos devido às alterações das concentrações desse gás na atmosfera, esforços vem sendo conduzidos para aplicação de práticas de prevenção e de mitigação, com técnicas para captura e estoque de carbono (ANDERSON; NEWELL, 2004; BUI et al., 2018; LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014).

Ao olhar para a indústria do carvão, temos uma importante oportunidade para aplicação de técnicas de captura de carbono, uma vez que se sabe que você é um contribuidor significativo para as emissões de gases de efeito estufa (GEE) (ZHENG et al., 2023). Além da a mitigação das emissões pós queima, outras ações são aplicadas para reduzir impactos ao longo do ciclo de vida do carvão mineral, incluindo as técnicas de extração mineral e beneficiamento mais limpos (CHEN; XU, 2010; REZAEI; RAJAGOPALAN; HONAKER, 2019; XIE et al., 2012), gerenciamento dos resíduos, com busca pela minimização, reuso e reciclagem (ACORDI et al., 2023; BIAN et al., 2012; TAYEBI-KHORAMI et al., 2019). Essas práticas são imprescindíveis para manter o setor mineral em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) indicadas pela (GHOSH; MAITI, 2021; TOST et al., 2018) e princípios como Environmental, Social and Governance (ESG) (LOKUWADUGE; HEENETIGALA, 2017). Destaca-se ainda que para o alcance da meta do Acordo de Paris de limitar o aquecimento global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais até o final deste século, a mineração tem papel fundamental tanto nas ações para reduzir suas próprias emissões como na transição energética e fornecer de recursos minerais para que o acordo aconteça (ALI et al., 2017; VALENTA et al., 2023).

Uma estratégia sustentável, que abrange uma solução de forma conjunta e circular para a recuperação de áreas degradadas, gerenciamento de resíduos sólidos e abatimento de emissões é apresentada neste trabalho por meio dos Tecnossolos. Tecnossolos são definidos pela IUSS Working



Group como solos artificiais derivados de uma mistura de materiais antrópicos cujas propriedades e pedogênese são dependentes da sua origem (IUSS WORKING GROUP WRB, 2014). A produção de Tecnossolos pode ser conduzida com resíduos da própria mineração, corrigidos com outros materiais orgânicos e inorgânicos (AMARAL FILHO et al., 2020; ECHEVARRIA; LOUIS MOREL, 2015; FIRPO; AMARAL FILHO; SCHNEIDER, 2014; RUIZ; CHERUBIN; FERREIRA, 2020; SÉRÉ et al., 2008; WEILER; FIRPO; SCHNEIDER, 2018, 2020), e ser utilizado para recuperar as áreas degradadas pela extração do recurso mineral, ou áreas de disposição dos rejeitos. A produção envolve a escolha, caracterização, processos de preparação e condicionamento dos materiais, considerando que os solos devem ter: estrutura física e granulometria adequadas, pH próximo à neutralidade, quantidades de nutrientes e matéria orgânica apropriadas (BOLAN; KIRKHAM, 2017; DANIELS; ZIPPER, 2010).

Os materiais utilizados ainda podem ser escolhidos estrategicamente visando algum objetivo específico, tal como a captura de carbono aqui abordada. Materiais alcalinos são utilizados comumente na agricultura para neutralização da acidez do solo, neste caso, o uso é para evitar a acidez produzida pelos sulfetos presentes no rejeito de carvão e também para sequestro mineral através da carbonatação, uma forma para captura permanente do CO₂ (BOBICKI et al., 2012; EBRAHIMI et al., 2018; OLAJIRE, 2013). O biochar é uma opção utilizada como condicionador orgânico de solo e para compensar emissões de carbono. O carbono adicionado via biochar é considerado uma forma de incorporação de CO₂ porque o processo de pirólise converte a biomassa vegetal em biochar, que possui o dobro do teor de carbono da biomassa normal (GHOSH; MAITI, 2021, 2022). Após o estabelecimento de cobertura vegetal, o sistema como um todo também incorpora carbono através do desenvolvimento da biomassa de plantas (BEERLING et al., 2020; MI et al., 2020) e microrganismos (THAVAMANI et al., 2017; YANG et al., 2021).

Nesse contexto, considerando i) a necessidade de recuperação de áreas degradadas, ii) a geração de um grande volume de rejeitos, iii) mitigação de emissões de GEE, e iv) incorporação de ações sustentáveis em ciclos produtivos da mineração, este estudo apresenta a produção de um Tecnossolos com rejeitos de carvão mineral e condicionadores que potencializem a captura de carbono através do sequestro mineral, estabilização da matéria orgânica, crescimento vegetal e desenvolvimento de microrganismos. A estratégia focou no uso de rejeitos de carvão mineral por este ser um resíduo gerado em grande quantidade no ciclo produtivo do carvão, o combustível fóssil de maior preocupação em relação a fontes de emissões de GEE. A Figura 1 ilustra as estratégias consideradas nesse estudo.

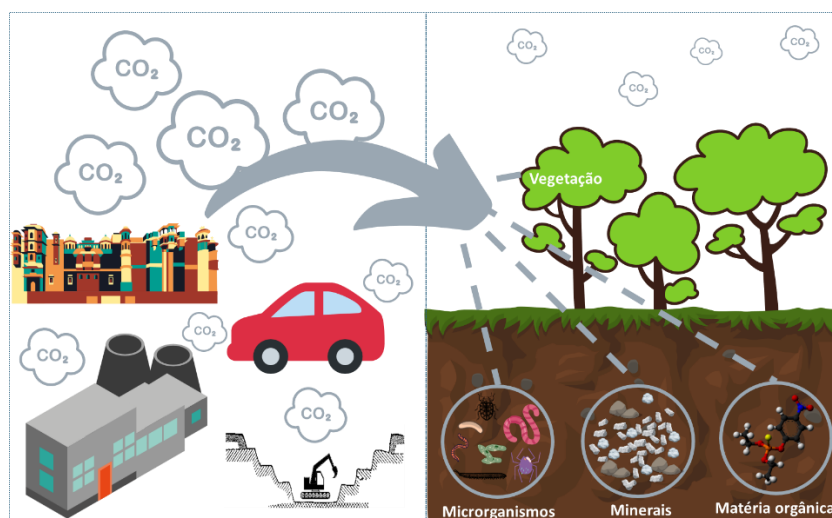


Figura 1. Esquema ilustrativo da captura de carbono por Tecnossolos pela vegetação (a), microrganismos (b), materiais alcalinos (c) e matéria orgânica (d).



2. MATERIAIS E MÉTODOS

Vários materiais podem ser utilizados para compor o Tecnossolo, dependendo dos dados disponíveis em literatura, interesse de investigação e disponibilidade de material. Para alcançar o objetivo desta pesquisa, a escolha dos materiais foi feita estrategicamente pensando em materiais que tenham capacidade de capturar carbono e sejam conhecidos em literatura para comparação de resultados. Os materiais selecionados para a criação dos Tecnossolos foram: resíduo de carvão (R), Cal (C), biochar (B) e Microrganismos Eficientes (M).

Os rejeitos de carvão são provenientes da região carbonífera de Santa Catarina. Rejeitos de carvão das duas camadas exploradas na região, Barro Branco e Bonito, foram amostrados durante o processo de beneficiamento mineral de uma carbonífera local. Os rejeitos são provenientes de operações de concentração gravimétrica por jigagem e meio denso. Para caracterização e montagem do experimento, as amostras de rejeitos de carvão foram secas, homogeneizadas e conduzidas a operações unitárias de cominuição. As operações de cominuição utilizadas para essas amostras foram: britador de mandíbulas, britador de rolos, peneiramento (malha 2 mm – granulometria considerada para solo). A cal dolomítica, o biochar e a solução com microrganismos foram adquiridas comercialmente. A cal adquirida é do tipo dolomítica, tem composição de 40% CaO e 27% MgO, foi utilizada para neutralizar parte da acidez dos rejeitos de carvão, com potencial de neutralização de 1370 kg CaCO₃ ton⁻¹, bem como agir para armazenamento de carbono via carbonatação mineral pelos elementos Ca e Mg. O Biochar é produzido no Brasil a partir da pirólise do Bambu, é um substrato com alto teor de carbono orgânico (aproximadamente 50%), indicada para aplicação no solo para melhorar a retenção de nutrientes, e a microbiota do solo. A solução de Microrganismos Eficientes é preparada para inocular o solo com uma mistura de microrganismos, que são indicados para acelerar processos de transformação de compostos orgânicos e minerais, bem como melhorar a qualidade do solo e auxiliar no crescimento das plantas e na formação de raízes.

Os tratamentos receberam nomenclaturas conforme a sua composição, sendo que os tratamentos foram analisados antes e após condução do experimento (dia 0 e dia 120), com e sem planta. O quadro 1 indica a composição e a identificação dada as Tecnossolos. O experimento foi conduzido em vasos com capacidade de aproximadamente 10 kg de material. Todos os tratamentos foram adubados com NPK 1:1:1, conforme taxa de aplicação indicada pelo produtor. O crescimento vegetal foi conduzido com *Megathyrsus maximus* grass, durante 120 dias.

Quadro 1. Identificação dos Tecnossolos de acordo com a composição

Identificação		Componentes do Tecnossolo				Condição experimental	
		Rejeito de carvão	Cal	Biochar	Microrg.	Inicial (dia 0)	Final (dia 120)
							sem planta / Com planta
RC	RC 0	X	X			X	
	RC 120	X	X				X
	RC 120 + P	X	X				X
RCB	RCB 0	X	X	X		X	
	RCB 120	X	X	X			X
	RCB 120 + P	X	X	X			X
RCBM	RCBM 0	X	X	X	X	X	
	RCBM 120	X	X	X	X		X
	RCBM 120 + P	X	X	X	X		X
Solo	Solo+P (Controle)						X



Para avaliar a captura de carbono no sistema, foram realizados balanços mássicos, com estimativas de captura através das estratégias propostas: C da massa seca da planta ($CO_2 eq_{DM}$), incorporação de matéria orgânica pelo biochar ($CO_2 eq_{BIO}$), C da biomassa dos microrganismos ($CO_2 eq_{MB}$), e pela carbonatação mineral ($CO_2 eq_{MC}$). O teor de carbono de cada abordagem foi convertido para CO_2eq multiplicando pelo fator de conversão ($F_{CO_2} = 3.67$).

A metodologia utilizada para o cálculo da captura de carbono pela biomassa da planta foi baseada na proposta de PRIMAVESI; ARZABE; PEDREIRA, 2007 e utilizada por DUPAS et al., 2016 para gramíneas tropicais. Neste caso, a massa seca é calculada em termos de produtividade de massa seca (PMS), considerando a quantidade de massa seca produzida (g) produzida na área do vaso utilizando no experimento ($0,23 m^2$) e extrapolando para massa (ton) por hectare ($10.000 m^2$). As estimativas de produtividade de matéria orgânica (PMO), carbono (C) e sequestro de CO_2 , com base na PMS são obtidas através das respectivas equações:

$$C_{MS} (t C ha^{-1}) = \frac{MS \cdot 0,95}{1.724} \quad (1)$$

$$CO_2 eq_{MS} (t CO_2 ha^{-1}) = C_{MS} \cdot F_{CO_2} \quad (2)$$

Onde: MS é a massa seca ($t MS ha^{-1}$), C_{MS} é o carbono incorporado pela massa seca ($t C ha^{-1}$), F_{CO_2} é o fator de conversão da emissão de CO_2 ($t CO_2 ha^{-1}$) ($1 kg C = 3.664 kg CO_2-eq.$)

O sequestro de carbono pela aplicação de biochar foi calculado com base na diferença de teor de C entre o tratamento RC no dia 0 (para avaliar a incorporação efetiva de carbono, evitando contabilizar o que foi consumido por microrganismos, por exemplo). O biochar foi adicionado à mistura para obtenção final de $20 g C kg^{-1}$ solo (2% de carbono orgânico). A quantidade de sequestro de carbono no solo e mitigação de $CO_2-eq.$ a emissão foi calculada pelas equações 3 e 4.

$$C_{BC} (t C ha^{-1}) = C_i - C_{RC} \quad (3)$$

$$CO_2 eq_{BC} (t CO_2 ha^{-1}) = C_{bio} \cdot F_{CO_2} \quad (4)$$

Onde C_{BC} é a quantidade de carbono incorporado ao solo pelo biochar ($t C ha^{-1}$), C_i é o conteúdo de carbono orgânico do tratamento que recebeu biochar: CwLB, CwLBM ($t C ha^{-1}$), e C_{RC} is organic carbon content do tratamento CwL 0 ($t C ha^{-1}$), $CO_2 eq_{BC}$ é a conversão de carbono em CO_2 equivalente ($t CO_2 ha^{-1}$), e F_{CO_2} é o fator de conversão da emissão de CO_2 .

A estimativa feita para microrganismos se baseia no potencial captura de carbono pela biomassa gerada pelo crescimento microbiano, considerando uma média entre os trabalhos apresentados em Six et al. (2006) de $0,55 g C-microbiano g^{-1} C-metabolizado$, ou seja, 55%. Esta relação leva em consideração a quantidade de CO_2 que será perdida do solo. Os valores de CBM foram extrapolados para toneladas por hectare (de acordo com o desenho do experimento).

$$C_{BM} (t C ha^{-1}) = CBM \cdot \eta \quad (5)$$

$$CO_2 eq_{BM} (t CO_2 ha^{-1}) = C_{BM} \cdot F_{CO_2} \quad (6)$$

Onde C_{BM} é a quantidade de carbono incorporado ao solo pelo carbono da biomassa microbiana (CBM) ($t C ha^{-1}$), η é a eficiência de crescimento microbiano considerada 55%, $CO_2 eq_{BM}$ é a capacidade de sequestro de CO_2 baseada na biomassa microbiana. F_{CO_2} é o fator de conversão da emissão de CO_2 .

Para a carbonatação mineral, utilizou-se a fórmula de Steinour para determinar o valor máximo teórico de sequestro de CO_2 , obtido a partir de uma fórmula estequiométrica, de acordo com os cálculos realizados para avaliar a capacidade de sequestro de CO_2 de materiais alcalinos por RENFORTH (2019). A equação 7 apresenta a fórmula utilizada para cálculo do potencial para captura de CO_2 , considerando a concentração de CaO, MgO, SO_3 , P_2O_5 obtidas por FRX para cada tratamento. A Equação 8 transforma o dado obtido em termos de sequestro de CO_2 por hectare.

$$CO_{2CM} (kg CO_2 t^{-1}) = \frac{M_{CO_2}}{100} \cdot \left(\alpha \frac{CaO}{M_{CaO}} + \beta \frac{MgO}{M_{MgO}} + \gamma \frac{SO_3}{M_{SO_3}} + \delta \frac{P_2O_5}{M_{P_2O_5}} \right) \cdot 10^3 \quad (7)$$

$$CO_2 eq_{CM} (t CO_2 ha^{-1}) = CO_{2CM} \cdot S_v \quad (8)$$



onde CO_{2CM} é a capacidade de sequestro de CO_2 baseada na carbonatação mineral (CM) por tonelada de Tecnossolo ($kg\ CO_2\ t^{-1}Tecn.$), CaO , MgO , SO_3 , P_2O_5 são concentrações dos compostos, M é a massa molecular e os coeficientes α , β , γ , δ considera a contribuição dos diferentes compostos e são 1, 1, -1, -2, respectivamente. A densidade (S_v) é a massa de Tecnossolo por unidade de área ($t\ Tecn.\ ha^{-1}$).

Os elementos de enxofre e fósforo são descontados da equação ($\gamma=-1$, $\delta=-2$) porque esses elementos podem reagir ou estar ligados com os cátions de Ca e Mg , como Ca_5O_4 , $Ca_5(PO_4)_3(OH)$, reduzindo a disponibilidade dos mesmos para reação com CO_2 , ou por serem compostos ácidos (H_2SO_4) que podem afetar a produção de CO_2 (RENFORTH, 2019)

O potencial de sequestro de carbono total é dado pela soma da quantidade de CO_2 equivalente nas quatro estratégias propostas, indicado na equação 9.

$$CO_{2eq\cdot total}\ (t\ CO_2\ ha^{-1}) = CO_{2eq\cdot DM} + CO_{2eq\cdot BC} + CO_{2eq\cdot MC} + CO_{2eq\cdot MB} \quad (9)$$

3. RESULTADOS

3.1 Produção de massa seca

A Figura 1 apresenta o crescimento vegetal para os diferentes tratamentos em termos de altura e massa seca da gramínea *Megathyrsus maximus*. Os valores obtidos considerando a massa seca, produção de matéria orgânica estimada, carbono do tecido vegetal (C-plant) e captura de CO_2 equivalente (CO_{2eq} plant) a partir do crescimento vegetal para os Tecnossolos e o solo controle são apresentados na Tabela 2. A captura de CO_2 via *Megathyrsus maximus* para um solo fértil (Solo+P) estão de acordo com os valores indicados como médios para uma pastagem tropical, que fixa 10 t/ha de CO_2 (PRIMAVESI; ARZABE; PEDREIRA, 2007). Devido ao menor crescimento verificado nos Tecnossolos, este valor foi cerca de 10 vezes menor, em torno de 1 t $CO_{2eq}\ ha^{-1}$.

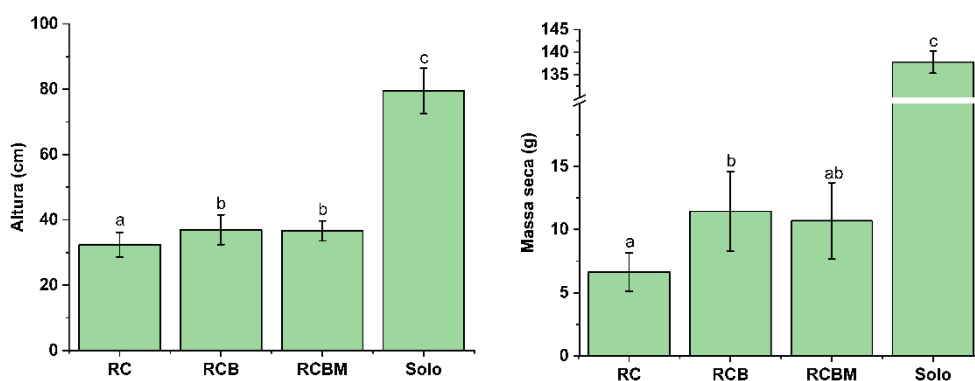


Figure 1. Desenvolvimento da *Megathyrsus maximus* em Tecnossolos após 120 dias de crescimento. (A) Altura e (B) Massa seca produzida. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre crescimento das plantas e massa seca segundo teste de Tukey ($P < 0,05$).



Tabela 1. Produção de matéria seca (PMS), estimativas de produtividade de matéria orgânica (PMO), acúmulo de carbono do tecido vegetal (C_{DM}) e captura de CO_2 ($CO_2\text{-eq.}_{DM}$) para estratégia de crescimento vegetal.

	PMS (t ha⁻¹)	PMO_{est} (t ha⁻¹)	C_{MS} (t C ha⁻¹)	$CO_2\text{ eq.}_{MS}$ (t CO₂ ha⁻¹)
RC 120+P	0,29	0,28	0,16 ± 0,04	0,59 ± 0,13
RCB 120+P	0,50	0,47	0,28 ± 0,08	1,01 ± 0,28
RCBM 120+P	0,47	0,44	0,26 ± 0,07	0,94 ± 0,29
Solo 120+P	6,02	5,72	3,32 ± 0,06	12,18 ± 0,22

3.2 Adição de carbono via Biochar

Os teores de carbono adicionado pelo biochar foram calculados considerando a diferença do carbono presente no Tecnossolo RC 0 (2,3 t C ha⁻¹), de forma a considerar apenas o carbono efetivamente incorporado ao sistema. A Tabela 4 apresenta os dados obtidos para os Tecnossolos RCB e RCBM. Houve um aumento expressivo de carbono nesses tratamentos, de 7,0 a 8,8 t C ha⁻¹. A equivalência para $CO_2\text{-eq}$ resulta em 25,8 a 32,3 t CO₂ ha⁻¹. Esses valores são coerentes com os obtidos na literatura para estudos que aplicam biochar em áreas de disposição de rejeitos de carvão: são superiores aos encontrados por Mukhopadhyay and Masto (2019) de 0,873 g CO₂-C kg⁻¹ (equivalente a 1,75 ton CO₂ ha⁻¹) e Ghosh and Maiti (2022) de 12 t CO₂ ha⁻¹, e inferiores aos relatados por Ghosh and Maiti (2021), que apontam valores de 151 a 168 t CO₂ ha⁻¹.

Tabela 2. Incorporação de carbono via biochar (C_{BC}) e mitigação em termos de sequestro de CO_2 ($CO_2\text{ eq.}_{BC}$)

		C_{BC} (t C ha⁻¹)	$CO_2\text{ eq.}_{BC}$ (t CO₂ ha⁻¹)
	0	7,5	27,5
RCB	120	8,8	32,3
	120 + P	8,8	32,3
	0	7,5	27,5
RCBM	120	7,9	29,0
	120 + P	7,0	25,8

3.3 Biomassa microbiana

Os resultados de BMC utilizados obtidos para os experimentos e o carbono incorporado, considerando uma taxa de conversão de 55%, bem como os valores em termos de $CO_2\text{-eq}$ são apresentados na Tabela 3. A contribuição em termos de contabilização de carbono dos microrganismos foi muito pequena quando comparado as demais estratégias. Entretanto, deve-se destacar que não é simples contabilizar a ação dos microrganismos diretamente. O cálculo leva em consideração apenas a massa dos mesmos, que obviamente é muito menor que a dos demais contribuintes. Existem diferentes maneiras fotossintéticas e não fotossintéticas pelas quais os micróbios podem capturar dióxido de carbono do ar (GAYATHRI et al., 2021). Esse cálculo não considera muitas outras contribuições intrínsecas, como exemplo a decomposição e da transformação em M.O., aceleração de processos de intemperização de minerais silicatados e aceleração de processos de precipitação de carbonatos.



Tabela 3. Carbono da biomassa microbiana (CBM), carbono incorporado ao sistema via biomassa microbiana (C_{BM}) e em termos de compensação de CO_2 ($CO_2 eq. MB$).

		CBM (mg C kg ⁻¹)	C_{BM} (t C ha ⁻¹)	$CO_2 eq. MB$ (t CO_2 ha ⁻¹)
RC	0	100	0,02	0,08
	120	240	0,05	0,18
	120 + P	290	0,06	0,22
RCB	0	120	0,02	0,09
	120	310	0,06	0,23
	120 + P	230	0,05	0,17
RCBM	0	120	0,02	0,09
	120	180	0,04	0,14
	120 + P	230	0,05	0,17
Solo	Soil+P	350	0,07	0,26

3.4 Incorporação de carbono via carbonatação mineral

Os dados obtidos em termos de composição elementar (CaO, MgO, SO_3 and P_2O_5) e potencial da captura de CO_2 por carbonatação mineral são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Composição elementar em termos de CaO, MgO, SO_3 and P_2O_5 dos Tecnossolos, capacidade de sequestro de CO_2 por tonelada de Tecnossolo e por hectare para a estratégia de carbonatação mineral.

		CaO	MgO	SO_3	P_2O_5	$CO_2 eq. MC$ (kg CO_2 t ⁻¹)	$CO_2 eq. MC$ (t CO_2 ha ⁻¹)
		%					
RC	0	4,6	1,3	6,1	0,1	16,0 ± 0,5	6,0 ± 0,2
	120	9,1	3,9	1,6	10,2	73,0 ± 11,9	27,4 ± 4,5
	120 + P	5,7	4,9	1,4	1,5	86,4 ± 12,7	32,4 ± 4,8
RCB	0	4,5	1,3	5,8	0,1	17,5 ± 0,5	6,6 ± 0,2
	120	11,9	3,5	1,8	11,1	87,6 ± 3,4	32,9 ± 1,3
	120 + P	7,0	3,9	1,3	3,3	80,0 ± 11,3	30,0 ± 4,2
RCBM	0	4,6	1,3	5,6	0,1	18,6 ± 0,8	7,0 ± 0,3
	120	6,6	2,5	3,4	10,9	26,8 ± 11,0	10,0 ± 4,1
	120 + P	5,9	2,8	1,2	6,4	50,2 ± 14,8	18,8 ± 5,5

Percebe-se que há um aumento significativo do potencial sequestro de CO_2 com a exposição de 120 dias experimento, para todos os tratamentos. Isso se deve majoritariamente a maior disponibilidade de Ca e Mg pelas reações geoquímicas entre a pirita e a cal, conforme apresentado no item 4.2.3, embora a composição de SO_3 e P_2O_5 também influencie. A redução nos teores de SO_3 também contabilizam para maior captura de CO_2 após período de exposição. Os valores obtidos variam entre 16,0 a 18,6 kg CO_2 t⁻¹ Tecn. inicialmente, aumentando para até 87,6 kg CO_2 t⁻¹ Tecn. quando esse é exposto a condições ambientais e consequentes reações de influência para captura do CO_2 . Esses valores são consistentes com os valores de potencial captura de CO_2 para rejeitos de mineração apresentados por RENFORTH (2019) e KHUDHUR et al. (2022), que variam de 40 a 250 kg CO_2 t⁻¹ Tecn., dependendo da composição dos rejeitos.



3.5 Potencial total de sequestro de CO₂ dos Tecnossolos

A captura total de CO₂, considerando o somatório das quatro estratégias (crescimento vegetal, microrganismos, incorporação de carbono pelo biochar e carbonatação mineral) é apresentado na Figura 2. Os meios mais relevantes para a captura no sistema projetado em termos de captura de carbono foi o biochar e a carbonatação mineral. O crescimento vegetal teve uma contribuição expressiva quando consideramos o solo controle. Ainda assim, os Tecnossolos construídos teriam de duas a quatro vezes maior capacidade de capturar CO₂ quando comparados aos solos controle, tradicionalmente utilizados para recuperação de áreas degradadas nas áreas de mineração.

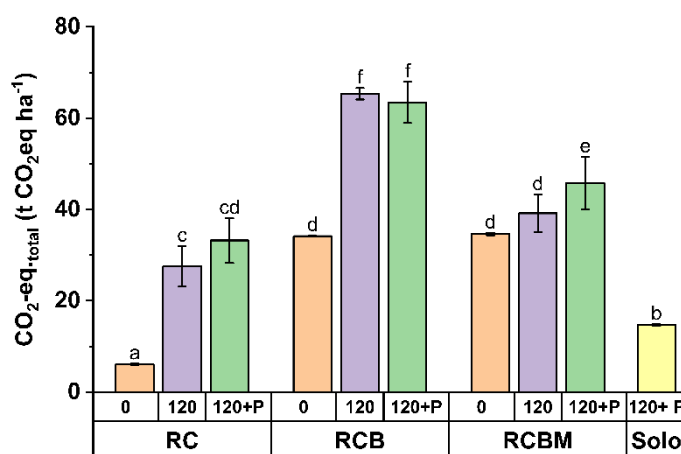


Figura 2. Potencial total de sequestro de CO₂ dos Tecnossolos e controle do solo, considerando a soma de quatro estratégias propostas: planta, biocarvão, biomassa microbiana e carbonatação mineral. Diferentes letras minúsculas indicam diferenças significativas de acordo com o teste de Tukey (P < 0,05).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo indica que os Tecnossolos são uma solução viável para a mineração de carvão, integrando a recuperação de minas, gestão de resíduos e sequestro de carbono. Os resultados mostram que o crescimento das plantas e desenvolvimento da biomassa microbiana foram consistentes com dados de Tecnossolos encontrados em literatura, mas inferiores ao solo de controle. O biochar e a carbonatação mineral foram os meios mais relevantes para o potencial de captura de CO₂: aproximadamente 65 t CO₂eq ha⁻¹, quatro vezes mais do que os sistemas tradicionalmente utilizados para recuperação de locais de disposição de rejeito de carvão.

A abordagem aqui investigada prioriza princípios sustentáveis, concentrando-se na economia circular para a gestão de resíduos de carvão e a mitigação de GEE. Além disso, é uma solução baseada na natureza, em conformidade com os ODS e contribui com medidas de mitigação para limitar o aquecimento global a 1,5°C. A implementação desta prática é recomendada para empresas de mineração de carvão ou outros minerais com base nas suas necessidades específicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao programa USPSten pelo apoio financeiro e ao Centro Tecnológico, Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC) pela assistência técnica e colaboração.



5. REFERÊNCIAS

ACORDI, J.; SIMÃO, L.; FARACO, M. N. S.; BORGERT, C. H.; OLIVO, E.; MONTEDO, O. R. K.; RAUPP-PEREIRA, F. Waste valorization of coal mining waste from a circular economy perspective: A Brazilian case study based on environmental and physicochemical features. **Resources Policy**, [S. l.], v. 80, 2023. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103243. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85144625562&doi=10.1016%2Fj.resourpol.2022.103243&partnerID=40&md5=775a498d688fec1346a1616e7a158e3a>.

ALI, S. H. et al. Mineral supply for sustainable development requires resource governance. **Nature**, [S. l.], v. 543, n. 7645, p. 367–372, 2017. DOI: 10.1038/nature21359. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85015679311&doi=10.1038%2Fnature21359&partnerID=40&md5=93f1a23051d5491255e71c2770dbff87>.

AMARAL FILHO, Juarez R.; FIRPO, Beatriz A.; BROADHURST, Jennifer L.; HARRISON, Susan T. L. On the feasibility of South African coal waste for production of ‘FabSoil’, a Technosol. **Minerals Engineering**, [S. l.], v. 146, p. 106059, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106059>. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687519304704>.

ANDERSON, Soren; NEWELL, Richard. Prospects for carbon capture and storage technologies. **Annual Review of Environment and Resources**, [S. l.], v. 29, p. 109–142, 2004. DOI: 10.1146/annurev.energy.29.082703.145619.

BEERLING, David J. et al. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. **Nature**, [S. l.], v. 583, n. 7815, p. 242–248, 2020. DOI: 10.1038/s41586-020-2448-9. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-2448-9>.

BIAN, Zhengfu; MIAO, Xiexing; LEI, Shaogang; CHEN, Shen-en; WANG, Wenfeng; STRUTHERS, Sue. The Challenges of Reusing Mining and Mineral-Processing Wastes. **Science**, [S. l.], v. 337, n. 6095, p. 702–703, 2012. DOI: 10.1126/science.1224757. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.1224757>.

BOBICKI, Erin R.; LIU, Qingxia; XU, Zhenghe; ZENG, Hongbo. Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 302–320, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.11.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128511000554>.

BOLAN, M. B.; KIRKHAM, Y. S. Ok. **Spoil to Soil Mine Site Rehabilitation and Revegetation**. 1st. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.

BUI, Mai et al. Carbon capture and storage (CCS): The way forward. **Energy and Environmental Science**, [S. l.], v. 11, n. 5, p. 1062–1176, 2018. DOI: 10.1039/c7ee02342a.

CHEN, W.; XU, R. Clean coal technology development in China. **Energy Policy**, [S. l.], v. 38, n. 5, p. 2123–2130, 2010. DOI: 10.1016/j.enpol.2009.06.003. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77649342274&doi=10.1016%2Fj.enpol.2009.06.003&partnerID=40&md5=20ec86b91c40635682c4ec9e1dc16698>.

DANIELS, Wl; ZIPPER, Ce. Creation and management of productive minesoils. **Virginia Cooperative Extension Publ. 460-121.**, [S. l.], n. January 1997, p. 12, 2010. Disponível em: <https://pubs.ext.vt.edu/460/460-121/460->



121_pdf.pdf%5Cnhttps://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/55040.

DUPAS, Elisângela; BUZETTI, Salatiér; RABÊLO, Flávio Henrique Silveira; SARTO, André Luís. Carbon and carbon dioxide accumulation by marandu grass under nitrogen fertilization and irrigation. **Revista Ceres**, [S. l.], v. 63, p. 387–393, 2016.

EBRAHIMI, A.; SAFFARI, M.; HONG, Y.; MILANI, D.; MONTOYA, A.; VALIX, M.; MINETT, A.; ABBAS, A. Mineral sequestration of CO₂ using saprolite mine tailings in the presence of alkaline industrial wastes. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 188, p. 686–697, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.046.

ECHEVARRIA, Guillaume; LOUIS MOREL, Jean. Technosols of Mining Areas. **Tópicos Ci. Solo**, [S. l.], v. 9, p. 92–111, 2015.

FIELD, C. B.; RAUPACH, M. R. **The global carbon cycle: integrating humans, climate and the natural world**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.1088/1751-8113/44/8/085201.

FIRPO, Beatriz Alicia; AMARAL FILHO, Juarez Ramos Do; SCHNEIDER, Ivo André Homrich. A brief procedure to fabricate soils from coal mine wastes based on mineral processing , agricultural , and environmental concepts. **Minerals Engineering**, [S. l.], n. April 2016, 2014. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.11.005.

GAYATHRI, R.; MAHBOOB, Shahid; GOVINDARAJAN, Marimuthu; AL-GHANIM, Khalid A.; AHMED, Zubair; AL-MULHM, Norah; VODOVNIK, Masa; VIJAYALAKSHMI, Shankar. A review on biological carbon sequestration: A sustainable solution for a cleaner air environment, less pollution and lower health risks. **Journal of King Saud University - Science**, [S. l.], v. 33, n. 2, p. 101282, 2021. DOI: 10.1016/j.jksus.2020.101282. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.101282.

GHOSH, D.; MAITI, S. K. Eco-restoration of coal mine spoil: Biochar application and carbon sequestration for achieving an sustainable development goals 13 and 15. **Land**, [S. l.], v. 10, n. 11, 2021. DOI: 10.3390/land10111112.

GHOSH, D.; MAITI, S. K. Invasive weed-based biochar facilitated the restoration of coal mine degraded land by modulating the enzyme activity and carbon sequestration. **Restoration Ecology**, [S. l.], 2022. DOI: 10.1111/rec.13744.

IUSS WORKING GROUP WRB. **World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps**. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.1017/S0014479706394902.

KHUDHUR, F. W. K.; MACDONALD, J. M.; MACENTE, A.; DALY, L. The utilization of alkaline wastes in passive carbon capture and sequestration: Promises, challenges and environmental aspects. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 823, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153553.

LEUNG, Dennis Y. C.; CARAMANNA, Giorgio; MAROTO-VALER, M. Mercedes. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 39, p. 426–443, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114005450.

LOKUWADUGE, C. S. D. S.; HEENETIGALA, K. Integrating Environmental, Social and Governance (ESG) Disclosure for a Sustainable Development: An Australian Study. **Business Strategy and the Environment**, [S. l.], v. 26, n. 4, p. 438–450, 2017. DOI: 10.1002/bse.1927. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85006791405&doi=10.1002%2Fbse.1927&partnerID=40&md5=f510423bb94441ec25de11135e3760.



c9.

MI, J.; HOU, H.; RAVAL, S.; YANG, Y.; ZHANG, S.; HUA, Y.; WANG, C.; CHEN, F. Effect of crop cultivation on the soil carbon stock in mine dumps of the Loess Plateau, China. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 741, 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139809.

MUKHOPADHYAY, Sangeeta; MASTO, Reginald Ebhin. Effect of fly ash on carbon mineralization of biochar and organic manures added to mine spoil. **SN Applied Sciences**, [S. l.], v. 1, n. 9, p. 1119, 2019. DOI: 10.1007/s42452-019-1140-x. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1140-x>.

NEMA, Pragma; NEMA, Sameer; ROY, Priyanka. An overview of global climate changing in current scenario and mitigation action. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 16, n. 4, p. 2329–2336, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.044>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112000457>.

OLAJIRE, Abass A. A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO₂. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, [S. l.], v. 109, p. 364–392, 2013. DOI: 10.1016/j.petrol.2013.03.013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2013.03.013>.

PRIMAVESI, OMASPR; ARZABE, Cristina; PEDREIRA, M. dos S. **Aquecimento global e mudanças climáticas: uma visão integrada tropical**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007.

RAUPACH, Michael R.; MARLAND, Gregg; CIAIS, Philippe; LE QUÉRE, Corinne; CANADELL, Josep G.; KLEPPER, Gernot; FIELD, Christopher B. Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, [S. l.], v. 104, n. 24, p. 10288–10293, 2007. DOI: 10.1073/pnas.0700609104.

RENFORTH, Phil. The negative emission potential of alkaline materials. **Nature communications**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 1401, 2019.

REZAEI, Mohammad; RAJAGOPALAN, Venkat N.; HONAKER, Rick Q. Conceptual modifications of coal preparation plants to minimize potential environmental issues associated with coal waste disposal. **Fuel**, [S. l.], v. 250, p. 352–361, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.067>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236119304417>.

RUIZ, Francisco; CHERUBIN, Maurício Roberto; FERREIRA, Tiago Osório. Soil quality assessment of constructed Technosols: Towards the validation of a promising strategy for land reclamation, waste management and the recovery of soil functions. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 276, n. June, 2020. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111344.

SÉRÉ, Geoffroy; SCHWARTZ, Christophe; OUVARD, Stéphanie; SAUVAGE, Claire; RENAT, Jean-Christophe; MOREL, Jean Louis. Soil construction: A step for ecological reclamation of derelict lands. **Journal of Soils and Sediments**, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 130–136, 2008. DOI: 10.1065/jss2008.03.277. Disponível em: <https://doi.org/10.1065/jss2008.03.277>.

SIX, Johan; FREY, S. D.; THIET, R. K.; BATTEN, K. M. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 70, n. 2, p. 555–569, 2006.

TAYEBI-KHORAMI, Maedeh; EDRAKI, Mansour; CORDER, Glen; GOLEV, Artem. Rethinking mining waste through an integrative. **Minerals**, [S. l.], v. 9(5), n. 2019, p. 286, 2019.

THAVAMANI, Palanisami; SAMKUMAR, R. Amos; SATHEESH, Viswanathan; SUBASHCHANDRABOSE, Suresh R.; RAMADASS, Kavitha; NAIDU, Ravi; VENKATESWARLU, Kadiyala; MEGHARAJ, Mallavarapu. Microbes from mined sites: Harnessing their potential for reclamation of derelict mine sites. **Environmental Pollution**, [S. l.], v. 230, p. 495–505, 2017. DOI:



10.1016/j.envpol.2017.06.056. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.056>.

TOST, M.; HITCH, M.; CHANDURKAR, V.; MOSER, P.; FEIEL, S. The state of environmental sustainability considerations in mining. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 182, p. 969–977, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.051. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85043590608&doi=10.1016%2Fj.jclepro.2018.02.051&partnerID=40&md5=04afa67626169c43004e8de14ea7967a>.

VALENTA, Rick K. et al. Decarbonisation to drive dramatic increase in mining waste—Options for reduction. **Resources, Conservation and Recycling**, [S. l.], v. 190, p. 106859, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106859>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922006917>.

WEILER, J.; FIRPO, B. A.; SCHNEIDER, I. A. H. Coal waste derived soil-like substrate: An opportunity for coal waste in a sustainable mineral scenario. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 174, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.341.

WEILER, J.; FIRPO, B. A.; SCHNEIDER, I. A. H. Technosol as an integrated management tool for turning urban and coal mining waste into a resource. **Minerals Engineering**, [S. l.], v. 147, 2020. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.106179.

XIE, H. P.; ZHOU, H. W.; XUE, D. J.; WANG, H. W.; ZHANG, R.; GAO, F. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth. **Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society**, [S. l.], v. 37, n. 4, p. 535–542, 2012. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84861449351&partnerID=40&md5=05bc1b701afc15679ae593597566ea6c>.

YANG, Yajun; LIU, Hexiang; DAI, Yunchao; TIAN, Haixia; ZHOU, Wei; LV, Jialong. Soil organic carbon transformation and dynamics of microorganisms under different organic amendments. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 750, p. 141719, 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141719. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141719>.

ZHENG, Xiaoqi et al. Greenhouse gas emissions from extractive industries in a globalized era. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 343, p. 118172, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118172>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030147972300960X>.

