ARTICULAÇÃO DE ECOSSISTEMAS DE INOVAÇÃO PARA A ECONOMIA CIRCULAR:

MINERAÇÃO DA TECNOSFERA COMO ESTRATÉGIA NEXUS[1] PARA JUSTIÇA SOCIAL, CLIMÁTICA E DIREITOS HUMANOS EM CIDADES BRASILEIRAS

Francisco Luiz Biazini Filho
Pesquisador de Pós-Doutorado

Maria Eugenia Gimenez Boscov
Professora Supervisora

RESUMO

As cidades contemporâneas, epicentros do consumo de recursos e da geração de resíduos, constituem arenas cruciais para o enfrentamento da tripla crise planetária: mudanças climáticas, esgotamento de recursos e aprofundamento das desigualdades. Este artigo investiga como a articulação de ecossistemas de inovação pode operacionalizar a economia circular por meio da Mineração da Tecnosfera (MT), com foco na recuperação de recursos de estoques antropogênicos — como aterros sanitários e infraestruturas urbanas — no Brasil. A MT é analisada como uma estratégia-nexus, capaz de promover avanços simultâneos em justiça climática, justiça social e direitos humanos ao transformar passivos ambientais em ativos para o desenvolvimento urbano sustentável. A análise conclui que a viabilidade técnica e econômica da Mineração da Tecnosfera está intrinsecamente condicionada à sua capacidade de integrar, de forma justa e central, os atores sociais historicamente marginalizados, notadamente os catadores de materiais recicláveis, alinhando-se a políticas públicas robustas que corrijam, em vez de reproduzir, as desigualdades sistêmicas.

Palavras-chave: Mineração da Tecnosfera; Economia Circular; Ecossistemas de Inovação; Justiça Socioambiental; Direitos Humanos; Cidades Sustentáveis.

[1] O termo "*nexus*" (do latim "ligação" ou "conexão") refere-se a uma abordagem metodológica consolidada na literatura científica internacional que reconhece as interconexões e interdependências entre diferentes sistemas, setores ou recursos (Hoff, 2011; Bizikova et al., 2013). O "*nexus approach*" é característico de pesquisas que transcendem fronteiras disciplinares; integram múltiplas escalas (local-global); reconhecem trade-offs e sinergias e promovem soluções sistêmicas. O artigo explora como UMA estratégia (mineração da tecnosfera) pode gerar benefícios em MÚLTIPLAS dimensões simultaneamente.

ARTICULATION OF INNOVATION ECOSYSTEMS FOR THE CIRCULAR ECONOMY: TECHNOSPHERE MINING AS A NEXUS STRATEGY FOR SOCIAL, CLIMATE AND HUMAN RIGHTS JUSTICE IN BRAZILIAN CITIES

Francisco Luiz Biazini Filho
Postdoctoral Researcher

Maria Eugenia Gimenez Boscov
Supervising Professor

SUMMARY

Contemporary cities, epicenters of resource consumption and waste generation, are crucial arenas for facing the triple planetary crisis: climate change, resource depletion, and deepening inequalities. This article investigates how the articulation of innovation ecosystems can operationalize the circular economy through Tecnosphere Mining (MT), with a focus on the recovery of resources from anthropogenic stocks — such as landfills and urban infrastructures — in Brazil. TM is analyzed as a nexus strategy, capable of promoting simultaneous advances in climate justice, social justice, and human rights by transforming environmental liabilities into assets for sustainable urban development. The analysis concludes that the technical and economic viability of Tecnosfera Mining is intrinsically conditioned to its ability to integrate, in a fair and central way, historically marginalized social actors, notably recyclable material collectors, aligning with robust public policies that correct, rather than reproduce, systemic inequalities.

Keywords: Technosphere Mining; Circular Economy; Innovation Ecosystems; Socio-Environmental Justice; Human rights; Sustainable Cities.

1 INTRODUÇÃO

As cidades, enquanto motores globais de inovação e consumo, concentram os maiores desafios contemporâneos de gestão de recursos e resíduos (ONU-HABITAT, 2022). A hegemonia do modelo econômico linear — baseado na extração, produção, consumo e descarte — impulsiona uma crise socioambiental de graves proporções, cujos impactos climáticos e sanitários recaem desproporcionalmente sobre as populações mais vulneráveis (IPCC, 2022). No Brasil, onde a urbanização ultrapassa 85%, a geração de resíduos sólidos se aproxima de 82 milhões de toneladas anuais. Destas, uma fração mínima é efetivamente reciclada, sobrecarregando aterros e perpetuando um ciclo de desperdício de recursos e degradação ambiental (ABRELPE, 2022).

Nesse contexto crítico, a transição para uma economia circular emerge como uma resposta estratégica, e a Mineração da Tecnosfera (MT) se apresenta como uma de suas ferramentas mais promissoras. Este artigo argumenta que a MT, quando articulada a ecossistemas de inovação e a políticas públicas inclusivas, transcende a mera recuperação de materiais. Ela se converte em um poderoso vetor para a promoção da justiça social e climática e para a efetivação de direitos humanos, ao mesmo tempo que permite a reabilitação de áreas urbanas degradadas, devolvendo-as para novos usos sociais.

Ao longo deste trabalho, analisaremos as fases, tecnologias e a escalabilidade deste processo, seus benefícios multifacetados e os desafios críticos para sua implementação. O foco central será demonstrar como a MT pode ser estruturada para não reproduzir as desigualdades do sistema atual, mas, ao contrário, atuar como uma força corretiva e regenerativa.

2 FUNDAMENTOS E PROCESSOS DA MINERAÇÃO DA TECNOSFERA

A mineração da tecnosfera (MT) é um processo que consiste na recuperação sistemática de materiais de estoques antropogênicos urbanos.

Esses estoques incluem edifícios, infraestruturas e resíduos sólidos, tanto os presentes nos fluxos de coleta diária quanto os já depositados em aterros sanitários. Inserida na lógica da economia circular, a MT ressignifica as cidades como "minas urbanas" ricas em materiais secundários, o que pode reduzir a dependência da extração de recursos virgens (KROOK; BAAS, 2013).

A economia circular propõe um sistema econômico regenerativo que redesenha produtos e serviços para manter materiais e recursos em uso pelo maior tempo possível (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2019).

A Mineração da Tecnosfera (MT), inserida na lógica da economia circular, ressignifica as cidades como "minas urbanas". No entanto, a abordagem para "minerar" esses recursos varia fundamentalmente se estamos lidando com os fluxos contínuos de resíduos ou com os

estoques de materiais já depositados (como edifícios e aterros sanitários). Ambos os processos, embora distintos em suas operações, são pilares da mesma estratégia de economia circular.

A Inteligência Artificial (IA) e a Indústria 4.0 atuam de forma transversal, otimizando tanto as rotas de coleta dos fluxos cotidianos quanto os complexos processos de triagem dos materiais escavados de aterros, garantindo maior eficiência e viabilidade econômica para a Mineração da Tecnosfera como um todo.

2.1 MINERAÇÃO DOS FLUXOS COTIDIANOS (URBAN MINING DINÂMICO)

Este processo foca na recuperação sistemática de materiais que entram diariamente no sistema de gestão de resíduos. O objetivo é interceptar e valorizar esses recursos antes que se tornem um passivo ambiental em aterros. A eficiência aqui depende da otimização da logística e da tecnologia de triagem. As fases deste processo são:

2.1.1 Geração e Coleta Inteligente (A Fonte da Mineração Diária):

Descrição: É a fase de entrada dos materiais. A base para o sucesso é a separação na fonte (idealmente em frações de recicláveis, orgânicos e rejeitos) e uma logística de coleta otimizada.

Tecnologias Aplicadas:

- Logística Reversa Digitalizada: Sensores IoT em contêineres que informam o nível de preenchimento para otimizar rotas.
- Rastreamento e Engajamento: Sistemas de rastreamento (RFID) nos veículos e aplicativos móveis para guiar e engajar os cidadãos na coleta seletiva.

2.1.2 Triagem Automatizada e Classificação:

Descrição: Os resíduos recicláveis coletados são encaminhados para centrais onde são separados com alta precisão para garantir a pureza exigida pela indústria.

Tecnologias Aplicadas:

- Centrais Mecanizadas: Equipadas com leitores ópticos (NIR), jatos de ar, separadores magnéticos e robôs com visão computacional para classificar diferentes tipos de plásticos, metais e outros materiais com velocidade e eficiência superiores à triagem manual.

2.1.3 Valorização e Reintegração na Economia:

Descrição: Os materiais separados são processados e transformados em matérias-primas secundárias ou energia, fechando o ciclo.

Rotas Tecnológicas:

- Reciclagem Mecânica: Materiais como metais, vidros e certos plásticos são processados para retornar à indústria.

- Valorização Orgânica: A fração orgânica é tratada via compostagem (gerando adubo) ou digestão anaeróbica (gerando biogás e fertilizante).
- Valorização Energética do Rejeito: A fração que não pode ser reciclada (rejeito) pode ser processada em plantas de pirólise ou gaseificação para gerar energia (syngas, bio-óleo) ou convertida em Combustível Derivado de Resíduos (CDR).

2.1.4 Escalabilidade e Adaptação Urbana:

A complexidade tecnológica deste processo é modular e deve ser adaptada à escala da cidade:

- Cidades de Pequeno Porte (até 100.000 hab.): Foco em centrais de triagem semimecanizadas, com forte integração e fortalecimento de cooperativas de catadores, que desempenham um papel central na coleta e classificação.
- Metrópoles (+1.000.000 hab.): Podem justificar investimentos em infraestruturas de ponta, como redes de coleta pneumática, mega centrais de triagem totalmente robotizadas e plantas de valorização energética para a fração final de rejeitos.

2.2 MINERAÇÃO DOS ESTOQUES DEPOSITADOS (URBAN & LANDFILL MINING)

Este processo visa recuperar materiais de estoques antropogênicos de longo prazo, como edifícios em fim de vida, infraestruturas e, principalmente, aterros sanitários. É uma mineração no sentido literal, envolvendo prospecção, escavação e reabilitação da área. As fases deste processo são:

2.2.1 Prospecção e Pesquisa:

Descrição: Levantamento e caracterização detalhada do "depósito mineral" urbano. O objetivo é mapear o volume, a composição e a localização dos materiais de interesse.

Tecnologias Aplicadas:

- Sensoriamento Remoto e Métodos Geofísicos: Uso de georradar (GPR), eletrorresistividade e análise de imagens de satélite para mapear o interior de aterros sem escavação.
- Modelagem de Informação (BIM): Análise de modelos digitais de edifícios para planejar a recuperação de materiais antes da demolição.

2.2.2 Planejamento e Viabilidade:

Descrição: Avaliação técnica, econômica e ambiental da "mina". Define-se o potencial de recuperação de materiais versus os custos de extração e os riscos de contaminação, determinando a viabilidade do projeto.

2.2.3 Extração e Remoção Física:

Descrição: Recuperação física dos materiais do estoque.

Métodos Aplicados:

- Urban Mining (Edifícios/Infraestrutura): Demolição seletiva, desmontando a estrutura de forma planejada para separar e recuperar materiais valiosos (aço, cobre, concreto) na origem.
- Landfill Mining (Aterros): Escavação mecanizada e controlada das células do aterro para extrair os resíduos depositados.

2.2.4 Processamento e Beneficiamento:

Descrição: Os materiais heterogêneos e muitas vezes degradados extraídos do estoque são separados, classificados e purificados.

Tecnologias Aplicadas:

- Sistemas robustos de peneiramento, britagem, separadores magnéticos, separadores por densidade e tecnologias avançadas de ore sorting, adaptadas da mineração convencional.

2.2.5 Valorização e Reciclagem (Abordagem ELFM):

Descrição: É a fase mais avançada, que busca a recuperação total de recursos. A abordagem de Enhanced Landfill Mining (ELFM) integra três objetivos:

- Recuperação de Materiais: Metais, vidro e outros inertes são reciclados.
- Geração de Energia: A fração de rejeitos é convertida em energia através de processos termoquímicos como gaseificação ou pirólise.
- Remediação Ambiental: O processo neutraliza um passivo ambiental.

2.2.6 Reabilitação e Recuperação Ambiental:

Descrição: Fase final e crucial que consiste na requalificação completa da área minerada. Inclui reconformação topográfica, revegetação e monitoramento, liberando um valioso espaço urbano para novos usos e eliminando uma fonte de contaminação.

3 A DIMENSÃO SOCIAL: JUSTIÇA CLIMÁTICA, SOCIAL E DIREITOS HUMANOS

A tecnologia, por si só, não garante a sustentabilidade. A implementação da MT deve ser pautada por uma forte dimensão social. A justiça climática reconhece que os impactos das mudanças climáticas são distribuídos de forma desigual, afetando mais intensamente comunidades pobres e marginalizadas. A MT promove a justiça climática ao reduzir as emissões de GEE de duas formas: (1) diminuindo a necessidade de mineração convencional, uma atividade altamente emissora; e (2) evitando as emissões de metano provenientes da decomposição de resíduos em aterros, que são uma fonte significativa de aquecimento global (IPCC, 2022).

No Brasil, a cadeia de reciclagem foi historicamente construída pelo trabalho de catadores de materiais recicláveis, uma categoria profissional marcada pela vulnerabilidade e informalidade. A modernização tecnológica da gestão de resíduos, se não for cuidadosamente planejada, pode levar à exclusão desses trabalhadores, concentrando os benefícios econômicos em grandes corporações (GUTBERLET, 2015). Uma abordagem de MT socialmente justa deve garantir a participação efetiva dos catadores e suas cooperativas no processo. Isso implica em:

- Contratação remunerada: Pagar não apenas pelo material vendido, mas pelo serviço ambiental de coleta e triagem.
- Capacitação: Oferecer treinamento para a operação das novas tecnologias.
- Infraestrutura: Investir em galpões, equipamentos de proteção e maquinário para as cooperativas.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010, já prevê a inclusão dos catadores, mas sua implementação ainda é um grande desafio (BRASIL, 2010).

4 PILARES PARA A IMPLEMENTAÇÃO: EDUCAÇÃO E CIDADANIA

O sucesso e a sustentabilidade da Mineração da Tecnosfera (MT) transcendem a tecnologia e a logística, dependendo fundamentalmente de dois pilares sociopolíticos complementares que habilitam a transição para uma economia circular justa.

4.1 PILAR 1: EDUCAÇÃO AMBIENTAL CRÍTICA

A educação é a base para a mudança de paradigma. Ela deve ir além da instrução funcional sobre "como separar o lixo", promovendo uma reflexão profunda sobre os padrões de produção e consumo, a obsolescência programada e a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. O objetivo é formar cidadãos conscientes do seu papel como agentes centrais na geração e valorização dos fluxos de materiais.

4.2 PILAR 2: CIDADANIA ATIVA E CONTROLE SOCIAL

A cidadania ativa se manifesta pelo envolvimento direto da comunidade na concepção e fiscalização das políticas de gestão de resíduos. Isso inclui a participação em conselhos, audiências públicas e o apoio a iniciativas locais, garantindo que as metas de reciclagem, compostagem e, principalmente, de inclusão socioprodutiva dos catadores sejam efetivamente cumpridas e monitoradas pela sociedade.

5 DESAFIOS E SOLUÇÕES PARA UMA IMPLEMENTAÇÃO EQUITATIVA

A implementação da MT em larga escala no Brasil enfrenta desafios estruturais que precisam ser endereçados por meio de políticas públicas robustas e modelos de negócio inovadores.

5.1 DESAFIO 1: INCLUSÃO SOCIAL VS. RISCO DE "CAPTURA CORPORATIVA"

O Risco: O principal desafio social é a possibilidade de que grandes conglomerados empresariais dominem o lucrativo setor da valorização de resíduos, replicando uma lógica extrativista que marginaliza os catadores e suas cooperativas, os protagonistas históricos da reciclagem no país.

Soluções e Políticas Públicas:

- Contratação Prioritária: Exigir por meio de legislação municipal que as cooperativas de catadores sejam contratadas de forma prioritária e remuneradas de maneira justa pela prestação dos serviços de coleta seletiva e triagem.
- Estímulo a Consórcios: Criar mecanismos que incentivem ou obriguem as empresas vencedoras de licitações a formarem consórcios ou parcerias formais com as cooperativas locais, garantindo sua participação na cadeia de valor.
- Instrumentos de Fomento: Utilizar de forma estratégica leis como a Lei de Incentivo à Reciclagem (Nº 14.260/2021), que oferece incentivos fiscais a empresas que investem em projetos de reciclagem, condicionando esses benefícios ao fortalecimento e à inclusão efetiva dos catadores.

5.2 DESAFIO 2: VIABILIDADE ECONÔMICA E INVESTIMENTOS DE ALTO CUSTO

O Desafio: A viabilidade econômica, especialmente para projetos de Landfill Mining, é um obstáculo significativo devido aos altos investimentos iniciais em prospecção, maquinário de escavação e plantas de processamento.

Soluções e Modelos de Negócio:

- Parcerias Público-Privadas (PPPs) com Cláusulas Sociais: Desenvolver contratos de PPP que não apenas viabilizem o investimento privado, mas que também incluam cláusulas robustas de contratação de mão de obra local e de integração com cooperativas.
- Criação de Mercados para Produtos Reciclados: Fomentar a demanda por materiais oriundos da MT através de políticas de compras públicas sustentáveis e incentivos para a indústria. Isso inclui o uso de agregados reciclados na construção civil e o desenvolvimento de mercados para combustíveis sintéticos e outros produtos derivados da valorização de rejeitos.
- Valoração do Passivo Ambiental: Incorporar no modelo de negócio o valor econômico gerado pela reabilitação da área do aterro. A recuperação de um terreno urbano degradado representa um ganho imobiliário e ambiental significativo para o município, que deve ser contabilizado como receita do projeto.

6 CONCLUSÃO

A Mineração da Tecnosfera (MT) representa uma oportunidade estratégica para as cidades brasileiras enfrentarem a tripla crise planetária, convertendo um passivo ambiental histórico em um ativo econômico e social. Este artigo demonstrou, contudo, que a viabilização dessa promessa não é uma questão de mero avanço tecnológico. A verdadeira circularidade, justa e sustentável, só será alcançada sob uma dupla condição: que a sofisticação das tecnologias de prospecção, extração e valorização seja indissociável de um compromisso robusto e verificável com a justiça social e climática.

Portanto, a articulação de ecossistemas de inovação deve ter como premissa inegociável a construção de um modelo de MT que seja estruturalmente inclusivo, garantindo a participação efetiva e a remuneração justa dos catadores. Esse esforço precisa ser amparado por políticas públicas integradas, que fomentem a cadeia da reciclagem de forma equitativa, e fortalecido pela participação cidadã ativa no monitoramento desses processos.

Somente ao alinhar avanço técnico com equidade social, a Mineração da Tecnosfera poderá cumprir sua promessa de ajudar a construir cidades verdadeiramente mais resilientes, justas e sustentáveis.

7 GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS

- *Economia Circular*: Sistema econômico regenerativo que, por design, mantém produtos, materiais e recursos em seu mais alto valor e uso pelo maior tempo possível, eliminando o conceito de resíduo.
- *Mineração da Tecnosfera*: Processo sistemático de prospecção, extração, processamento e reciclagem de materiais valiosos contidos em estoques antropogênicos, como aterros sanitários, edifícios, infraestruturas e resíduos tecnológicos.
- *Justiça Climática*: Abordagem que trata a mudança climática como uma questão ética e política, reconhecendo que seus impactos e custos são distribuídos de forma desigual, afetando desproporcionalmente populações vulneráveis que menos contribuíram para o problema.
- *IoT (Internet of Things / Internet das Coisas)*: Rede de dispositivos físicos (veículos, sensores, eletrodomésticos) conectados à internet, capazes de coletar e transmitir dados em tempo real, permitindo o monitoramento e controle remoto.
- *Enhanced Landfill Mining (ELFM)*: Conceito avançado de mineração de aterros que integra a recuperação de materiais e energia com a remediação do local, utilizando tecnologias termoquímicas (como gaseificação e pirólise) para maximizar a valorização dos resíduos e minimizar o impacto ambiental, permitindo um novo uso para o espaço.
- *Inteligência Artificial (IA)*: Campo da ciência da computação que desenvolve sistemas capazes de realizar tarefas que normalmente exigiriam inteligência humana, como reconhecimento de padrões, aprendizado, raciocínio e tomada de decisão.

8 REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2022. Disponível em: https://abrelpe.org.br/panorama/. Acesso em: 24 ago. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 3, 3 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 24 ago. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.260, de 8 de dezembro de 2021. Estabelece incentivos à indústria da reciclagem; e cria o Fundo de Apoio para Ações Voltadas à Reciclagem (Favorecicle) e Fundos de Investimentos para Projetos de Reciclagem (ProRecicle). **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 9 dez. 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/lei-de-incentivo-a-reciclagem-lir/LIR. Acesso em: 24 ago. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Plano de Ação para a Economia Circular do Brasil (PLANEC)**. Brasília, DF: MDIC, 2024.Disponível em: Plano Nacional de Economia Circular — Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Acesso em: 24 ago. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circular economy in cities**. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2019. Disponível em: Exemplos de economia circular nas cidades | Ellen MacArthur Foundation. Acesso em: 24 ago. 2025.

Gutberlet, J. (2015). Cooperative urban mining in Brazil: Collective practices in selective household waste collection and recycling. ***Waste Management***. 45: 22-31. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.023. Acesso em: 24 ago. 2025

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. **Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge**: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009325844. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/. Acesso em: 24 ago. 2025.

JONES, P. T. *et al*. Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery. **Journal of Cleaner Production**, v. 55, p. 45-55, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.05.021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.021. Acesso em: 24 ago. 2025.

KROOK, Joakim; BAAS, Leon. Getting serious about mining the technosphere: a review of recent LFM and ELFM research. **Journal of Cleaner Production**, v. 55, p. 1-9, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.04.043. Disponível em: Getting serious about mining the technosphere: a review of recent landfill mining and urban mining research - ScienceDirect. Acesso em: 24 ago. 2025.

ONU-HABITAT. **World Cities Report 2022**: Envisaging the Future of Cities. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2022. Disponível em: https://unhabitat.org/wcr/. Acesso em: 24 ago. 2025.

WILTS, Henning; VON GRIES, Nannette. Digitalization and the circular economy: a review of the opportunities and risks. **GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society**, v. 28, n. 3, p. 278-283, 2019. Disponível em: Digitisation and the Circular Economy: A Review of Current Research and Future Trends ou https://doi.org/10.3390/en11113009. Acesso em: 24 ago. 2025.