



VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DO CARVÃO PARA PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES E DE SOLO SUPERFICIAL: UMA REVISÃO NA PERSPECTIVA DA ECONOMIA CIRCULAR

VALORIZACIÓN DE RESIDUOS DEL CARBÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE FERTILIZANTES E DE SUELOS SUPERFICIALES: UNA REVISIÓN DESDE LA PERSPECTIVA DE LA ECONOMÍA CIRCULAR

VALUATION OF COAL WASTE FOR TOP SOIL AND FERTILIZERS PRODUCTION: A REVIEW FROM THE PERSPECTIVE OF CIRCULAR ECONOMY

Maria Fernanda Ebs¹; Eduarda Fraga Olivo²; Lisandro Simão³; Jairo José Zocche⁴; Fabiano Raupp-Pereira^{3,5}

DOI: <https://doi.org/10.31692/IIICIAGRO.0161>

RESUMO

Esse estudo fundamenta-se na hipótese de que algumas das frações residuais do beneficiamento do carvão “run-of-mine” (ROM) da Bacia Carbonífera Catarinense (BCC) apresentam potenciais de utilização como matéria-prima funcional para a composição de novos produtos, alinhados a Economia Circular. Têm por objetivo avaliar o potencial de uso das frações residuais geradas nas diversas etapas do beneficiamento do carvão ROM, como matéria-prima para a produção de fertilizantes, de substratos para cultivo vegetal e para construção do horizonte superficial do solo. A amostragem foi concentrada na fração inorgânica do carvão ROM e seguimos a sistemática de Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicação (CPQvA), para avaliar sua viabilidade de uso. Os resíduos foram classificados (C) conforme sua periculosidade. O potencial de uso (P) teve por base a composição química, analisada por Espectroscopia de Fluorescência (FRX), pH, Perda ao Fogo (% PF), origem geológica, tipo de beneficiamento, granulometria e conteúdo total de elementos químicos. Dados relativos às quantidades/viabilidade (Qv) foram obtidos junto as empresas fornecedoras das amostras. Para aplicação (A), analisamos apenas nossa própria proposta. Os resultados evidenciam que a maior parte das amostras dos resíduos pertencem à Camada Barro Branco (n = 11), foram obtidas junto ao jig e com predomínio da granulometria grossa (n = 17), se mostraram ácidas na coleta - pH entre 2,9 e 5,4 (n = 15) e fortemente ácidas - pH entre 2,3 e 2,8 (n = 15) no estoque, evidenciando acidificação ao longo do tempo. Si e Al foram os elementos com os maiores percentuais nas amostras, os teores de S total variaram de 0,05 a 4,32% kg⁻¹, os conteúdos totais de Fe variaram de 2,01 a 32,65% kg⁻¹ e os de Ca variaram de 0,05 a 4,57% kg⁻¹. Os resultados obtidos sugerem potencialidade de uso dos resíduos como matéria-prima para a produção de fertilizantes, de substrato para produção de plantas e de horizonte superficial do solo. Contudo, como o estudo é exploratório, a continuidade das pesquisas trará novos resultados, permitindo a avaliação dos dados até então obtidos e testes de novas hipóteses.

¹ Curso de Ciências Biológicas, Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), mfernandaebbs@gmail.com

² Curso de Ciências Biológicas, Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), eduardaolivo@unesc.net

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

Palavras-Chave: Bacia Carbonífera Catarinense, Sistemática CPQvA, Carvão ROM.

RESUMEN

Este estudio se basa en la hipótesis de que algunas de las fracciones residuales del procesamiento de carbón run-of-mine (ROM) de la Cuenca Carbonífera Catarinense (CCC) tienen potencial para ser utilizadas como materia prima funcional para la composición de nuevos productos, en línea con la Economía Circular. Su objetivo es evaluar el potencial de uso de las fracciones residuales generadas en las diferentes etapas de procesamiento del carbón ROM, como materia prima para la producción de fertilizantes, sustratos para el cultivo de plantas y para la construcción del horizonte superficial del suelo. El muestreo se concentró en la fracción inorgánica del carbón ROM y seguimos el sistema de Clasificación, Potencialidad, Cantidad/Viabilidad y Aplicación (CPQvA) para evaluar su factibilidad de uso. Los residuos se clasificaron (C) según su peligrosidad. El uso potencial (P) se basó en la composición química, analizada por Espectroscopia de Fluorescencia (FRX), pH, pérdida al fuego (% PF), origen geológico, tipo de procesamiento, granulometría y contenido total de elementos químicos. Los datos sobre cantidades/viabilidad (Qv) se obtuvieron de las empresas proveedoras de las muestras. Para la aplicación (A), analizamos solamente nuestra propia propuesta. Los resultados muestran que la mayoría de las muestras de residuos pertenecen a la Capa Barro Branco ($n = 11$), se obtuvieron de la plantilla y con predominio de granulometría gruesa ($n = 17$), fueron ácidos en la colección - pH entre 2,9 y 5,4 ($n = 15$) y fuertemente ácido - pH entre 2,3 y 2,8 ($n = 15$) en el estoque, mostrando acidificación con el tiempo. El Si y el Al fueron los elementos con los porcentajes más altos en las muestras, los contenidos de S total oscilaron entre 0,05 y 4,32 % kg^{-1} , los contenidos de Fe total oscilaron entre 2,01 y 32,65 % kg^{-1} y los de Ca oscilaron entre 0,05 y 4,57 % kg^{-1} . Los resultados obtenidos sugieren potencial para el aprovechamiento de los residuos como materia prima para la producción de fertilizantes, para la composición de sustrato para la producción vegetal y en la construcción del horizonte superficial del suelo. Sin embargo, como el estudio es exploratorio, la continuidad de la investigación traerá nuevos resultados, permitiendo la evaluación de los datos obtenidos hasta el momento y la prueba de nuevas hipótesis.

Palabras Clave: Cuenca Carbonífera Catarinense, Sistemática CPQvA, Carbón run-of-mine.

ABSTRACT

This study is based on the hypothesis that some of the residual fractions from the processing of run-of-mine (ROM) coal from the Catarinense Carboniferous Basin (CCB) have potential for use as a functional raw material for the composition of new products, aligned with the Economics Circular. Aims to evaluate the potential for using the residual fractions generated in the different stages of processing of ROM coal, as raw material for the production of fertilizers, substrates for vegetable cultivation and for the construction of the surface horizon of the soil. Sampling was concentrated on the inorganic fraction of ROM coal and we followed the Classification, Potentiality, Quantity/Viability and Application (CPQvA) systematic to assess its feasibility of use. The residues were classified (C) according to their dangerousness. The potential use (P) was based on the chemical composition, analyzed by Fluorescence Spectroscopy (FRX), pH, Fire Loss (% PF), geological origin, type of processing, granulometry and total content of chemical elements. Data on quantities/viability (Qv) were obtained from the supplier companies of samples. For application (A), we analyze only our own proposal. The results show that most of the waste samples belong to the Barro Branco Layer ($n = 11$), were obtained from the jig and with a predominance of course granulometry ($n = 17$), were acidic in the collection - pH between 2.9 and 5.4 ($n = 15$) and strongly acidic - pH between 2.3 and 2.8 ($n = 15$) in the stock, showing acidification over time. Si and Al were the elements with the highest percentages in the samples, the total S contents ranged from 0.05 to 4.32% kg^{-1} , the total contents of Fe ranged from 2.01 to 32.65% kg^{-1} and those of Ca range from 0.05 to 4.57% kg^{-1} . The results obtained suggest potential for the use of residues as raw material for the production of fertilizers, in the composition of substrates for plant production and in the construction of surface horizon of the soil. However, as the study is exploratory, the continuity of the research will bring new results, allowing the evaluation of the data obtained so far and the testing of new hypotheses.

Keywords: Catarinense Coal Basin, CPQvA Systematics, Run-of-mine coal.

INTRODUÇÃO

A Bacia Carbonífera Catarinense (BCC) localiza-se na região sudeste de Santa Catarina, cujas deposições carbonosas pertencem à Formação Rio Bonito, camadas Barro Branco, Bonito e Irapuá (KALKREUTH *et al.*, 2010). Devido a espessura reduzida dessas camadas, alternância com folhelhos, siltitos e arenitos e, à presença de nódulos de sulfeto de ferro (FeS_2) (KALKREUTH *et al.*, 2006), para cada tonelada de ROM extraído são geradas aproximadamente 0,35 toneladas de carvão e 0,65 toneladas de resíduos ambientalmente relevantes (KALKREUTH *et al.*, 2010; AMARAL FILHO *et al.*, 2013), os quais tem sido conduzidos à depósitos tabulares controlados.

Em função do volume gerado, da degradação ambiental resultante, dos custos ambientais e econômicos para tratamento e disposição, diversos estudos relacionados ao aproveitamento dos resíduos da exploração do carvão têm sido realizados em nível mundial, visando: o uso como matéria prima para a produção de fertilizantes organominerais e condicionamento do solo (PATTI *et al.*, 1992; YAN; GAUTHIER; FLAMANT, 2001; DICK *et al.*, 2002; CHASSAPIS; ROULIA, 2008; MIKOS-SZYMAŃSKA *et al.*, 2019); a produção de substratos para produção vegetal e para construção do horizonte superficial do solo em áreas degradadas pela mineração do carvão (WEILER; FIRPO; SCHNEIDER, 2018) e; a construção de tecnosolos (e.g. FIRPO; AMARAL FILHO; SCHNEIDER, 2015; WEILER; FIRPO; SCHNEIDER, 2020; AMARAL FILHO *et al.*, 2020).

Com base na hipótese de que algumas das frações residuais do beneficiamento do carvão ROM da BCC apresentam potenciais para a utilização como matéria-prima funcional para a composição de novos produtos, esse estudo teve por objetivo avaliar o potencial de uso das frações residuais geradas nas diversas etapas do beneficiamento do carvão ROM, como matéria-prima para a produção de fertilizantes, de substratos para cultivo vegetal e para construção do horizonte superficial do solo.

Como resultados espera-se contribuir para o desenvolvimento de um estado de simbiose industrial, de desacoplamento do crescimento econômico do consumo de recursos e de emissões de poluentes, concebendo frações residuais como recursos e não como resíduos, onde, resíduos de uma atividade tornem-se insumos para outra, reduzindo assim o uso de matérias-primas virgens, prolongando sua vida útil e completando os ciclos econômicos e ecológicos, para transição para a Economia Circular.

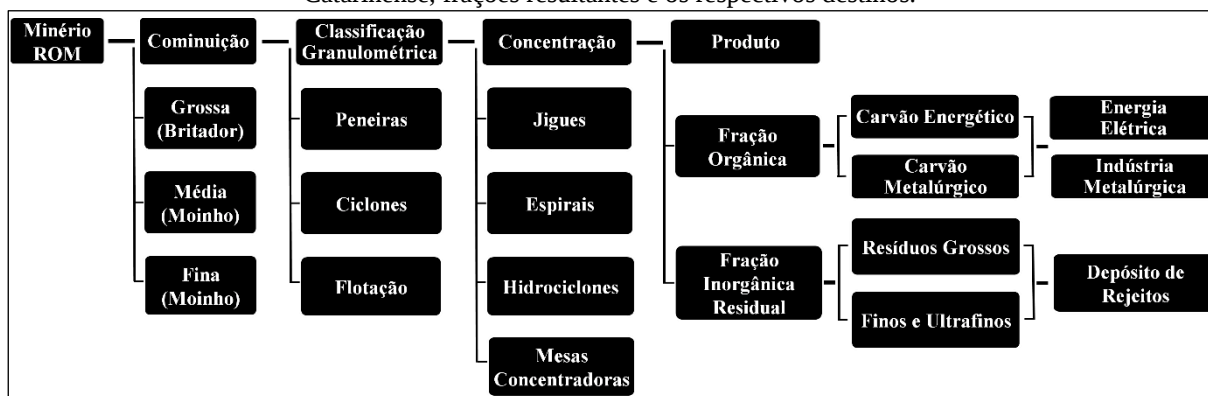
REFERENCIAL TEÓRICO

As jazidas de carvão mineral brasileiras totalizam 32 bilhões de toneladas e estão distribuídas na região sul do País, nos domínios geológicos da Bacia do Paraná, podendo contudo, ocorrer pequenas quantidades na região sudeste do estado de São Paulo (KALKREUTH *et al.*, 2010). Desse total, o estado do Rio Grande do Sul detém 89,25%, Santa Catarina 10,41%, Paraná 0,32% e São Paulo 0,02% (KALKREUTH *et al.*, 2006).

Em Santa Catarina, o carvão data do Permiano, está associado às litologias da Formação Rio Bonito, Camada Barro Branco, Camada Bonito e Camada Irapuá (KALKREUTH *et al.*, 2010), cuja mineração é predominantemente subterrânea e se concentra nas duas primeiras camadas (KALKREUTH *et al.*, 2010; WEILER; SCHNEIDER, 2019). Devido a espessura reduzida das camadas, alternância dessas com camadas de rochas sedimentares (e.g. folhelhos, siltitos e arenitos) e presença de nódulos de sulfeto de ferro (FeS_2) - pirita (KALKREUTH *et al.*, 2006), o minério de carvão ROM (“Run-of-Mine”) passa por processos físicos de beneficiamento para atender aos padrões de consumo exigidos (WEILER; SCHNEIDER, 2019).

Atualmente seis empresas mineradoras operam na BCC e fornecem o carvão (fração energética) para a geração de energia no Complexo Termoelétrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo, sul de Santa Catarina, que admite até 43% de cinzas e 2,3% de enxofre (AMARAL FILHO *et al.*, 2013; WEILER; SCHNEIDER, 2019). O beneficiamento do carvão ROM na BCC ocorre em etapas (Figura 01) a fim de reduzir o percentual de matéria inerte e o teor de impurezas, proporcionando melhor padrão de qualidade para utilização, sem, contudo, modificar as características físicas e químicas dos minerais (GRZECA, 2018).

Figura 01: Etapas e equipamentos utilizados no beneficiamento do carvão ROM na Bacia Carbonífera Catarinense, frações resultantes e os respectivos destinos.



Fonte: Própria (2022).

Inicia-se com a redução do tamanho das partículas (cominuição) que percorre três estágios: cominuição grossa (realizada em britadores), intermediária e fina (realizadas em moinhos), seguido pela classificação granulométrica, que pode ser obtida por meio de peneiras, ciclones ou, flotação e; pela concentração, que separa as frações de acordo com a densidade (WEILER; SCHNEIDER, 2019). A densidade das diversas frações resultantes varia de acordo com a concentração relativa de constituintes orgânicos e inorgânicos no carvão ROM (TAVARES; SAMPAIO, 2005) e no beneficiamento são utilizados equipamentos como jiges, espirais, hidrociclones e mesas concentradoras (WEILER, 2016).

Como resultado da qualidade do carvão ROM catarinense e da tecnologia de queima adotada, cada tonelada de ROM extraído gera aproximadamente 0,35 toneladas de carvão e 0,65 toneladas de resíduos, os quais, contêm em torno de 12% de pirita, 6% enxofre (AMARAL FILHO *et al.*, 2013) e diversos metais pesados ambientalmente relevantes (KALKREUTH *et al.*, 2010), que muitas vezes ultrapassam os valores máximos admitidos pela Legislação Brasileira (COSTA; ZOCHE, 2009). A pirita é a principal responsável pela geração da Drenagem Ácida de Minas (DAM), que representa um dos maiores impactos relacionado à mineração (WEILER; SCHNEIDER, 2019).

Embora no beneficiamento do carvão ROM sejam geradas diversas frações residuais e em diferentes etapas do processo, os resíduos tem sido conjuntamente conduzidos a depósitos tabulares controlados (módulos de rejeitos), o que dificulta o seu aproveitamento como matéria-prima. Estes depósitos estão localizados próximo às áreas de beneficiamento (SILVA; WOLFE, 2021), são cobertos por camadas de solo superficial e recebem a semeadura de gramíneas exóticas de rápido crescimento (AMARAL FILHO *et al.*, 2013), prática antiecológica e antieconômica, uma vez que para recuperar uma área, outra será degradada (WEILER; FIRPO; SCHNEIDER, 2020). Além disso, não oferece solução em longo prazo, pois, aumenta os impactos ambientais com o comissionamento de áreas para o estabelecimento dos depósitos e de material para o recobrimento dos resíduos, provoca distúrbios visuais na paisagem, produz e promove a circulação da DAM e impacta o solo, a água e a biota (COSTA; ZOCHE, 2009).

Estima-se que cerca de 320 milhões de toneladas de resíduos de carvão ROM já tenham sido produzidos em Santa Catarina (WEILER; SCHNEIDER, 2019). Em função do volume gerado, da degradação ambiental resultante, dos custos ambientais e econômicos para tratamento e disposição, diversos estudos relacionados ao aproveitamento dos resíduos da exploração do carvão têm sido realizados em nível mundial visando: o uso como matéria prima

para a produção de fertilizantes organominerais e condicionamento do solo (PATTI *et al.*, 1992; YAN; GAUTHIER; FLAMANT, 2001; DICK *et al.*, 2002; CHASSAPIS; ROULIA, 2008; MIKOS-SZYMAŃSKA *et al.*, 2019); o uso para rochagem (“rock for crops”), a produção de enxofre e de ácido sulfúrico (a partir da concentração da pirita) para produzir fertilizantes, sulfato férrico e sulfato ferroso (AMARAL FILHO *et al.*, 2013; WEILER; SCHNEIDER, 2019); a produção de substratos para produção vegetal e para construção do horizonte superficial do solo em áreas degradadas pela mineração do carvão (WEILER; FIRPO; SCHNEIDER, 2018) e; a construção de tecnosolos (e.g. FIRPO; AMARAL FILHO; SCHNEIDER, 2015; WEILER; FIRPO; SCHNEIDER, 2020; AMARAL FILHO *et al.*, 2020). Além desses enfoques, revisões sobre o aproveitamento de cinzas oriundas da queima do carvão (e.g. BASU *et al.*, 2009; YUNUSA *et al.*, 2012; PAUL; ACHARYA; PRADHAN, 2019) para a produção de fertilizantes organominerais e ou, para o condicionamento do solo, também têm sido conduzidos. Tais estudos comungam objetivos comuns, alinhados aos princípios da Economia Circular.

A Economia Circular, à exemplo do que ocorre com os ciclos biológicos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015; SAUVÉ; BERNARD; SLOAN, 2015), surge como um modelo que objetiva fechar o ciclo de vida dos produtos para atingir um estado de simbiose industrial (CHERTOW, 2000), onde os resíduos de uma atividade tornam-se insumos para outra (ELIA; GNONI, TORNESE, 2017; MATHEWS; TAN, 2018). Visa reduzir o uso de matérias-primas virgens e a produção de resíduos, melhorar a circularidade das matérias-primas e prolongar sua vida útil, completando os ciclos econômicos e ecológicos (ELIA; GNONI, TORNESE, 2017). Introduz uma nova perspectiva para o ecossistema industrial de desacoplamento do crescimento econômico do consumo de recursos e emissões de poluentes, uma vez que os materiais e produtos em fim de vida são concebidos como recursos e não como resíduos (SAUVE *et al.*, 2015).

A exploração do carvão, não só na BCC mas também em nível mundial, tem seguido os princípios da Economia Linear, o que foi importante para alavancar a economia, porém, resultou em diversos impactos ambientais relevantes. A busca pelo alinhamento da exploração do carvão com a Economia Circular é algo mundialmente desejável (PIETRZYKOWSKI, 2019) e nesse sentido, a utilização de algumas das frações residuais geradas nas diversas etapas do beneficiamento do carvão ROM, para a produção de substratos para o cultivo de plantas, produção de horizonte superficial do solo e, composição de fertilizantes minerais e

organominerais surge como alternativa promissora.

Os fertilizantes organominerais são produzidos por meio de blendagens e reações químicas de matérias-primas inorgânicas, com teores conhecidos de macro e micronutrientes, com resíduos orgânicos (ANTILLE; SAKRABANI; GODWIN, 2013). Têm a capacidade de melhorar as propriedades físicas e químicas do solo e de promover aumento da produtividade das culturas (KOMINKO; GORAZDA; WZOREK, 2017). De modo geral há carência de informações sobre o potencial dos resíduos do beneficiamento do carvão ROM para produção de fertilizantes, embora estudos sobre o aproveitamento das cinzas do carvão como corretivo do solo e para produção de fertilizantes químicos tenham sido realizados (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 o uso de resíduos do beneficiamento do carvão na agricultura ou para a composição de fertilizantes.

Esse estudo fundamenta-se na hipótese de que algumas das frações residuais do beneficiamento do carvão ROM da BCC apresentam potenciais para utilização como matéria-prima funcional na indústria de fertilizantes, na produção de substratos para produção vegetal e, na construção do horizonte superficial do solo de áreas degradadas pela mineração do carvão. Portanto, objetiva-se avaliar o potencial de uso das frações residuais geradas nas diversas etapas do beneficiamento do carvão ROM, em uma perspectiva de valorização de resíduos alinhada à Economia Circular.

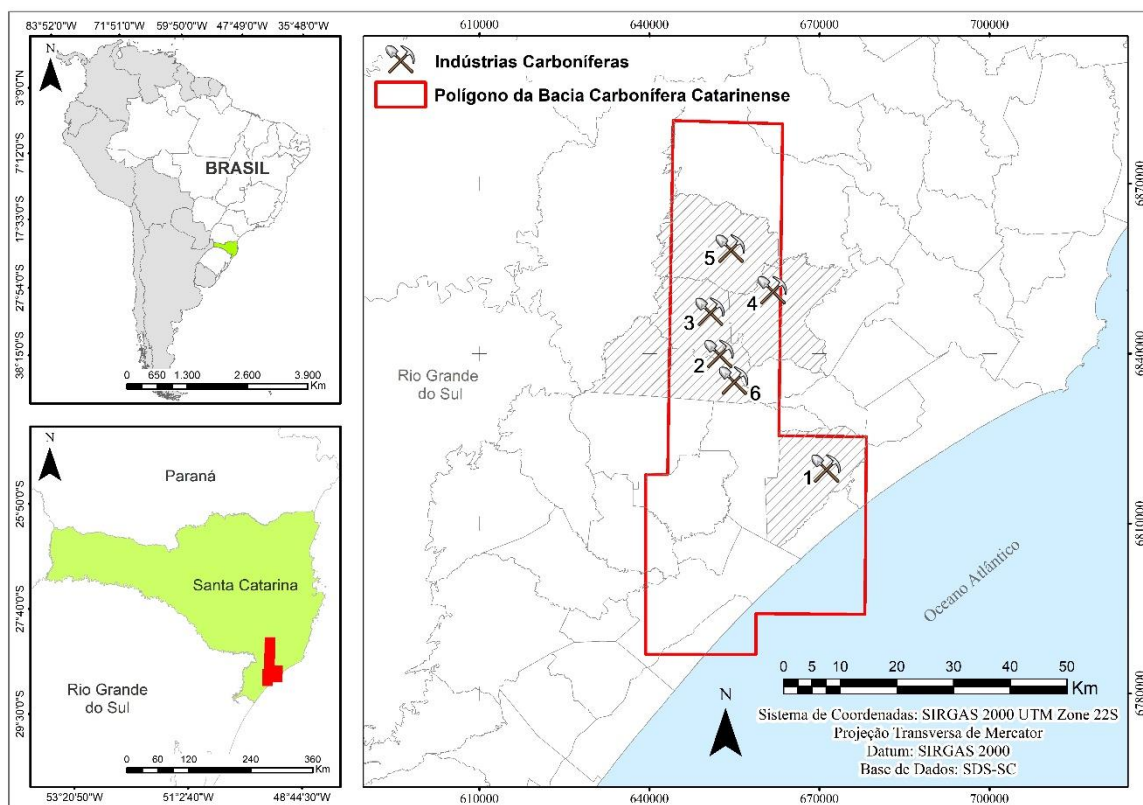
METODOLOGIA

Esse estudo caracteriza-se como de análise e de revisão bibliográfica e trata da avaliação do uso potencial de frações residuais, obtidas em diferentes etapas do beneficiamento do carvão ROM, como matéria-prima para a produção de material de interesse tecnológico (produtos candidatos – fertilizantes, substrato para a produção vegetal e para a construção do horizonte superficial do solo de áreas degradadas pela mineração do carvão), em uma perspectiva de valorização de resíduos alinhada à Economia Circular. É parte integrante do Projeto Circul@r Coal: valorização de resíduos de carvão como estratégia catarinense de transição para a Economia Circular, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa VALORA da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma, SC.

O estudo envolveu seis mineradoras que operam na Bacia Carbonífera Catarinense

(Figura 02) e fornecem carvão (fração energética) para o Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, o qual está localizado no município de Capivari de Baixo, sul de Santa Catarina.

Figura 02: Localização da Bacia Carbonífera Catarinense e das seis mineradoras, fornecedoras de amostras coletadas em diferentes etapas do beneficiamento de carvão ROM, no sul de Santa Catarina, Brasil.



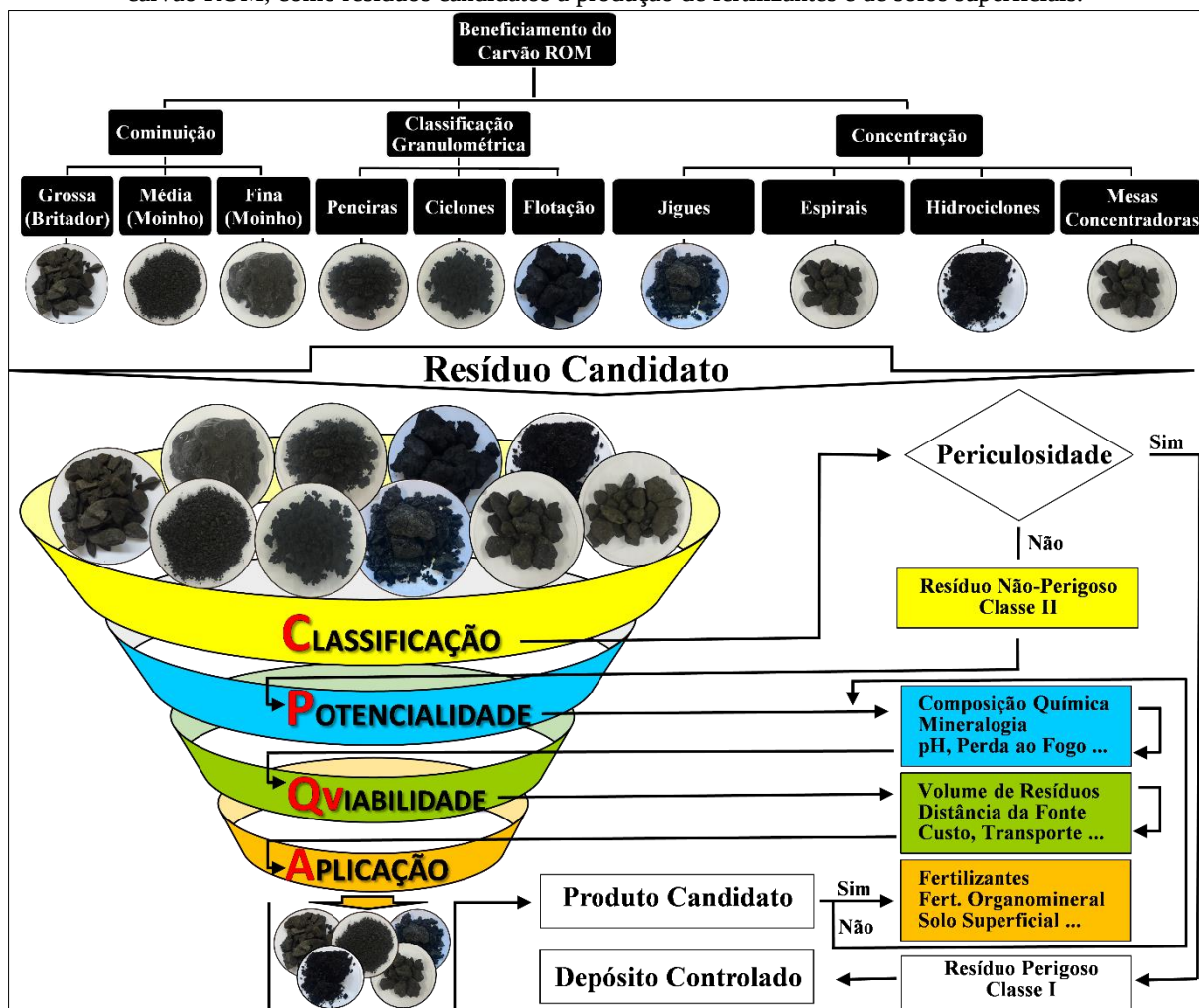
Fonte: Própria (2022).

Seguimos a sistemática de Classificação, Potencialidade, Quantidade/viabilidade e Aplicação (CPQvA) (Figura 03) apresentada por Raupp-Pereira (2006), para avaliar a potencialidade das frações residuais do carvão ROM para a produção de fertilizantes, de substrato para produção vegetal e para construção do horizonte superficial de áreas degradadas pela mineração do carvão. As frações residuais foram coletadas em diferentes etapas do beneficiamento do carvão ROM de acordo com a NBR 10007/2004 (ABNT, 2004a) e resultaram em 24 amostras identificadas por sequência alfanumérica A1 a F6.

As amostras foram classificadas (C) conforme sua periculosidade (ABNT, 2004b) e a avaliação do potencial de uso (P) teve por base as características de origem geológica (camadas deposicionais), tipo de beneficiamento, granulometria, pH, composição química, analisadas por Espectroscopia de Fluorescência (FRX) e Perda ao Fogo (% PF). Os dados relativos às

quantidades/viabilidade (Qv) foram obtidos junto às empresas fornecedoras e, a aplicação (A) foi analisada com base no potencial para a produção de fertilizantes, de substrato para produção vegetal e para construção do horizonte superficial de áreas degradadas pela mineração do carvão.

Figura 03: Sistemática CPQvA utilizada para análise do potencial das frações residuais do beneficiamento do carvão ROM, como resíduos candidatos à produção de fertilizantes e de solos superficiais.



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 (ASTM D7348, 2007). O conteúdo percentual dos elementos químicos de interesse foram calculados com base na relação Molar dos compostos químicos das frações residuais do beneficiamento do carvão

ROM.

A seleção das características químicas específicas das frações residuais do beneficiamento do carvão ROM para a produção de fertilizantes, de substrato para produção vegetal e para construção do horizonte superficial de áreas degradadas pela mineração do carvão se deu com base na literatura específica, relacionada aos respectivos temas desenvolvidos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características referentes as camadas geológicas de origem, granulometria, tipo de beneficiamento, composição química, pH e Perda ao Fogo das frações residuais do beneficiamento do carvão ROM, coletadas em diferentes etapas do beneficiamento do carvão ROM na Bacia Carbonífera Catarinense são apresentadas na Tabela 01.

Onze amostras tiveram origem geológica relacionada à Camada Barro Branco, sete à Camada Bonito e para seis, a origem é desconhecida, uma vez que foram obtidas de empresa que está relavando rejeitos de antigo depósito de rejeitos. O maior número de amostras das frações residuais ($n = 12$) foi obtido junto ao jigge, seguido do meio denso e da mesa de ar ($n = 3$, cada), do ciclone e da bacia de decantação ($n = 2$, cada) e, da flotação e do britador ($n = 1$, cada). Predominou a granulometria grossa dos resíduos ($n = 17$), seguida pela granulometria fina ($n = 5$) e média ($n = 2$).

O pH das frações residuais variou de 2,6 (amostra F1 - originada da Camada Barro Branco, com granulometria grossa e coletada na etapa de concentração junto a mesa de ar) a 8,5 (amostra F6 - originada da Camada Barro Branco, com granulometria fina e coletada na bacia de decantação). De modo geral predominaram frações residuais ácidas - pH de coleta entre 2,9 e 5,4 ($n = 15$), seguidas de frações residuais neutras a levemente alcalinas - pH entre 6,0 e 8,5 ($n = 7$) e de frações residuais fortemente ácidas - pH entre 2,6 e 2,8 ($n = 2$). De outra forma, o pH de estoque (avaliado um ano após a coleta) baixou em todas as amostras, predominando frações residuais fortemente ácidas - pH entre 2,3 e 2,8 ($n = 15$), seguidas de frações residuais ácidas - pH entre 2,9 e 3,3 ($n = 5$) e de frações residuais neutras - pH entre 7,0 e 7,2 ($n = 4$).

Tabela 01: Camadas geológicas de origem (CG), tipo de beneficiamento (TB), granulometria (G), pH, composição química e perda ao fogo (PF) das frações residuais do carvão ROM (A1 – F6), coletadas em diferentes etapas do beneficiamento em seis mineradoras na Bacia Carbonífera Catarinense. Identificação das amostras (ID). Camadas Geológicas de Origem (CG): BB = Barro Branco; B = Bonito; NI = Não Identificada; B(R) = Rejeitos da Camada Bonito. Tipo de Beneficiamento (TB): MD = Meio Denso; C = Ciclone; F = Flotação; J = Jigue; BD = Bacia de Decantação; M = Mesa de Ar; B = Britador; C = Ciclone. Granulometria (G): G = Grossa; M = Média; F = Fina. pH: C = Coleta; E = Estoque. - = Não detectado.

Origem das Amostras			Composição Química (%)														PF %
ID	CG	TB	G	pH		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	
				C	E												
A1	BB	MD	G	7,7	3,1	49,6	20,8	0,6	6,7	1,5	2,8	1,6	-	-	-	0,1	16,0
A2	BB	C	F	7,9	7,0	36,7	16,1	1,9	11,3	7,6	2,3	1,3	-	-	-	-	22,4
A3	BB	F	F	7,5	7,0	48,7	22,2	0,5	4,2	1,4	3,0	1,4	-	-	-	-	18,3
B1	B	MD	G	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	B	J	G	4,8	2,9	37,9	13,4	3,7	18,7	2,1	3,1	0,7	0,5	0,1	-	-	19,7
B3	B	J	G	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	B	J	G	5,4	3,0	47,6	16,8	1,7	10,1	1,2	4,5	1,0	0,5	-	-	-	16,5
C1	B	MD	G	6,1	2,6	47,2	18,0	0,5	11,7	1,0	4,4	1,1	0,6	-	-	-	15,2
C2	B	J	M	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	BB	J	G	4,2	2,7	44,6	20,5	0,1	12,7	0,3	2,7	1,4	-	-	-	0,1	17,3
C4	BB	J	G	3,1	2,7	47,0	23,8	0,1	6,0	0,4	3,2	1,6	-	-	-	-	17,7
D1	NI	J	G	2,9	2,4	42,4	16,9	4,3	8,7	2,1	2,7	1,4	-	-	-	0,1	21,1
D2	NI	J	G	3,2	2,6	40,5	18,1	4,3	9,9	2,6	2,6	1,3	-	-	-	0,1	20,4
D3	NI	J	G	3,6	2,5	35,5	15,7	2,2	16,8	1,2	2,0	1,0	-	-	-	0,1	25,2
D4	NI	J	G	3,2	2,5	45,3	16,9	3,0	5,4	1,7	2,5	1,2	-	-	-	0,1	23,7
D5	NI	J	G	3,2	2,6	40,3	14,9	4,8	8,0	2,3	2,7	1,3	-	-	-	0,1	25,5
D6	NI	BD	F	2,8	2,7	43,2	17,2	0,8	8,5	0,7	3,1	1,3	-	-	-	-	24,9
E1	B(R)	J	G	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	BB	M	G	2,6	2,4	29,2	14,5	0,1	18,3	0,1	1,3	0,7	-	-	-	-	35,6
F2	BB	M	G	3,6	2,5	40,4	18,0	0,1	12,5	-	1,8	1,0	-	-	-	-	26,0
F3	BB	M	G	3,2	2,3	8,2	3,4	0,1	46,7	0,1	0,3	-	-	-	-	-	41,0
F4	BB	B	M	3,5	2,7	49,8	22,8	0,1	2,9	-	2,5	1,6	-	-	-	0,1	20,1
F5	BB	C	F	3,4	2,5	40,6	17,4	0,3	10,1	0,2	1,7	1,0	-	-	-	-	28,5
F6	BB	BD	F	8,5	7,1	47,9	22,0	1,2	3,2	1,0	2,2	1,4	0,7	-	-	0,1	20,0

Fonte: Própria (2022).

A Tabela 02 traz o conteúdo total dos elementos químicos presentes nas frações residuais amostradas. O Si e Al são os elementos que se apresentam com os maiores percentuais nas amostras, no entanto, os macronutrientes S, Ca, K, P e Mg e os micronutrientes Fe, Ti, Mn e Zr são os elementos de maior interesse na produção de fertilizantes. Os teores de enxofre total variaram de 0,05 a 4,32% kg⁻¹, com maior frequência entre 0,05 e 1,0% kg⁻¹ (n = 17), seguidos de valores entre 1,22 e 2,0% kg⁻¹ (n = 5) e de 4,0 e 4,3% kg⁻¹ (n = 2). Grande parte do enxofre

presente nas frações residuais amostradas se encontra na forma de sulfato (SO_4) e essa é a forma de enxofre que está prontamente disponível para absorção pelas plantas (REETZ JR, 2017; THE SULPHUR INSTITUTE, 2022).

Tabela 02: Conteúdo total dos elementos químicos de interesse na produção de fertilizantes, de substrato para produção vegetal e para construção do horizonte superficial de áreas degradadas pela mineração do carvão, das respectivas frações residuais do beneficiamento do carvão ROM da Bacia Carbonífera Catarinense.

ID	Conteúdo Total (% kg^{-1})										
	Si	Al	S	Fe	Ca	K	Ti	Mg	Mn	P	Zr
A1	23,20	11,02	0,24	4,68	1,09	2,35	0,96	-	0,01	-	0,04
A2	17,17	8,53	0,76	7,89	5,47	1,92	0,81	-	0,03	-	0,03
A3	22,75	11,73	0,22	2,92	1,02	2,53	0,86	-	0,01	-	0,04
B1	17,00	6,74	4,32	5,87	4,57	3,23	0,64	0,28	0,12	0,05	0,03
B2	17,71	7,10	1,49	13,09	1,51	2,54	0,42	0,30	0,04	-	0,03
B3	17,52	7,34	4,09	8,82	3,83	2,99	0,48	-	0,12	0,05	0,03
B4	22,24	8,91	0,68	7,04	0,83	3,77	0,57	0,32	0,03	-	0,03
C1	22,05	9,53	0,19	8,20	0,69	3,69	0,65	0,39	0,02	-	0,03
C2	17,46	7,29	0,37	12,60	1,51	2,74	0,47	-	0,06	-	0,05
C3	20,86	10,88	0,05	8,93	0,25	2,21	0,83	-	0,02	-	0,04
C4	21,97	12,59	0,06	4,17	0,31	2,64	0,94	-	0,01	-	0,03
D1	19,84	8,96	1,74	6,12	1,53	2,21	0,84	-	0,01	-	0,04
D2	18,93	9,60	1,72	6,89	1,87	2,16	0,80	-	0,01	-	0,05
D3	16,61	8,33	0,88	11,79	0,83	1,69	0,59	-	0,01	-	0,07
D4	21,16	8,96	1,22	3,75	1,26	2,05	0,74	-	0,01	-	0,05
D5	18,83	7,90	1,93	5,59	1,63	2,23	0,79	-	0,01	-	0,05
D6	20,19	9,12	0,31	5,98	0,47	2,60	0,79	-	0,01	-	0,04
E1	18,39	8,08	1,00	7,47	3,60	2,88	0,59	0,30	0,07	-	-
F1	13,67	7,66	0,06	12,81	0,05	1,07	0,42	-	0,01	-	0,04
F2	18,88	9,51	0,05	8,77	-	1,48	0,63	-	0,01	-	0,04
F3	3,83	1,79	0,06	32,65	0,05	0,28	-	-	-	-	0,01
F4	23,27	12,08	0,06	2,01	-	2,05	0,94	-	0,01	-	0,06
F5	18,98	9,20	0,11	7,07	0,17	1,45	0,58	-	0,01	-	0,04
F6	22,38	11,66	0,48	2,24	0,69	1,87	0,82	0,43	0,01	-	0,04

Fonte: Própria (2022).

Os conteúdos totais de Fe e Ca, que são dois nutrientes de maior interesse, tanto na formulação de fertilizantes quanto nos estoques no solo, variaram de 2,01 a 32,65% kg^{-1} para o Fe e de 0,05 a 5,47% kg^{-1} para o Ca. O conteúdo do K, por sua vez, variou de 0,28 a 3,77% kg^{-1} , enquanto que, os dos demais micronutrientes estiveram presentes em valores inferiores a 1,0% kg^{-1} para Ti e em valores muito baixos para Mn e Zr, ou muito baixos a ausentes para Mg

e P.

Geralmente, o Fe e Ca estão presentes em frações residuais dos carvões gregos do tipo linhito em concentrações mais altas em comparação com os outros elementos metálicos e não metálicos (CHASSAPIS; ROULIA, 2008), o que também ocorre nas frações residuais do carvão ROM da BCC (Tabela 02). Portanto, o teor de Fe e Ca pode ser adotado como critério importante na avaliação das frações residuais do beneficiamento do carvão ROM para a produção de fertilizantes organominerais (CHEN *et al.*, 2004; JEONG *et al.*, 2007), o que parece ser uma das aplicações mais promissoras (CHASSAPIS; ROULIA, 2008).

O Quadro 01 apresenta os 14 minerais essenciais, a forma pela qual eles são absorvidos pelas plantas e sua principal forma de reserva nos solos.

Quadro 01: Nutrientes minerais essenciais para as plantas, formas primárias de absorção e principais formas de reservas no solo.

Categoria	Nutrientes	Forma	
		Primária de absorção	Principal de reserva no solo
Macronutrientes	Nitrogênio (N)	Nitrato (NO_3^-), Amônio (NH_4^+)	Matéria orgânica
	Fósforo (P)	Fosfato (HPO_4^{2-}), (H_2PO_4^-)	Matéria orgânica, Minerais
	Potássio (K)	Íon potássio (K^+)	Minerais
	Cálcio (Ca)	Íon cálcio (Ca^{2+})	Minerais
	Magnésio (Mg)	Íon magnésio (Mg^{2+})	Minerais
	Enxofre (S)	Sulfato (SO_4^{2-})	Matéria orgânica, Minerais
Micronutrientes	Cloro (Cl)	Cloreto (Cl^-)	Minerais, Chuvas
	Ferro (Fe)	Ferro ferroso (Fe^{2+})	Minerais
	Boro (B)	Ácido bórico (H_3BO_3)	Matéria orgânica
	Manganês (Mn)	Íon manganês (Mn^{2+})	Minerais
	Zinco (Zn)	Íon zinco (Zn^{2+})	Minerais
	Cobre (Cu)	Íon cúprico (Cu^{2+})	Matéria orgânica, Minerais
	Molibdênio (Mo)	Molibdato (MoO_4^{2-})	Matéria orgânica, Minerais
	Níquel (Ni)	Íon níquel (Ni^{2+})	Minerais

Fonte: Adaptado de Reetz Jr. (2017).

Os dados relativos às quantidades/viabilidade (Qv) foram obtidos junto às empresas fornecedoras, para apenas quatro amostras de frações residuais e variam de 1,5 tonelada mês^{-1} (fração residual A3) a 6 toneladas mês^{-1} (fração residual F6). No entanto, avaliações mais aprofundadas sobre a quantidade produzida em toneladas mês^{-1} de cada fração residual devem

ser realizadas para nortear estudos futuros.

Um fato muito importante a ser considerado é que, embora o beneficiamento do carvão ROM se dê em etapas distintas, no presente momento, as empresas mineradoras conduzem as frações residuais de cada etapa para o mesmo destino, ou seja, o destino final é o depósito controlado. Em se tratando de aproveitamento de resíduos como matéria-prima para geração de novos produtos, na direção da Economia Circular, no caso do presente estudo, para a indústria de fertilizantes, para a produção de substratos para cultivo de vegetais ou para a construção do horizonte superficial do solo em áreas degradadas pela mineração do carvão, a separação das frações é imprescindível uma vez que cada fração se origina em diferentes etapas e é submetida a diferentes técnicas de beneficiamento. Tanto as técnicas, quanto os equipamentos adotados em cada etapa do beneficiamento do carvão ROM resultam em diferentes características, tanto físicas (p. e. densidade e granulometria) quanto químicas (pH, teores de elementos químicos, teor de pirita, etc.) que são essencialmente relevantes no momento de definir as potencialidades de cada fração, ou seja, cada fração residual é diferente de outra e cada qual tem a função a que se presta de acordo com suas características. Uma vez depositadas todas juntas, fica mais difícil, se não impraticável de avaliar suas potencialidades ou, mesmo, de aproveitá-las como matérias-primas.

Frequentemente as frações residuais do beneficiamento do carvão são tratadas como materiais sem potencialidade para uso, contudo, a reutilização como matéria-prima para novos produtos causaria um impacto positivo para o ambiente e para sociedade, representando uma redução drástica destes e ainda promovendo a transição para a Economia Circular, cuja finalidade é o uso eficiente de recursos materiais e energéticos, o reaproveitamento cíclico destes, considerando as limitações do planeta. Como tal, é a ciência mais qualificada a apresentar um novo panorama acerca da gestão de resíduos e recursos (BLOMSMA; BRENNAN, 2017). No entanto, estudos recentes sugerem que seus princípios ainda não são bem compreendidos, tanto pela comunidade científica quanto pela sociedade, ficando patente em muitas iniciativas que o principal intuito da Economia Circular ainda é considerado a prosperidade econômica, seguido pela qualidade ambiental (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017).

Com a crescente preocupação ambiental, a busca pela resolução dos problemas relativos a exploração de matérias-primas virgens, a geração de resíduos e à degradação ambiental só vem aumentando, o que torna os estudos voltados à circularidade dos materiais uma proposta

promissora. O Quadro 02 apresenta a síntese dos estudos desenvolvidos sobre a utilização de frações residuais do beneficiamento do carvão, das cinzas oriundas da queima do carvão, para a produção de fertilizantes, de substratos para produção vegetal, no melhoramento e na construção do horizonte superficial do solo e para a recuperação de áreas degradadas pela mineração do carvão.

Estima-se que somente no ano de 2013 foram utilizadas em torno de 180,6 milhões de toneladas de fertilizantes para produção de alimentos em todo o mundo; desse total, 70,2% foram usados em países desenvolvidos e 29,8% em países em desenvolvimento (REETZ JR., 2017). No Brasil, país conhecido mundialmente por sua produção agrícola, há uma demanda crescente por fertilizantes, implicando em grande consumo de ácido sulfúrico, entretanto, dados publicados no Sumário Mineral 2014 (DNPM-BRASIL, 2015) indicam que o país importa cerca de 80% do enxofre que consome (WEILER; SCHNEIDER, 2019). A utilização de frações residuais do beneficiamento do carvão para a concentração do enxofre, a exemplo do que já ocorreu na BCC poderia suprir essa demanda nacional.

As previsões indicam que a população global atingirá 9,3 bilhões em 2050, o que implica no crescimento da demanda por alimentos, em relação a atualidade, na ordem de 60% (LEE, 2011). Os fertilizantes minerais desempenham um papel crucial neste cenário, pois ao mesmo tempo que a população cresce, as terras produtivas diminuem em função da expansão urbana e; sem fertilizantes, o mundo poderia produzir somente cerca da metade dos alimentos básicos e mais áreas sob florestas teriam que ser convertidas em áreas para culturas (REETZ JR., 2017). A maior parte dos fertilizantes é produzido a partir de matérias-primas de ocorrência natural, contendo minerais, exploradas ou extraídas em várias localidades. A exceção é caso do nitrogênio que é produzido por meio da combinação do N_2 do ar com gás natural, carvão, ou nafta para formar amônia anidra, que pode ser usada diretamente como fertilizante ou convertida para outra forma de fertilizante nitrogenado (REETZ JR., 2017). A transição de uma Economia Linear para uma Economia Circular requer a recuperação dos fluxos de resíduos como matérias-primas e, nesse sentido, a substituição de fertilizantes minerais por fertilizantes organominerais é uma direção importante na recuperação de materiais, energia e da substituição de matérias-primas minerais virgens por resíduos agroindustriais e da mineração, para a produção de fertilizantes organominerais.

Quadro 02: Estudos sobre a utilização do carvão de baixa qualidade, de frações residuais do beneficiamento do carvão ROM e das cinzas oriundas da queima do carvão como matéria-prima para a produção de fertilizantes, substrato para produção vegetal, melhoramento e, construção do horizonte superficial do solo.

Autor/ano	Título	Objetivos
Utilização do carvão de baixa qualidade e de frações residuais do beneficiamento		
Patti <i>et al.</i> (1992)	Ácidos nitro-húmicos de carvão marrom vitoriano	Descrever aplicações de ácidos nitro-húmicos indicadas na literatura; relatar resultados exploratórios na preparação, caracterização e aplicações agrícolas de ácidos nitro-húmicos.
Yan; Gauthier e Flamant (2001)	Volatilidade e química de elementos traço em um combustor de carvão.	Avaliar a volatilidade de elementos traço durante a combustão do carvão.
Dick <i>et al.</i> (2002)	Caracterização química e espectroscópica de ácidos húmicos de dois carvões sul-brasileiros com diferentes qualidades	Caracterizar ácidos húmicos no carvão e; avaliar a influência da qualidade do carvão e dos processos de nitrificação na sua estrutura química e composição.
Chassapis e Roulia (2008)	Avaliação de carvões de baixa qualidade como matéria-prima para fertilizante organomineral a base de Fe e Ca usando um novo método EDXRF	Selecionar matérias-primas para a produção de fertilizantes organominerais.
Mikos-Szymańska <i>et al.</i> (2019)	Estudo preliminar de método para obtenção de fertilizante composto granular à base de carvão marrom e biocarvão	Desenvolver método para preparação de novos fertilizantes organominerais com o uso de lenhito e biocarvão como aditivos orgânicos.
Amaral Filho <i>et al.</i> (2013)	Caracterização de um depósito de rejeitos para o gerenciamento integrado dos resíduos de mineração na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil	Caracterizar um típico depósito de rejeitos na BCC, buscando a separação de frações para uso futuro: fração para geração de energia; fração enriquecida em silicatos e; fração com alto teor de enxofre.
Weiler (2016); Weiler e Schneider (2019)	Utilização de pirita na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil - Potenciais, desafios e vantagens ambientais	Avaliar o uso e benefícios ambientais da dessulfuração da pirita presente nos rejeitos de carvão.
Weiler; Firpo e Schneider (2018)	Substrato semelhante ao solo derivado de resíduos de carvão: uma oportunidade para resíduos de carvão em um cenário mineral sustentável	Processar resíduos de carvão transformando-os em substrato semelhante ao solo; avaliar o crescimento das plantas e possíveis mudanças na especiação do enxofre.
Firpo; Amaral Filho e Schneider (2015)	Um breve procedimento para fabricar solos a partir de resíduos de minas de carvão com base no processamento mineral, conceitos agrícolas e ambientais	Propor um procedimento para fabricar solos superficiais a partir de resíduos de minas de carvão.
Weiler; Firpo e Schneider (2020)	Tecnosolo como ferramenta de gestão integrada para transformar resíduos urbanos e de mineração de carvão em um recurso	Avaliar o crescimento das plantas e as características químicas de tecnosolos produzidos a partir de resíduos finos de carvão e composto orgânico de resíduos urbanos.
Amaral Filho <i>et al.</i> (2020)	Sobre a viabilidade de resíduos de carvão sul-africanos para a produção de um 'FabSoil', tecnosolo	Investigar a viabilidade de uso da fração ultrafina do beneficiamento de carvão, dessulfurada, para a fabricação de tecnosolo, para uso como solo superficial na reabilitação de áreas mineradas na África do Sul.
Utilização das cinzas da combustão do carvão		
Basu <i>et al.</i> (2009)	Utilização potencial de cinzas volantes na agricultura: uma revisão global	Apresentar revisão dos estudos desenvolvidos nas quatro últimas décadas, sobre a utilização de cinzas volantes na agricultura.
Yunusa <i>et al.</i> (2012)	Aplicação de cinzas de carvão na agricultura: uma perspectiva estratégica	Discutir o uso das cinzas volantes para melhorar a qualidade do solo com menor risco às culturas e ao ambiente
Paul; Acharya e Pradhan (2019)	Utilização de cinzas volantes e seus potenciais benefícios na agricultura: uma revisão	Apresentar panorama sobre a importância, tipo, utilização, caracterização e utilização de cinzas volantes na agricultura.

Fonte: Própria (2022).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

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, pois esses processos são fortemente dependentes

da indústria de mineração para operar e manter o padrão de vida humano. Os fertilizantes são responsáveis por aproximadamente metade da produção mundial das culturas, fornecendo alimento, forragem, fibra e biocombustíveis para uma população global. O uso de fertilizantes minerais é um dos principais fatores responsáveis pela segurança alimentar global nos tempos atuais. A maior parte da produção atual de alimentos depende da aplicação de fertilizantes e essa dependência irá, inevitavelmente, aumentar no futuro.

Os resultados desse estudo confirmaram a viabilidade da sistemática CPQvA para a avaliação da potencialidade das frações residuais do beneficiamento do carvão ROM da BCC como matéria-prima para novos produtos. A literatura revisada e as características químicas das frações residuais estudadas sugerem potencialidade de uso dos resíduos do beneficiamento do carvão como matéria-prima para a produção de fertilizantes, recuperação de enxofre e produção de substrato para produção de plantas ou horizonte superficial do solo.

A Economia Circular, semelhante aos sistemas biológicos, visa maximizar o ciclo de vida dos materiais com base na reutilização, valorização, reciclagem e aproveitamento dos ciclos naturais de matérias-primas. A utilização de frações residuais do carvão ROM como matéria-prima para novos produtos deve ser considerada como uma opção de gestão dos resíduos mais atrativa do que o encaminhamento para depósitos controlados, uma vez que está alinhada com a Economia Circular, em termos de reciclagem de nutrientes e de diminuição das emissões de CO₂.

As frações residuais do beneficiamento do carvão ROM, a exemplo de outros resíduos, são um reservatório de substâncias valiosas e, portanto, devem ser reutilizadas tanto quanto possível. Além dos benefícios óbvios é uma chance de transição para a Economia Circular, e portanto, alguns aspectos importantes devem ser observados: o impacto ambiental deve ser minimizado; os recursos devem ser usados de forma regenerativa considerando a escassez e a finitude dos mesmos; tecnologias inovadoras de reutilização de resíduos, como matérias-primas, são necessárias e devem garantir rentabilidade e benefícios econômicos; as limitações de uso dos recursos naturais e a proteção ambiental devem ser uma prioridade, mas com sustentabilidade ambiental, econômica e social.

REFERÊNCIAS

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

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

AMARAL FILHO, J. R.; *et al.* 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.; *et al.* On the feasibility of South African coal waste for production of “FabSoil”, a Technosol. **Minerals Engineering**, 146, 106059. 2020.

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.

ANTILLE, D.L., SAKRABANI, R.; GODWIN, R. J. Effects of biosolids-derived organomineral fertilizers, urea, and biosolids granules on crop and soil established with ryegrass (*Lolium perenne* L.). **Communication Soil Science Plant Analysis**. 45(12):1605–1621. 2014.

BASU, M.; *et al.* Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. **Progress in Natural Science**. 19(10): 1173–1186. 2009.

BLOMSMA, F.; BRENNAN, G. The emergence of Circular Economy: A new framing around prolonging resource productivity. **Journal of Industrial Ecology**, 21(3): 603–614. 2017.

CHASSAPIS, K.; ROULIA, M. Evaluation of low-rank coals as raw material for Fe and Ca organomineral fertilizer using a new EDXRF method. **International Journal of Coal Geology**. 75(3): 185–188. 2008.

CHEN, Y.; CLAPP, C. E.; MAGEN, H. Mechanisms of plant growth stimulation by humic substances: the role of organo-iron complexes. *Soil Science Plant Nutrition*. 50,1089–1095. 2004.

CHERTOW, M. R. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. **Annual Review of Energy and the Environment**, 25(1), 313–337. 2000.

COSTA, S.; ZOCHE, J. J. Fertilidade de solos construídos em áreas de mineração de carvão na região sul de Santa Catarina. *RevistaÁrvore*. 33, 665-74. 2009.

DICK, D. P.; *et al.* 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.

DNPM-BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral 2015**. Brasília, v. 35. 2015.

ELIA, V.; GNONI, M. G.; TORNESE, F. Measuring circular economy strategies through index methods: A critical analysis. **Journal of Cleaner Production**. 142, 2741-2751. 2017.

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

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.; *et al.* Potassic zeolites from Brazilian coal ash for use as a fertilizer in agriculture. **Waste Management**, 70, 263–271. 2017.

GRZECA, M. Análise do processo de cominuição para combustão do carvão mineral de Candiota. 82 f. 2018. **Dissertação** (Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Mineral) UNIPAMPA, 2018.

JEONG, C. Y.; *et al.* Carboxylic content of humic acid determined by modeling, calcium acetate, and precipitation methods. *Soil Science Society of American Journal*. 71, 86-94 2007.

KALKREUTH, W.; *et al.* Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. **International Journal of Coal geology**, 68, 79–116, 2006.

KALKREUTH, W.; *et al.* 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.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources Conservation and Recycling**. 127, 221-232. 2017

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.

MATHEWS, J.A.; TAN, H. Circular Economy: Lessons from China. **Nature**. 531, 440-442. 2016.

MIKOS-SZYMAŃSKA, M.; *et al.* Preliminary study of a method for obtaining brown coal and biochar based granular compound fertilizer. **Waste and Biomass Valorization**. 10(12): 3673-3685. 2019.

PATTI, A. F.; *et al.* Nitrohumic acids from Victorian brown coal. **Science of The Total Environment**, 113(1-2), 49–65. 1992.

PAUL, S. C.; ACHARYA, G. C.; PRADHAN, A. K. Fly ash utilization and its potential benefits in agriculture: A review. **Indian Journal of Soil Conservation**. 47(1): 87-95, 2019

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, Universidade de Aveiro, Portugal. 2006.

REETZ JR., H. F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. Tradução: LOPES, A. S. São Paulo. Anda, 2017.

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.

SILVA, L. F. O.; WOLFE, A. L. Coal energy and environmental impacts: Introduction. **Energy Geoscience**. 2(2): 87–89. 2021.

TAVARES, L. M. M.; SAMPAIO, C. H. **Beneficiamento gravimétrico**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

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.

WEILER, J. Benefícios ambientais da recuperação da pirita na mineração decarvão em SC. 2016. 106 p. **Dissertação** (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) Escola de Engenharia, UFRGS, 2016.

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. Volatility and chemistry of trace elements in a coal combustor. **Fuel**. 80(15): 2217–2226. 2001.

YUNUSA, I. A. M.; *et al.* Application of Coal Fly Ash in Agriculture: A Strategic Perspective. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 42(6), 559–600. 2012.