



FERTILIZANTES ORGANOMINERAIS À BASE DE RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DE CARVÃO E DA AGROINDÚSTRIA: UMA ANÁLISE PRELIMINAR

FERTILIZANTES ÓRGANO-MINERALES A BASE DE RESIDUOS DEL PROCESAMIENTO DEL CARBÓN Y DE LA AGROINDUSTRIA: UN ANÁLISIS PRELIMINAR

WASTE-BASED ORGANO-MINERAL FERTILIZERS FROM COAL PROCESSING AND OF AGRO-INDUSTRY: A PRELIMINARY ANALYSIS

<https://doi.org/10.31692/IIICIAGRO.0036>

Eduarda Fraga Olivo¹; Maria Fernanda Ebs²; Lisandro Simão³ Jairo José Zocche⁴; Fabiano Raupp-Pereira⁵

RESUMO

Este estudo fundamenta-se na hipótese de que algumas frações residuais do beneficiamento do carvão “run-of-mine” (ROM) da Bacia Carbonífera Catarinense apresentam potencialidade como resíduo candidato para a produção de fertilizantes organominerais (produto candidato). Tem como objetivo avaliar o potencial da fração residual gerada nas diversas etapas do processamento do carvão ROM, para a composição de fertilizantes organominerais, como forma de valorização de resíduos. A amostragem foi concentrada na fração inorgânica do carvão ROM, que atualmente é destinada em sua maior parte à depósitos tabulares controlados e resultou em 24 amostras identificadas por sequencia alfanumérica A1 a F6. Seguimos a sistemática de Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicação (CPQvA), para avaliar a potencialidade dos resíduos para a produção de fertilizantes organominerais. As amostras dos resíduos foram classificadas (C) conforme sua periculosidade. O potencial de uso (P) teve por base a composição química das amostras em pó dos resíduos do beneficiamento do carvão ROM, analisada por Espectroscopia de Fluorescência (FRX), pH (coleta e estoque), Perda ao Fogo (% PF) e formas de enxofre (S) e, composição mineralógica, determinada por Difractometria de Raios X (DRX). Os dados relativos às quantidades/viabilidade (Qv) foram obtidos da literatura científica. Para a aplicação (A), analisamos apenas a nossa própria proposta, ou seja, o aproveitamento dos resíduos do carvão ROM para a produção de fertilizantes organominerais. A seleção das características químicas específicas dos resíduos se deu com base na Instrução Normativa brasileira nº 61 de 08 de julho de 2020. De acordo com a composição química, duas amostras evidenciaram potencial de utilização para a produção de fertilizantes: as amostras A3 e F6. Ambas as amostras evidenciaram valores de pH de estoque neutro (A3 = 7,0 e F6 = 7,1) baixos teores percentuais de Fe₂O₃ (A3 = 4,2% e F6 = 3,2%) baixos teores de SO₃ (A3 = 0,5% e F6 = 1,2%) e baixos teores de S total (St = 1,0%). Estas foram as característica que qualificam as duas amostras como resíduos candidatos a serem utilizadas na

¹ Curso de Ciências Biológicas, Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), eduardaolivo@unesc.net

² Curso de Ciências Biológicas, Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), mfernandaebbs@gmail.com

³ Grupo de Pesquisa Valora, Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), lisandrosimao@gmail.com

⁴ Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), jjz@unesc.net

⁵ Pós-Doutor, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), fraupp@unesc.net

composição de fertilizantes organominerais, de acordo com a legislação brasileira. No entanto, como é um estudo exploratório de caráter preliminar deve ser aprofundado, sobretudo com a produção experimental do fertilizante, atividade que será desenvolvida na sequência das pesquisas.

Palavras-Chave: Bacia Carbonífera Catarinense, Valorização de resíduos, Economia Circular.

RESUMEN

Este estudio parte de la hipótesis de que algunos de los residuos del procesamiento del carbón run-of-mine (ROM) de la Cuenca Carbonífera Catarinense tienen potencial como residuo candidato para la producción de fertilizantes organominerales (producto candidato). Su objetivo es evaluar el potencial de la fracción residual generada en las diferentes etapas del procesamiento del carbón ROM, para la composición de fertilizantes organominerales, como forma de valuación de residuos. El muestreo se concentró en la fracción inorgánica del carbón ROM, que actualmente se destina en su mayoría a depósitos tabulares controlados y resultó en 24 muestras identificadas por secuencia alfanumérica A1 a F6. Seguimos el sistema de Clasificación, Potencialidad, Cantidad/viabilidad y Aplicación (CPQvA) para evaluar el potencial de los residuos para la producción de fertilizantes organominerales. Las muestras de residuos se clasificaron (C) según su peligrosidad. El potencial de uso (P) se basó en la composición química de las muestras de polvo de los residuos del procesamiento del carbón ROM, analizadas por Espectroscopía de Fluorescencia (FRX), pH (recolección y almacenamiento), Pérdida por Incendio ((% PI) y formas de azufre (S) y, composición mineralógica, determinada por Difractometría de Rayos X (XRD). Los datos sobre cantidades/viabilidad (Qv) se obtuvieron de la literatura científica. Para la aplicación (A), analizamos solo nuestra propia propuesta, es decir, el uso de los residuos para la producción de fertilizantes organominerales. La selección de las características químicas específicas de los residuos se basó en la Instrucción Normativa brasileña n° 61 del 8 de julio de 2020. Según la composición química, dos muestras presentaron potencial para su uso en la producción de fertilizantes: las muestras A3 y F6. Ambas muestras mostraron valores de pH neutrales (A3 = 7.0 y F6 = 7.1) niveles bajos de Fe_2O_3 (A3 = 4.2% y F6 = 3.2%) niveles bajos de SO_3 (A3 = 0.5% y F6 = 1.2%) y niveles bajos de S total (St = 1,0%). Esas fueron las características que calificaron las dos muestras como residuos candidatos a ser utilizados en la composición de fertilizantes organominerales de acuerdo con la legislación brasileña. Sin embargo, por tratarse de un estudio exploratorio de carácter preliminar, se debe profundizar, especialmente con la producción experimental del fertilizante, actividad que se desarrollará como resultado de la investigación.

Palabras Clave: Cuenca Carbonífera Catarinense, Valorización de Residuos, Economía Circular.

ABSTRACT

This study is based on the hypothesis that the residues from the processing of run-of-mine (ROM) coal from the Catarinense Carboniferous Basin have potential as a candidate residue for the production of organomineral fertilizers (candidate product). Its objective is to evaluate the potential of the residual fraction generated in the different stages of the processing of ROM coal, for the composition of organomineral fertilizers, as a form of waste valorization. Sampling was concentrated on the inorganic fraction of ROM, which is currently mostly destined for controlled tabular dumps, and resulted in 24 samples identified by alphanumeric sequence A1 to F6. We follow the Classification, Potentiality, Quantity/Viability and Application (CPQvA) systematic to assess the potential of residues for the production of organomineral fertilizers. Waste samples were classified (C) according to their hazardousness. The potential for use (P) was based on the chemical composition of the powder samples of waste from the processing of ROM coal, analyzed by Fluorescence Spectroscopy (FRX), pH (collection and storage), Loss of Ignition ((% LOI), and forms of sulfur (S) and, mineralogical composition, determined by X-Ray Diffraction (XRD). Data on quantities/viability (Qv) were obtained from the scientific literature. For application (A), we analyzed only our proposal: the use of ROM coal for the production of organomineral fertilizers. The selection of the specific chemical characteristics of the residues was based on Brazilian Normative Instruction N°. 61 of July 8, 2020. According to the chemical composition, two samples showed potential for use in the production of fertilizers: samples A3 and F6. Both samples showed neutral stock pH values (A3 = 7.0 and F6 = 7.1) low levels of Fe_2O_3 (A3 = 4.2% and F6 = 3.2%) low levels of SO_3 (A3 = 0.5% and F6 = 1.2%) and low

levels of total S ($St = 1.0\%$). According to Brazilian legislation, these were the characteristics that qualify the two samples as candidate residues to be used in the composition of organomineral fertilizers. However, as it is an exploratory study of a preliminary nature, it must be deepened, especially with the experimental production of the fertilizer. This activity will be developed as a result of the research.

Keywords: Catarinense Coal Basin, Waste recovery, Circular Economy.

INTRODUÇÃO

O carvão catarinense se caracteriza pela presença de elevados teores de sulfetos, pirita e marcassita (SILVA *et al.*, 2010), pela presença de compostos químicos de relevância ambiental, percentual de cinzas em torno de 50 – 60% e teores de enxofre de 3,3 – 7,7%, dos quais, a maior parte ocorre como enxofre piritico (KALKREUTH *et al.*, 2010). Tais características resultam da influência do ambiente deposicional do tipo estuário-barreira, a que as jazidas foram submetidas, o que produz sedimentos ricos em argilas e com elevado teor de enxofre (KALKREUTH *et al.*, 2010), conferindo baixa qualidade ao carvão catarinense quando comparado aos carvões de outras regiões do mundo.

Carvões de baixa qualidade e com alta geração de cinzas têm baixo poder calorífico e são comumente preteridos como combustíveis (YAN *et al.*, 2001). Sua exploração causa diversos problemas ambientais (SANTOS *et al.*, 2019) e a busca por usos alternativos é algo mundialmente desejável (PIETRZYKOWSKI, 2019). O uso de carvões de baixa qualidade (700 g.kg^{-1}) como fertilizante orgânico, organomineral ou condicionador do solo é uma possibilidade promissora que vem sendo estudada (YAN *et al.*, 2001; DICK *et al.*, 2002). O aproveitamento de frações residuais do beneficiamento do carvão, para a produção de substrato para o cultivo de plantas (WEILER; FIRPO; SCHNEIDER, 2018) e para a construção de tecnosolos (FIRPO; AMARAL FILHO; SCHNEIDER, 2015; WEILER; FIRPO; SCHNEIDER, 2020; AMARAL FILHO *et al.*, 2020), também são oportunidades de valorização de resíduos da mineração que tem sido desenvolvidas nas últimas décadas.

Fertilizante organomineral é definido como um fertilizante obtido por meio de mistura, reação química, granulação ou dissolução em água, de fertilizantes inorgânicos (com teores de macro e micronutrientes conhecidos) com resíduos orgânicos, ou corretivos do solo (ANTILLE *et al.*, 2013). Os fertilizantes organominerais melhoram as propriedades físicas e químicas do solo, elevam a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e aumentam a produtividade das culturas (KOMINKO; GORAZDA; WZOREK, 2017). De modo geral há carência de informações sobre a potencialidade de utilização da fração residual do carvão ROM para a composição de fertilizantes organominerais, embora vários estudos tenham tratado da utilização das cinzas da

combustão do carvão em termeléricas para a utilização na agricultura (BASU *et al.*, 2009). No Brasil, investigações relacionadas ao uso de cinzas do carvão na composição de fertilizantes ainda são incipientes (FLORES *et al.*, 2017) e até onde se tem conhecimento, não há estudos sobre a utilização de resíduos do beneficiamento do carvão na agricultura ou para a composição de fertilizantes.

Este estudo fundamenta-se na hipótese de que algumas frações residuais do beneficiamento do carvão ROM da Bacia Carbonífera Catarinense apresentam potenciais de utilização como componente funcional de fertilizante organomineral. Portanto, objetiva-se avaliar o potencial de duas destas frações residuais, geradas nas diversas etapas do processamento do carvão ROM, como forma de valorização de resíduos.

Seguiu-se os critérios sistêmicos para a valorização de resíduos (CPQvA): Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicação, apresentada por Raupp-Pereira (2006), para selecionar as frações residuais do beneficiamento do carvão ROM, com potencial para produção de fertilizantes organominerais. Nesta seleção, foram realizados ensaios de Espectroscopia de Fluorescência (FRX), Perda ao Fogo (% PF), determinação do pH, formas de enxofre (S) e, Difratomia de Raios X (DRX) para a caracterização de frações residuais potenciais para a produção de fertilizantes organominerais, com base na Instrução normativa (IN) nº 61 de 08 de julho de 2020 (BRASIL, 2020).

Espera-se com este estudo, o desenvolvimento de alternativas para gestão de resíduos que promovam a simbiose entre o meio ambiente e a indústria, e que contribuam para a transição para uma Economia Circular na indústria da mineração de carvão.

REFERENCIAL TEÓRICO

A produção de alimentos de boa qualidade e em quantidade suficiente para atender a demanda mundial leva a um aumento na dependência de insumos de fertilizantes e está diretamente relacionada com o crescimento populacional humano, que ainda se encontra em franca expansão (KOMINKO; GORAZDA; WZOREK, 2017).

A produção agrícola e alimentar estão entre as principais causas do esgotamento dos recursos naturais (KOMINKO; GORAZDA; WZOREK, 2017) e as previsões indicam que nos próximos 40 anos a demanda por alimentos aumentará em mais de 60%, pois, prevê-se que a população global aumentará para 9,3 bilhões em 2050 (LEE, 2011). Estima-se que o consumo de N, P e K na agricultura tenha aumentado anualmente, no período 2014–2018, na ordem de

1,4, 2,2, e 2,6%, respectivamente (FAO, 2015). Diversos macronutrientes, como por exemplo o fósforo, se originam de fontes não renováveis e podem vir a ser exauridas nos próximos 50-150 anos (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009), uma vez que as reservas de fosfatos estão previstas para durarem o máximo de 300-400 anos (DAWSON; HILTON, 2011). Assim sendo é urgente minimizar as perdas de macronutrientes por lixiviação no solo, fechando ciclos para o aproveitamento de resíduos agroindustriais como corretivos agrícolas.

As ações antrópicas podem degradar os solos em um tempo muito curto (JIE *et al.*, 2002) aumentando a escassez desse recurso (BUTA *et al.*, 2019; EPELDE *et al.*, 2019). A economia global está baseada em recursos minerais finitos e combustíveis fósseis (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019; SAUVÉ; BERNARD; SLOAN, 2016), com demanda que está aumentando rapidamente, o que resulta em uma série de consequências ambientais (BUTA *et al.*, 2019). Os avanços da ciência e da tecnologia têm impulsionado continuamente o consumo de recursos minerais, que são a base do desenvolvimento econômico, da expansão industrial, da urbanização e do crescimento populacional (SHEORAN; SHEORAN; POONIA, 2010), pois esses processos antrópicos são fortemente dependentes da indústria de mineração para operar e manter o padrão de vida humano.

O processamento do carvão ROM, em geral, envolve diversas operações físicas, como cominuição, classificação múltipla de tamanho das partículas, limpeza, desague e secagem do carvão (MILLER, 2017). As características físicas e químicas do produto comercializável e dos resíduos originados em cada etapa do beneficiamento estão correlacionadas ao processo de coalificação, à tecnologia de mineração e processamento e as especificações técnicas definidas pelo mercado consumidor (MILLER, 2017). Para alcançar a qualidade exigida pelas usinas termoelétricas do sul do Brasil (até 43% de cinzas e até 2,3% de enxofre) são aplicadas técnicas de concentração (OLIVEIRA *et al.*, 2013), o que resulta na disposição de cerca de 60-70% do carvão ROM como resíduos (AMARAL FILHO *et al.*, 2013), os quais são ricos em sulfetos, pirita, minerais argilosos (SILVA *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2013) e metais pesados ambientalmente relevantes (KALKREUTH *et al.*, 2010). Esses resíduos tem sido descartados em depósitos tabulares controlados, cobertos por solo superficial e semeadura de gramíneas exóticas de rápido crescimento (AMARAL FILHO *et al.*, 2013). No entanto, esta é uma prática antiecológica e antieconômica porque, para recuperar uma área, outra será degradada em outro lugar (WEILER; FIRPO; SCHNEIDER, 2020). Para a Bacia Carbonífera Catarinense, estima-se que cerca de 320 milhões de toneladas de resíduos de carvão já tenham sido produzidas

(WEILER; SCHNEIDER, 2019).

Estudos realizados sobre o aproveitamento de carvão de baixa qualidade energética (e.g. YAN *et al.*, 2001; DICK *et al.*, 2002; MIKOS-SZYMAŃSKA, *et al.*, 2019), sobre o aproveitamento de cinzas de usinas termelétricas (e.g. BASU *et al.*, 2009; FLORES *et al.*, 2017), sobre a utilização de resíduos da mineração do carvão para a produção de substratos para produção vegetal (WEILER; FIRPO; SCHNEIDER, 2018) e para a construção de tecnosolos (e.g. FIRPO; AMARAL FILHO; SCHNEIDER, 2015; WEILER; FIRPO; SCHNEIDER, 2020; AMARAL FILHO *et al.*, 2020), nos indicam a potencialidade de tais resíduos para a produção de fertilizantes organominerais.

Os fertilizantes organominerais são formados pela mistura ou combinação física de adubos orgânicos com adubos minerais (ANTILLE *et al.*, 2013; ULSENHEIMER *et al.*, 2016; BRASIL, 2020). A matéria orgânica associada as fontes minerais constitui uma tecnologia que aumenta a eficiência dos fertilizantes (ULSENHEIMER *et al.*, 2016) e propicia a redução nos custos com adubações das lavouras. Estes fatores promovem melhorias nos solos, tais como maior disponibilidade de macro e micronutrientes para as plantas (KIEHL, 1985). Na forma sólida, os fertilizantes organominerais devem conter no mínimo: Carbono Orgânico (8%), macronutrientes primários (N, P e K) isoladamente ou em mistura (80 mmol_c kg⁻¹), macronutrientes secundários (Ca, Mg e S) (10%) e umidade máxima (5 - 30%) (BRASIL, 2020). Dentre os macronutrientes, o enxofre desempenha função essencial no desenvolvimento e qualidade da planta, desde a participação na produção de aminoácidos e proteínas de controle até o controle hormonal, fotossíntese e mecanismos de defesa (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015).

No Brasil, o principal uso do enxofre é na indústria de fertilizantes, sendo este proveniente de folhelho pirobetuminoso (5%), beneficiamento do petróleo (28%) e processo de ustulação de sulfetos metálicos (67%) (FONSECA; BACIC, 2009). Porém, a produção nacional de enxofre não atende a demanda, sendo a importação responsável por quase a totalidade do suprimento (CZYCZA *et al.*, 2008; DAMINATO; BENITIZ, 2015).

Entre os anos de 1970 e 1990 os resíduos do carvão ROM da Bacia Carbonífera Catarinense, ricos em compostos piritosos, foram processados para produção de ácido sulfúrico, atividade abandonada por motivos econômicos (WEILER, 2016). Atualmente o País consome grande quantidade de enxofre, principalmente na forma de ácido sulfúrico para utilização na indústria de produtos químicos, siderurgia e agricultura (aproximadamente 55% do ácido

sulfúrico são empregados como insumo na produção de fertilizantes) (WEILER, 2016). A fração residual do carvão ROM brasileiro e em especial o de Santa Catarina, apresenta potencial para a recuperação do enxofre, uma alternativa atraente para atender a demanda publicada no Diário Oficial da União nº 115 (BRASIL, 2021), a qual cita o enxofre como sendo o primeiro elemento da lista dos bens minerais dos quais o País depende de importação em alto percentual para o suprimento de setores vitais da economia. Esta demanda, aliada ao problema ambiental que os rejeitos da mineração de carvão com a presença de enxofre ocasionam, como a drenagem ácida de mina (DAM), estimulam pesquisas que busquem por soluções integradas para viabilizar técnica-economicamente o uso total desses rejeitos (BRASIL, 2021).

A gestão de resíduos na perspectiva da Economia Circular, semelhante aos sistemas biológicos, visa maximizar o ciclo de vida dos materiais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2022), transformando resíduos em matérias-primas e é uma excelente alternativa que apoia a transição de uma Economia Linear para uma Economia Circular, à qual, os objetivos desse estudo estão alinhados.

METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se como de natureza quantitativa experimental no campo das Ciências e Engenharia de Materiais e foi desenvolvida no Grupo de Pesquisa VALORA – Desenvolvimento de estratégias para o avanço da Economia Circular da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma, SC, Brasil.

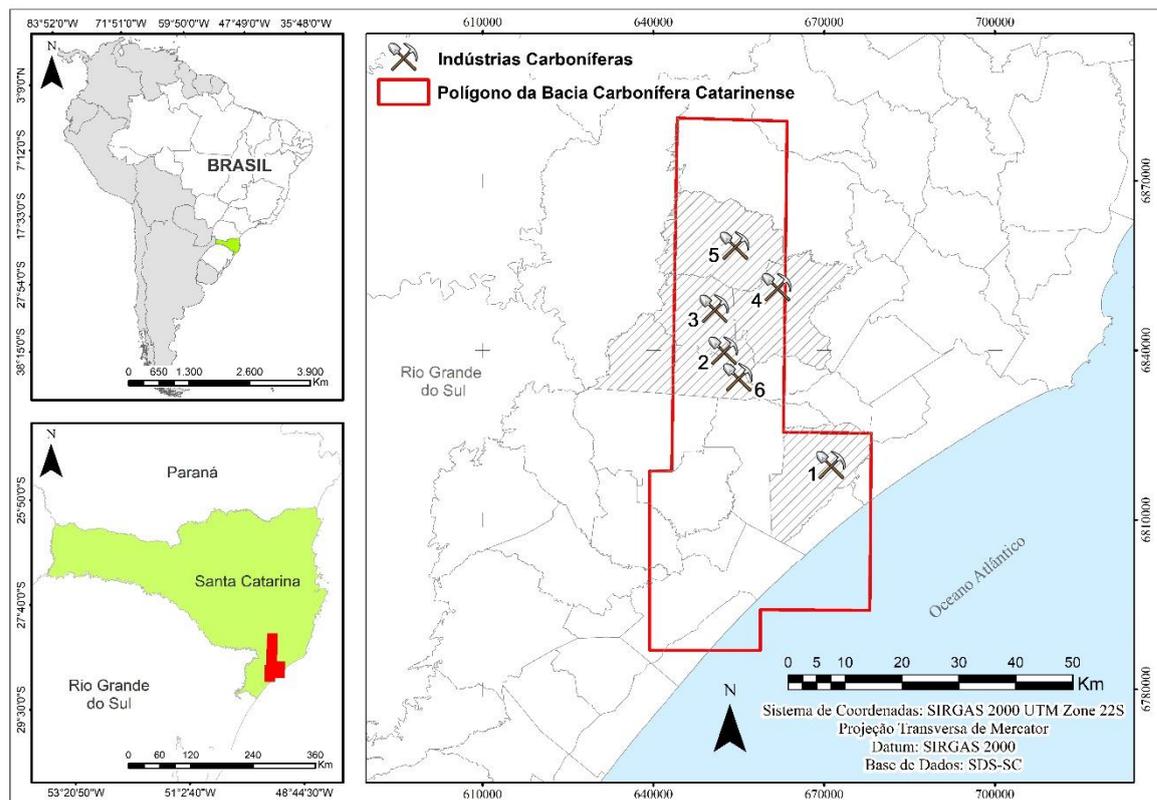
A coleta de amostras e análise de dados se deu com base nas características químicas e mineralógicas da fração residual do beneficiamento do minério bruto do carvão, denominado de run-of-mine (ROM), como resíduos candidatos à fornecer matéria-prima para o material de interesse tecnológico (produto candidato - fertilizante organomineral), em uma perspectiva de valorização de resíduos alinhada à Economia Circular.

As frações residuais do carvão ROM foram amostrados de acordo com a NBR 10007/2004 (ABNT, 2004a) em diferentes etapas do beneficiamento de seis mineradoras da Bacia Carbonífera Catarinense (BCC) (Figura 01). Estas mineradoras fornecem carvão (fração energética) para o Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, o qual está localizado no município de Capivari de Baixo, sul de Santa Catarina.

A amostragem foi concentrada na fração inorgânica do carvão ROM, que atualmente é destinada em sua maior parte à depósitos tabulares controlados e resultou em 24 amostras

identificadas por sequencia alfanumérica A1 a F6. As amostras dos resíduos foram classificadas (C) conforme sua periculosidade (ABNT, 2004b). O potencial de uso (P) teve por base a composição química das amostras em pó dos resíduos do beneficiamento do carvão ROM, analisada por Espectroscopia de Fluorescência (FRX), pH, Perda ao Fogo (% PF) e formas de enxofre (S) e, composição mineralógica, determinada por Difractometria de Raios X (DRX). Os dados relativos às quantidades/viabilidade (Qv) foram obtidos da literatura científica. Para a aplicação (A), analisamos apenas a nossa própria proposta, ou seja, o aproveitamento da fração residual do carvão ROM para a produção de fertilizantes organominerais.

Figura 01: Localização das seis mineradoras fornecedoras de amostras da fração residual de carvão ROM, coletadas nos diferentes etapas do beneficiamento, na Bacia Carbonífera Catarinense, sul de Santa Catarina, Brasil.



Fonte: Própria (2022)

As análises químicas e mineralógicas seguiram os métodos por energia dispersiva (espectrofotômetro Shimadzu - EDX 7000); pH (pH da H₂O) determinada por meio da razão resíduo:água de 4 g:1000 ml v/v solubilizadas em H₂O e a leitura em medidor AKSO - AK95. A Perda ao Fogo foi determinada a temperatura de 950 °C em forno mufla, por meio de

combinação de H₂O, matéria orgânica e inorgânica (ASTM D7348, 2007). As formas de enxofre (S) foram determinadas por combustão em forno tubular de alta temperatura (ASTM D2492, 2012), sendo o teor de S total determinado a partir de 0,2 g de amostra em pó em temperatura de 1350 ± 5 °C (forno LECO CHN 628 SERIES SULFUR); o S pirítico foi determinado por Titulometria, a partir da fervura por 30 min de 2 g da amostra diluídas em 50 mL HCl + 0,2 mL a 0,25 mL de C₂H₅OH, seguida de lavagem repetida com HCl e filtragem e; o S sulfático foi determinado por Titulometria de Neutralização com HCl, conforme os procedimentos adotados para obtenção do S pirítico até a fase da filtragem, seguida da adição de 5 mL de H₂O₂, fervura por 5 min, filtragem e adição de 0,1 mL de alaranjado de metila. Finalmente, as formas de S foram calculadas como segue: %S_s = [0,13735 × (massa em g de BaSO₄ – massa em g da Referência Padrão) × 100]/massa em g do resíduo analisado; S orgânico = S total – (S sulfático + S pirítico). As fases mineralógicas foram determinadas por DRX (difratômetro Shimadzu LabX XRD 6100) com radiação Cu, voltagem do tubo de 40 kV, corrente de 30 mA, leitura entre 4° e 70° (2θ) e velocidade 0,02°/s.

A seleção das características químicas específicas das frações residuais do beneficiamento do carvão ROM para a produção de fertilizantes organominerais se deu com base na Instrução normativa (IN) n° 61 de 08 de julho de 2020 (BRASIL, 2020).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As caracterizações para a seleção sistêmica de matérias-primas secundárias de baixo carbono e a preços acessíveis, concentrou-se na identificação de materiais, processos, tecnologias e sistemas que permitam o aproveitamento de resíduos e coprodutos industriais em componentes valiosos para a produção sustentável de soluções econômicas circulares de utilização em fertilizantes organominerais.

O alto teor de cinzas (de 50 – 60%) e enxofre (3,3 – 7,7%) (KALKREUTH *et al.*, 2010) no carvão da Bacia Carbonífera Catarinense resulta em uma recuperação média de aproximadamente 36% do ROM após o processamento (AMARAL FILHO *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2013). Os 64% restantes consistem em resíduos ricos em sulfeto, pirita, minerais argilosos (OLIVEIRA *et al.*, 2013) e metais ambientalmente relevantes (SILVA *et al.*, 2010), sendo portanto, classificados como resíduos não inertes (classe II A) de acordo com a NBR 10004/2004 (ABNT, 2004b).

Para além das características químicas e mineralógicas torna-se importante relacionar

acidez/alcalinidade (valores de pH) com os materiais em meio aquoso. Muitos precipitados têm suas solubilidades alteradas em função do potencial Hidrogeniônico (pH), como consequência da alteração na concentração dos íons, por reações com o H_3O^+ ou OH^- do meio (OLIVEIRA; SILVA; TÓFANI, 2019). Para este estudo o pH foi determinado em dois momentos: na coleta do material e em estoque, um ano depois da coleta (Tabela 01). A Composição química, pH e a Perda ao Fogo de frações residuais do beneficiamento do carvão ROM, coletadas em diferentes etapas do beneficiamento na Bacia Carbonífera Catarinense são apresentadas na Tabela 01.

Tabela 01: pH, composição química, e perda ao fogo das amostras (A1 – F6) das frações residuais do carvão ROM, coletadas em diferentes etapas do beneficiamento em seis mineradoras na Bacia Carbonífera Catarinense.

ID	pH		Composição Química (%)											% PF
	Coleta	Estoque	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	MgO	MnO	P ₂ O ₅	ZrO ₂	
A1	7,7	3,1	49,6	20,8	0,6	6,7	1,5	2,8	1,6	-	-	-	0,1	16,0
A2	8,0	7,0	36,7	16,1	1,9	11,3	7,6	2,3	1,3	-	-	-	-	22,4
A3	7,5	7,0	48,7	22,2	0,5	4,2	1,4	3,0	1,4	-	-	-	-	18,3
B1	6,0	3,3	36,4	12,7	10,8	8,4	6,4	3,9	1,1	0,5	0,2	0,1	-	19,5
B2	4,8	2,9	37,9	13,4	3,7	18,7	2,1	3,0	0,7	0,5	0,1	-	-	19,7
B3	3,4	2,8	37,5	13,9	10,2	12,6	5,4	3,6	0,8	-	0,1	0,1	-	15,7
B4	5,4	3,0	47,6	16,8	1,7	10,1	1,2	4,5	0,9	0,5	-	0	-	16,5
C1	6,1	2,6	47,2	18	0,5	11,7	1,0	4,4	1,1	0,6	-	-	-	15,2
C2	8,2	7,2	37,3	13,8	0,9	18,0	2,1	3,3	0,8	-	0,1	-	0,1	23,4
C3	4,2	2,7	44,6	20,5	0,1	12,8	0,3	2,7	1,4	-	-	-	0,1	17,3
C4	3,1	2,7	47,0	23,8	0,1	6,0	0,4	3,2	1,6	-	-	-	-	17,7
D1	2,9	2,4	42,4	16,9	4,3	8,8	2,1	2,7	1,4	-	-	-	0,1	21,1
D2	3,2	2,6	40,5	18,1	4,3	9,9	2,6	2,6	1,3	-	-	-	0,1	20,4
D3	3,6	2,5	35,5	15,7	2,2	16,9	1,2	2,0	1,0	-	-	-	0,1	25,2
D4	3,2	2,5	45,3	16,9	3,0	5,4	1,8	2,5	1,2	-	-	-	0,1	23,7
D5	3,2	2,6	40,3	14,9	4,8	8,0	2,3	2,7	1,3	-	-	-	0,1	25,5
D6	2,8	2,7	43,2	17,2	0,8	8,5	0,7	3,1	1,3	-	-	-	-	24,9
E1	3,7	3,0	39,3	15,3	2,5	10,7	5,0	3,5	1,0	0,5	0,1	-	-	22,0
F1	2,6	2,4	29,2	14,5	0,1	18,3	0,1	1,3	0,7	-	-	-	-	35,6
F2	3,6	2,5	40,4	18	0,1	12,5	-	1,8	1,0	-	-	-	-	26,0
F3	3,2	2,3	8,2	3,4	0,1	46,7	0,1	0,3	-	-	-	-	0,1	41,0
F4	3,5	2,7	49,8	22,8	0,1	2,9	-	2,5	1,6	-	-	-	0,1	20,1
F5	3,4	2,5	40,6	17,4	0,3	10,1	0,2	1,7	1,0	-	-	-	-	28,5
F6	8,5	7,1	47,9	22,0	1,2	3,2	1,0	2,2	1,4	0,7	-	-	0,1	20,2

Fonte: Própria (2022).

O teor de Fe presente nos resíduos que serão utilizados para a produção de fertilizantes deve ser baixo, equivalente a 1,5%/kg da amostra, pois valores elevados de Fe, tanto em

fertilizantes quanto no solo se tornam tóxicos à planta (ULSENHEIMER *et al.*, 2016). A concentração de Fe aceitável em plantas cultivadas pode variar de 50 a 150 mg/kg na matéria seca de folhas (MENDES, 2007).

A fração piritosa encontrada no carvão da Bacia Carbonífera Catarinense tem sua origem na associação de sedimentos marinhos e estuarinos ricos em sulfatos (SO_4^{2-}) com a matéria orgânica que originou o carvão, durante o processo de deposição (KALKREUTH *et al.*, 2010). As jazidas da Bacia Carbonífera Catarinense seguem um padrão de teores químicos, ligados a local de origem, onde, os teores de enxofre variam em sua maioria de 3,4 a 7,7% em massa, dos quais, a maior parte ocorre na forma de enxofre pirítico (KAUKREUTH *et al.*, 2010).

O enxofre presente nas amostras e detectado via FRX refere-se ao enxofre pirítico da amostra. Esta constatação foi confirmada nos ensaios DRX. O enxofre pirítico em contato com o oxigênio e água gera o sulfato ferroso (FeSO_4) e o ácido sulfúrico (H_2SO_4). Esses compostos são geradores da Drenagem Ácida de Mina (DAM), que é um dos principais problemas ambientais da extração de carvão (WEILER; AMARAL FILHO; SCHNEIDER, 2016) e, portanto, a fração residual selecionada como resíduo candidato à composição do fertilizante organomineral deve ter baixo ou nenhum teor de enxofre pirítico.

Nas amostras da fração residual do carvão ROM estudadas foi detectada a presença de quatro fases mineralógicas (Figura 2): Quartzo (SiO_2), Caulinita ($\text{Al}_4(\text{OH})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})$), Pirita (FeS_2) e Ilita ($(\text{KH}_3\text{O})(\text{AlMgFe})_2(\text{SiAl})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}]$). A pirita é a fase relacionada aos sulfatos e sulfetos de ferro e foi confirmada nos teores de SO_3 da caracterização química das mostras.

A análise do teor de enxofre quantifica todas as formas de enxofre presentes nas amostras (ASTM D2492, 2012). As amostras apresentaram três formas diferentes de enxofre: enxofre pirítico, enxofre sulfático e enxofre orgânico (Tabela 2).

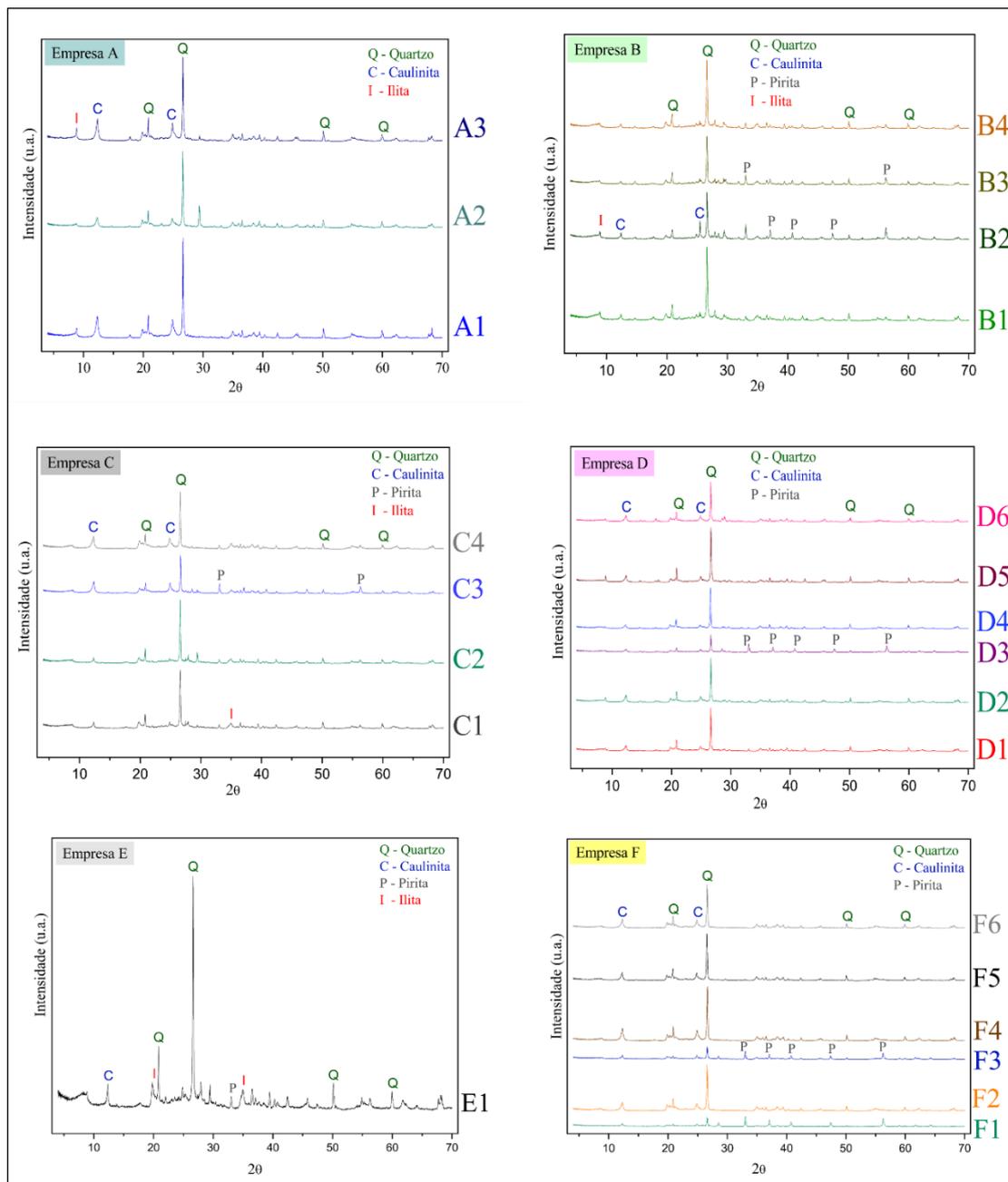
Tabela 02. Formas e teor percentual de enxofre presentes nas amostras das frações residuais do beneficiamento do ROM, selecionadas como resíduos de interesse tecnológico para a composição de fertilizante organomineral.

Amostras das Frações Residuais	Formas e Teor Percentual de Enxofre			
	Pirítico (%)	Sulfático (%)	Orgânico (%)	Total
A3	0,8	0,1	0,1	1,0
F6	0,6	0,1	0,3	1,0

Fonte: Própria (2022).

A maioria dos materiais fertilizantes contendo enxofre podem ser divididos em quatro grupos: fertilizantes contendo sulfato, fertilizantes contendo enxofre elementar, fertilizantes contendo uma combinação de sulfato e enxofre elementar e fertilizantes de enxofre líquidos (THE SULPHUR INSTITUTE, 2022). Grande parte do enxofre presente nas frações residuais amostradas, excluindo o enxofre pirítico, se encontra na forma de sulfato (SO_4) e essa é a forma de enxofre que está prontamente disponível para absorção pelas plantas (THE SULPHUR INSTITUTE, 2022).

Figura 02: Fases mineralógicas presentes nas amostras da fração residual do carvão ROM, coletadas em seis mineradoras a Bacia Carbonífera Catarinense.



Fonte: Própria (2022).

O enxofre orgânico é o mais difícil de ser removido nos processos de beneficiamento do carvão ROM por meios físicos (densidade ou lavagem), pois este é parte da própria estrutura do carvão (CALKINS, 1995). Sistemas oxidantes viabilizam a solubilização do enxofre sulfático e pirítico (PINETOWN; WARD; WESTHUIZEN, 2007; WARD, 2002; FALLAVENA *et al.*, 2013). Sendo assim, o fertilizante formado terá disponibilidade de enxofre em solos com potencial oxidativo.

Para as frações residuais do carvão ROM que apresentam menores teores de enxofre

orgânico, a concentração de sulfato dissolvido reflete o percentual de enxofre total presente na amostra de carvão e para as frações residuais com maiores teores de enxofre orgânico as concentrações de sulfato dissolvido apontam para o somatório dos teores de enxofre pirítico e sulfático (FALLAVENA *et al.*, 2013). As duas amostras das frações residuais pré-selecionadas como resíduo candidato (A3 e F6) apresentaram baixos teores percentuais de enxofre orgânico, considerando-se ao final o teor de enxofre total.

Nos fertilizantes a base de NPK, o teor de S geralmente varia entre 1% e 10% (THE SULPHUR INSTITUTE, 2022). O nitrogênio e o enxofre participam conjuntamente no metabolismo das plantas, portanto, devem ser analisados em conjunto. A relação (N/S) varia de 10-15/1 ou 0,1 a 0,4 dag ou % de enxofre por kg (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015).

As duas amostras selecionadas neste estudo, como resíduos candidatos a composição do fertilizante organomineral, apresentaram baixos teores percentuais de enxofre total. A amostra que mais se aproximou do ideal foi a fração residual F6 seguida pela amostra da fração residual A3. De acordo com as informações das mineradoras que forneceram as respectivas amostras são produzidas em torno de 1,5 tonelada/mês da fração residual A3 e 6 toneladas/mês da fração residual F6. A avaliação da quantidade de resíduos necessária de cada fração residual A3 e F6, requer a definição da composição e da proporção de cada componente do fertilizante organomineral, etapas que não serão cumpridas nesse estudo, haja vista o objetivo do mesmo que se restringe em avaliar a potencialidade das frações residuais do beneficiamento do carvão ROM como matéria prima para a composição do fertilizantes organominerais. O estudo da viabilidade relacionado a quantidade de resíduos disponíveis deverá ser avaliada em uma próxima etapa do estudo.

As especificações técnicas sobre os teores mínimos percentuais dos micro e macronutrientes em fertilizantes organominerais, conforme a IN nº 61 de 08/07/2020 (BRASIL, 2020) estão relacionadas na Tabela 03. Esses teores mínimos aceitáveis definiram a seleção dos resíduos de interesse tecnológico (produto candidato – fertilizante organomineral), com base em suas características químicas e mineralógicas.

Tabela 03: Teores mínimos percentuais dos micro e macronutrientes para a composição de fertilizantes organominerais conforme a Instrução Normativa nº 61 de 08 de julho de 2020.

Teor Mínimo (%)	Componentes																
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S	B	Cl	Co	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Se	Si	Zn
	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,01	0,1	0,005	0,02	0,02	0,02	0,005	0,005	0,003	0,05	0,1

Fonte: Instrução Normativa n. 61 de 08/07/2020 (Brasil, 2020).

Os fertilizantes organominerais são classificados em duas classes (A e B) de acordo com as matérias-primas utilizadas na sua composição. Na classe A encontram-se os produtos que utilizam matéria-prima gerada nas atividades extrativas, agropecuárias, industriais, agroindustriais e comerciais, incluindo as de origem mineral, vegetal, animal, lodos industriais e agroindustriais, de sistema de tratamento de águas residuárias, resíduos de frutas, legumes, verduras e restos de alimentos gerados em pré e pós-consumo segregados na fonte geradora (BRASIL, 2020).

De acordo com o Artigo 9º da IN nº 61 (Brasil, 2020), os fertilizantes organominerais sólidos ou fluídos destinados à aplicação no solo ou por fertirrigação devem conter: I - carbono orgânico mínimo de 8% para produto sólido e 3% para produto fluído; II – umidade máxima de 20% para produto sólido; III – CTC mínima de 80 mmol/kg para produto sólido e; IV - quanto aos macronutrientes primários, secundários e micronutrientes garantidos ou declarados do produto, no mínimo: a) para os macronutrientes primários, macronutrientes secundários e micronutrientes, quando garantidos isoladamente ou em misturas não abrangidas pela alínea “b” deste inciso, observar os valores contidos na tabela 03; b) para a soma de macronutrientes primários, soma de macronutrientes secundários e soma de micronutrientes, quando garantidos mais de um nutriente: 1 - para as misturas de macronutrientes primários: somatório NPK, NP, NK ou PK mínimo igual a 5%, podendo a estes produtos ser adicionados macronutrientes secundários ou micronutrientes; 2 - para as misturas exclusivas de macronutrientes secundários: somatório Ca+Mg+S; Ca+Mg; Ca+S ou Mg+S, mínimo igual a 3%; 3 - para as misturas exclusivas de micronutrientes: somatório mínimo de dois ou mais micronutrientes igual a 3%; 4 - para as misturas exclusivas de macronutrientes secundários com micronutrientes: somatório mínimo dos nutrientes igual a 5%; 5 - para os produtos que contenham apenas um macronutriente primário adicionados de macronutrientes secundários, micronutrientes ou ambos: somatório mínimo de todos os nutrientes igual a 5%.

De acordo com FAN; ZHANG; WANG (2014) frações residuais de carvão que apresentarem relação $Al_2O_3/SiO_2 > 0,7\%$ tem potencial para uso na composição de fertilizantes químicos ou organominerais. Com base nesses autores e apenas nessa característica, duas amostras estudadas se aproximam em termos de potencialidade: as amostras C4 ($Al_2O_3/SiO_2 = 0,5\%$) e F1 ($Al_2O_3/SiO_2 = 0,5\%$). De outra forma, os mesmos autores assinalam também que frações residuais que evidenciarem conteúdo de $SO_3 > 6\%$, podem ter o enxofre recuperado

através do processo de separação por gravidade. Nesse caso, as frações residuais B1 ($\text{SO}_3 = 10,8\%$) e B3 ($\text{SO}_3 = 10,2\%$) apresentaram potencial para tal. Isso se torna muito interessante para o presente estudo, pois, o que se pretende é selecionar tanto amostras para produção de fertilizantes, quanto para produção de enxofre, uma vez que, conforme Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021 (BRASIL, 2021), o enxofre figura como o mineral importado estratégico número um para o País. Essas indicações de potencialidades são de suma importância para a transição para a Economia Circular do carvão, principalmente para que se atinja um estado de menor deposição de resíduos. Certamente outras possibilidades se encontram ocultas junto as frações residuais e, portanto, essas frações devem ser estudadas de forma minuciosa para que não sejam tratadas todas como um resíduo único e possam ser utilizadas como matérias-primas candidatas para produtos candidatos de acordo com suas potencialidades, segundo suas características químicas, físicas e mineralógicas.

Para o desenvolvimento de fertilizantes organominerais, o ideal é a formação de um blend que se caracterize pela mistura de frações residuais do carvão ROM com frações residuais da agroindústria, como por exemplo cama de aviário, ambas com a menor transformação possível. A transformação que melhor resultaria em um produto econômico e ambientalmente sustentável seria a transformação física, pela retirada do excesso de umidade, cominuição e granulação. Esta é uma etapa que deve ser desenvolvida na continuidade desse e de outros estudos, que vêm sendo desenvolvidos pelos autores dessa pesquisa, todos com fundo essencialmente alinhados à Economia Circular.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas caracterizações química, mineralógica, de pH e formas de enxofre, duas amostras de frações residuais do carvão ROM foram selecionadas, amostras F6 e A3 (de um total de vinte e quatro geradas/amostradas) em ordem de potencialidade para a composição de fertilizantes organominerais conforme as recomendações da legislação brasileira.

No entanto, para que o desenvolvimento de fertilizantes organominerais se torne realidade, torna-se importante que o beneficiamento do carvão ROM ocorra em etapas distintas e as amostras das frações residuais sejam obtidas de forma seletiva. Também que as empresas mineradoras deixem de encaminhar/dispor estes materiais em um único local, como rejeitos. Pois esta ação inviabiliza a valorização de resíduos (neste caso frações potenciais), como o potencial evidenciado para F6 e A3 para a composição de fertilizantes organominerais com base

no teor de Fe e enxofre.

Duas frações residuais (C4 e F1) apresentarem relação $Al_2O_3/SiO_2 >$ próximo a 0,7% evidenciando também potencial para uso na composição de fertilizantes químicos ou organominerais e ainda, duas outras frações residuais (B1 e B3) evidenciarem conteúdo de $SO_3 > 6\%$, indicando potencialidade para que o enxofre nelas contido possa ser recuperado através do processo de separação por gravidade. Essas características, tendo em vista a resolução nº 2, de 18 de junho de 2021, que destaca o enxofre como o mineral estratégico número um para o País, torna estratégica a possível utilização destes materiais. Pois, a viabilidade do desenvolvimento nacional do enxofre a partir da fração residual do carvão ROM diminuiria significativamente a dependência de importações. Essas indicações de potencialidades são de suma importância para a transição para a Economia Circular.

Certamente outras possibilidades encontram-se ocultas junto as diferentes frações residuais e, portanto, estas devem ser estudadas de forma minuciosa para que possam ser utilizadas de acordo com suas potencialidades, como materias-primas candidatas para produtos candidatos.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10004. Resíduos sólidos - Classificação, second ed. Rio de Janeiro. 2004b.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10007. Amostragem de resíduos sólidos, second ed. Rio de Janeiro. 2004a.

AMARAL FILHO, J. R., SCHNEIDER, I. A. H., BRUM, I. A. S., SAMPAIO, C. H., MILTZAREK, G., SCHNEIDER, C. H. Caracterização de um depósito de rejeitos para o gerenciamento integrado dos resíduos de mineração na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil. **REM-Revista da Escola de Minas**. 66(3): 347-353. 2013.

AMARAL FILHO, J. R.; FIRPO, B. A.; BROADHURST, J. L.; HARRISON, S. T. L. On the feasibility of South African coal waste for production of “FabSoil”, a Technosol. **Minerals Engineering**, 146, 106059. 2020.

ANTILLE, D. L.; SAKRABANI, R.; GODWIN, R. J. Field-scale evaluation of biosolids-derived organomineral fertilisers applied to ryegrass (*Lolium perenne* L.) in England. **Applied and Environmental Soil Science**. 2013: Article ID 960629. 1–9. 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 2492-20. Standard test methods for forms of sulfur in coal. *In*: Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, v.05.05, 251p. 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 7348-07. Standard test methods for loss on ignition (LOI) of solid combustion residues. *In*: Book of Standards. West Conshohocken, PA, v.05.06, 6p. 2007.

BASU, M.; PANDE, M.; BHADORIA, P. B. S.; MAHAPATRA, S. C. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. **Progress in Natural Science**. 19(10): 1173–1186. 2009.

BRASIL. Instrução normativa nº 61, de 08 de julho de 2020. Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-61-de-8-de-julho-de-2020-266802148>. Acesso em: 10 de março de 2022.

BRASIL. Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021. Define a relação de minerais estratégicos para o País, de acordo com os critérios de que trata o art. 2º do Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 159, n. 115, p. 103-104, 22 de junho de 2021.

BUTA, M.; BLAGA, G.; PAULETTE, L.; PĂCURAR, I.; ROȘCA, S.; BORSAL, O.; GRECU, F.; SÎNZIANA, E.P.; NEGRUȘIER, C. Soil reclamation of abandoned mine lands by revegetation in northwestern part of Transylvania: A 40-year retrospective study. **Sustainability**.11(12): 3393. 2019.

CALKINS, W. H. The chemical forms of sulfur in coal: a review. **Fuel**. 73(4): 475-484. 1995

CORDELL, D.; DRANGERT, J.; WHITE, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. **Global Environmental Change**. 19(2): 292–305. 2009.

CZYCZA, R. V.; FONTANIVA, S.; LANA, M. C.; FRANDOLOSO, J. F.; VALE, F. Eficiência agrônômica de diferentes fertilizantes contendo enxofre para a cultura do milho. In: FERTIBIO – Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 28., 2008, Londrina. **Resumos...** Londrina: IAPAR, 2008. p. 36-40. 2008.

DAMINATO, B.; BENITIZ, L. **Caracterização das movimentações de fertilizantes no Brasil**. 2015. 28 p.

DAWSON, C.J.; HILTON, J. Fertilizer availability in a resource-limited world: production and recycling of nitrogen and phosphorus. **Food Policy**. 36:14–22. 2011.

DICK, D. P.; MANGRICH, A. S.; MENEZES, S. M. C.; PEREIRA, B. F. Chemical and spectroscopical characterization of humic acids from two South Brazilian coals of different ranks. **Journal of the Brazilian Chemical Society**. 13(2): 177–182. 2002.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circular Economy - Schools of Thought**. , 2022. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/>. Acesso em 12 de maio de 2022).

EPELDE, L.; LANZÉN, A.; MARTÍN, I.; VIRGEL, S.; MIJANGOS, I.; BESGA, G.; GARBISU, C. The microbiota of technosols resembles that of a nearby forest soil three years after their establishment. **Chemosphere**. 220: 600-610. 2019.

FALLAVENA, V. L. V.; De ABREU, C. S.; INÁCIO, T. D. PIRES, M.; AZEVEDO, C. Caracterização detalhada de material de referência certificado de carvão brasileiro. **Química Nova**. 36(6): 859-864. 2013.

FAN, G.; ZHANG, D.; WANG, X. Reduction and utilization of coal mine waste rock in China: A case study in Tiefsa coalfield. **Resources, Conservation and Recycling**, 83, 24–33. 2014.

FAO. Food and Agriculture Organization of United Nations. **Worlds fertilizer trends and outlook to 2018**. Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome. 2015.

FIRPO, B. A.; AMARAL FILHO, J. R.; SCHNEIDER, I. A. H., A brief procedure to fabricate soils from coal mine wastes based on mineral processing, agricultural, and environmental concepts. **Minerals Engineering**. 76, 81-86. 2015.

FLORES, C. G.; SCHNEIDER, H.; MARCILIO, N. R.; FERRET, L.; OLIVEIRA, J. C. P. Potassic zeolites from Brazilian coal ash for use as a fertilizer in agriculture. **Waste Management**, 70, 263–271. 2017.

FONSECA, D. S.; BACIC, I. R. Enxofre. In: RODRIGUES, A. F. da S. **Economia Mineral do Brasil**. 2. ed. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, 2009.

JIE, C.; JING-ZHANG, C.; MAN-ZHI, T.; ZI-TONG, G. Soil degradation: a global problem endangering sustainable development. **Journal of Geophysical Science**. 12(2): 243-252. 2002.

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; MEXIAS, A.; BALBINOT, M.; LEVANDOWSKI, J., WILLETT, J.; FINKELMAN, R.; BURGER, H. Depositional setting, petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 2. South Santa Catarina coalfield, Brazil. **International Journal of Coal Geology**. 84(3-4), 213-223. 2010.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Ceres, 1985.

KINNUNEN, P.H.M., KAKSONEN, A.H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. **Journal of Cleaner Production**. 228, 153-160. 2019.

KOMINKO, H.; GORAZDA, K.; WZOREK, Z. The Possibility of Organo-Mineral Fertilizer Production from Sewage Sludge. **Waste and Biomass Valorization**, 8(5): 1781–1791. 2017.

LEE, R. The outlook for population growth. **Science**. 333, 569–573. 2011.

MENDES, A. M. S. Curso de Manejo e Conservação do Solo e da Água, SFA-BA: Embrapa Semiárido; Embrapa Solos - UEP Recife, 2007.

MIKOS-SZYMAŃSKA, M.; SCHAB, S.; RUSEK, P.; BOROWIK, K.; BOGUSZ, P.; WYZIŃSKA, M. Preliminary study of a method for obtaining brown coal and biochar based granular compound fertilizer. **Waste and Biomass Valorization**.10(12): 3673-3685. 2019.

MILLER, B.G. The chemical and physical characteristics of coal, in: Miller, B.G. (Ed.), **Clean coal engineering technology**, second ed. New York: Butterworth-Heinemann, pp. 3-60.

MINAS GERAIS. Decreto n. 18.579, de 14 de dezembro de 2009. Altera a lei n. 14.066, de 22 de novembro de 2001, que dispõe sobre a proteção dos consumidores de combustíveis.

OLIVEIRA, I. M. F.; SILVA, M. J.; TÓFANI, S. B. Fundamentos de Química Analítica. Curso de Licenciatura em Química, Modalidade a Distância. UFMG, Belo Horizonte, 2010.

OLIVEIRA, M. L. S., WARD, C. R., SAMPAIO, C. H., QUEROL, X., CUTRUNEO, C. M. N. L., TAFFAREL, S. R., SILVA, L. F. O., 2013. Partitioning of mineralogical and inorganic geochemical components of coals from Santa Catarina, Brazil, by industrial beneficiation processes. **International Journal of Coal Geology**. 116-117: 75-92. 2013.

PINETOWN, K. L.; WARD, C. R.; WESTHUIZEN, W. V. van der. Quantitative evaluation of minerals in coal deposits in Witbank and Highveld Coalfields, and the potential impact on acid mine drainage. **International Journal of Coal Geology**. 70: 166-183. 2007.

PIETRZYKOWSKI, M. Tree species selection and reaction to mine soil reconstructed at reforested post-mine sites: Central and Eastern European experiences. *Ecological Engineering*. X, 3: 100012. 2019.

RAUPP-PEREIRA, F. Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentícias. 2006. 267 p. **Tese (Ciência e Engenharia de Materiais)** Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, UA, Portugal. 2006.

SANTOS, E. S.; ABREU, M.M.; MACÍAS, F. Rehabilitation of mining areas through integrated biotechnological approach: technosols derived from organic/inorganic wastes and autochthonous plant development. **Chemosphere**. 224, 765-775. 2019.

SAUVÉ, S.; BERNARD, S.; SLOAN, P. Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. **Environmental Development**.17: 48-56. 2016.

SHEORAN, V.; SHEORAN, A.S.; POONIA, P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: A review. **International Journal of Soil, Sediment and Water**. 3: 1-21. 2010.

SILVA, L. F. O.; IZQUIERDO, M.; QUEROL, X.; FINKELMAN, R. B.; OLIVEIRA, M. L. S.; WOLLENSCHLAGER, M.; TOWLER, M.; PÉREZ-LÓPEZ R.; MACIAS, F. Leaching of potential hazardous elements of coal cleaning rejects. **Environmental Monitoring and Assessment**. 175(1-4): 109–126. 2010.

THE SULPHUR INSTITUTE. **Sulphur – The fourth major plant nutrient**. 2022. Disponível em: <<https://www.sulphurinstitute.org/about-sulphur/sulphur-the-fourth-major-plant->

nutrient/>. Acesso em: 10 mar. 2022.

ULSENHEIMER, A. M.; SORDI, A.; CERICATO, A.; LAJÚS, C. formulação de fertilizantes organominerais e ensaio de produtividade. **Unoesc & Ciência**. 7(2): 195-202. 2016.

UTE ENGIE. Unidade Termelétrica Egie - Engie Brasil Energia S/A. **Relatório de Monitoramento ambiental: Complexo Termelétrico Jorge Lacerda**, 2017. 36 p.

VITTI, G. C.; OTTO, R.; SAVIETO, J. **Manejo do enxofre na agricultura. Informações agronômicas**. International Plant Nutrition Institute. 2015. 152 p.

WARD, C. R. Analysis and significance of mineral matter in coal seams. **International Journal of Coal Geology**. 50: 135-168. 2002.

WEILER, J. Benefícios ambientais da recuperação da pirita na mineração decarvão em SC. 2013. 106 p. **Dissertação** (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) Escola de Engenharia, UFRGS, 2013.

WEILER, J., FIRPO, B.A., SCHNEIDER, I.A.H., 2020. Technosol as an integrated management tool for turning urban and coal mining waste into a resource. **Minerals Engineering**. 147, 106179. 2020.

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**. 174, 739-745. 2018.

WEILER, J.; SCHNEIDER, I. A. H. Pyrite utilization in the carboniferous region of Santa Catarina, Brazil - Potentials, challenges, and environmental advantages. **REM - International Engineering Journal**. 72(3): 515–522. 2019

YAN, R.; GAUTHIER, D.; FLAMANT, G. (2001). Volatility and chemistry of trace elements in a coal combustor. **Fuel**. 80(15): 2217–2226. 2001.