954 – A UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL NA CONSTRUÇÃO E NA AVALIAÇÃO DE ROTAS TECNOLÓGICAS SUSTENTÁVEIS DE GERENCIAMENTO INTEGRADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Geraldo Antônio Reichert
Engenheiro Civil, Mestre em Engenharia e Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRGS. Engenheiro do Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU) de Porto Alegre desde 1991. Especialista em gestão e gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Endereço: Av. da Azenha, 631 - Azenha - Porto Alegre - RS - CEP: 90160-003 - Brasil - Tel: +55 (51) 3289-6885 – e-mail: **Geraldo.603@gmail.com**

RESUMO

A elaboração dos planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos - PMGIRS - é uma obrigação imposta a todos os municípios brasileiros. Estes planos devem atender às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos e às metas estabelecidas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos, o Planares. Como diretriz fundamental tem-se a hierarquia do gerenciamento integrado, estabelecendo que somente os rejeitos sejam dispostos em aterro sanitário. Já as metas do Planares estabelecem índices de reciclagem, tanto para resíduos secos como para os orgânicos, e metas de desvio do envio de resíduos para o aterro sanitário. No momento de realizar o planejamento, os gestores públicos e os técnicos precisam avaliar cenários e rotas tecnológicas futuros de manejo de resíduos sólidos, avaliando tanto os fluxos de massa (índices de coleta diferenciada, de reciclagem e de disposição em aterro), como os custos de investimento e de operação envolvidos para a implementação das rotas avaliadas. Normalmente, estes estudos são demoras e dispendiosos; tempo e dinheiro nem sempre disponível na fase de elaboração dos Panos de Gestão de Resíduos Sólidos. A utilização de ferramentas computacionais pode simplificar este processo, fazendo a avaliação de rotas em um tempo muito mais curto e a um custo muito menor. Neste trabalho foi utilizada a Ferramenta Rotas e Custos para a elaboração (revisão) de um PMGIRS de um município de cerca de 1,5 milhão de habitantes. Foram avaliadas a rota atual (rota base de comparação), com realização do balanço de massa completo e levantamento de todos os custos e preços unitários envolvidos. Foram avaliados ainda mais três cenários futuros, com base nas metas de desvio de aterro sanitário do Planares (com duas variações para cada uma das rotas utilizando diferentes tecnologias de tratamento). Foi avaliado um quarto cenário com a inclusão da incineração. Ao total, foram avaliadas 10 rotas futuras. Os processos e as tecnologias utilizadas na montagem das rotas foram: coletas seletivas (de secos e de orgânicos) triagem manual e mecanizada, produção de CDR, compostagem, biodigestão anaeróbia, incineração e aterro sanitário. As rotas futuras foram avaliadas em dois cenários; com e sem a inclusão dos valores das receitas acessórias (advindas da venda de recicláveis, de composto, de CDR, de biometano e de energia). As simulações demostram claramente que as receitas acessórias são fundamentais para dar sustentabilidade financeiras as rotas tecnológicas. A rota considera a mais viável foi a com aumento três vezes da coleta seletiva em realçai à atual, 100% triagem manual dos resíduos da coleta seletiva, triagem mecanizada de 79% dos resíduos mistos, reciclagem de secos de 24,3%, 17,5% para produção CDR dos rejeitos, compostagem somente dos resíduos seletivos orgânicos (24,8%), e desvio de 66,7% da massa que deixa de ir ao aterro sanitário. A estimativa do investimento total necessário desta rota é de R$ 430,3 milhões, com custos anuais de operação previstos de R$ 297,4 milhões (sem considerar receitas assessórias) e de R$ 190,6 milhões (considerando as receitas acessórias). A rota escolhida tem custo de operação anual similar aos custos atuais, quando consideradas as receitas acessórias, e custos de operação 56% maiores quando as receitas acessórias não são consideradas. A ferramenta mostrou-se extremamente útil no processo decisório para escolha de rotas tecnológicas futuras de manejo de resíduos sólidos urbanos, podendo ser utilizados para a elaboração ou revisão de planos de gestão integrada de resíduos sólidos, tanto em municípios quanto em consórcios regionais.

PALAVRAS-CHAVE: PMGIRS, modelagem de rotas tecnológicas, RSU, sustentabilidade, viabilidade.

INTRODUÇÃO

A construção, a implementação e a constante atualização dos Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - PMGIRS - são obrigações impostas aos municípios por legislação nacional, e também aos demais entes federados. Estes Planos devem prever projetos e ações de manejo de resíduos em um horizonte de até 20 anos, com a proposição de metas de reciclagem e desvio de disposição dos resíduos sólidos urbanos - RSU - em aterro sanitário. Para o atingimento das metas de reciclagem estabelecidas, o estudo de diferentes rotas tecnológicas de gerenciamento destes resíduos devem ser avaliados e ter seus custos de implantação e de operação estimados.

Define-se rota tecnológica como "o conjunto de processos, tecnologias e fluxos dos resíduos desde a sua geração até a sua disposição final, envolvendo circuitos de coleta de resíduos de forma indiferenciada e diferenciada e contemplando tecnologias de tratamento dos resíduos com ou sem valoração energética" (JUCÁ et al., 2014). Na fase de planejamento, ou de elaboração do PMGIRS de um determinado município ou região, questões limitantes de tempo e de recursos financeiros são dificultam a realização de estudo técnicos e econômicos mais aprofundados sobre qual a melhor rota tecnológica de tratamento de RSU para aquele município. Neste sentido, a utilização de ferramentas computacionais previamente desenvolvidas e testadas podem ser de grande utilidade aos técnicos e gestores poderem tomar a melhor decisão baseada em estudos comparativos. Uma vez ajustados, estas ferramentas permitem que rapidamente se façam simulações comparando diferentes rotas tecnológicas.

Para realizar a avaliação de diferentes rotas tecnológicas, com utilização de diferentes tecnologias e processos de manejo e de tratamento de RSU, foi utilizada a "Ferramentas Rotas e Custos" desenvolvida no âmbito do projeto de cooperação Brasil e Alemanha, chamado de ProteGEEr – Cooperação para a proteção do clima na gestão de resíduos sólidos urbanos". Essa ferramenta foi desenvolvida em formato de planilhas em Microsoft Excel® (.xls) e está disponível para utilização pelo público no sítio da internet do Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (BRASIL: MDR, 2021).

Seu objetivo é fazer a simulação de diferentes combinações de rotas tecnológicas futuras e fornece um balanço geral de massa e de geração de energia para cada rota avaliada. Como saídas da ferramenta tem-se a estimativa da geração dos subprodutos nas diversas etapas do tratamento, como materiais recicláveis (papel, plástico, metal e vidro), CDR - combustível derivado de resíduos -, composto, biogás (com produção de energia elétrica ou biometano na planta de biodigestão e no aterro) e energia elétrica na unidade de incineração. Permite ainda realizar uma estimativa dos custos de implantação (Capex) e de operação (Opex) das rotas. Custos unitários, como reais por habitante, reais por domicílio ou reais por toneladas, também podem ser estimados.

OBJETIVO

O objetivo principal do trabalho é demonstrar a funcionalidade da utilização da ferramenta computacional Rotas e Custos para avaliação, de maneira relativamente simples e de forma eficaz, de rotas tecnológicas futuros de gerenciamento sustentável de resíduos sólidos urbanos; demonstrando também que a ferramenta pode ser utilizada com sucesso na elaboração dos planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos, dando mais robustez e maior confiabilidade aos cenários futuros estudados.

METODOLOGIA

No presente trabalho apresenta-se a aplicação da Ferramenta Rotas e Custos para a avaliação de rotas tecnológicas futuras em estudo real para a atualização do PMGIRS de um município de cerca de 1.300.000 habitantes. A utilização da Ferramenta é uma forma bastante rápida e relativamente simples de realizar estudos de pré-viabilidade, permitindo uma comparação com os índices de reciclagem desejados bem como os custos totais envolvidos. Além das rotas futuras, o Manual do Usuário da Ferramenta (DE PAULA e REICHERT, 2021) recomenda que inicialmente sempre se faça a simulação da "Rota Atual", de modo que se possa fazer uma comparação entre as rotas futuras e a situação atual do manejo de RSU no município.

A simulação das rotas foi realizada com a alimentação de algumas informações básicas de entrada que não são alteradas nas simulações de rotas futuras. Foram fornecidos os seguintes dados:

- População atendida: 1.492.530 hab.;
- Geração per capita de RSU: 1,08 $kg.hab.^{-1}.d^{-1}$;

- Massa total de RSU manejada: 1.619 $t.d^{-1}$.

Além disso, deve ser inserida também a composição gravimétrica média dos RSU (Tabela 1).

Tabela 1: Gravimetria média ponderada dos RSU

Componente	Composição RSU (%)	Agrupamentos	
		(%)	Tipo
Resíduos de alimentos	32,6	38,6	Orgânicos
Resíduos verdes	6,0		
Papel, papelão	11,8	33,1	Recicláveis secos
Plástico filme	7,9		
Plásticos rígidos	7,5		
Vidros	4,7		
Metais ferrosos	0,7		
Metais não ferrosos	0,5		
Têxteis	6,3	14,2	Outros/Rejeitos combustíveis
Borracha, couro	4,9		
Fraldas descartáveis e similares	2,6		
Madeira	0,4		
Resíduos minerais	13,2	14,1	Outros/Rejeitos não combustíveis
Outros rejeitos	0,9		
TOTAL	**100**	**100**	

Utilizando as informações descritas no Item 7.2.1, e considerando um índice de coleta seletiva de resíduos secos de 2,9%, e um índice de coleta seletiva de orgânicos de 1,1% (referente a coleta com segregação na fonte de resíduos verdes e arbóreos), a triagem manual dos resíduos seletivos por cooperativas de catadores, e a compostagem dos resíduos arbóreos, resulta o balanço de massa da Rota Tecnológica Atual para o manejo dos RSU no município, apresentado na Figura 1.

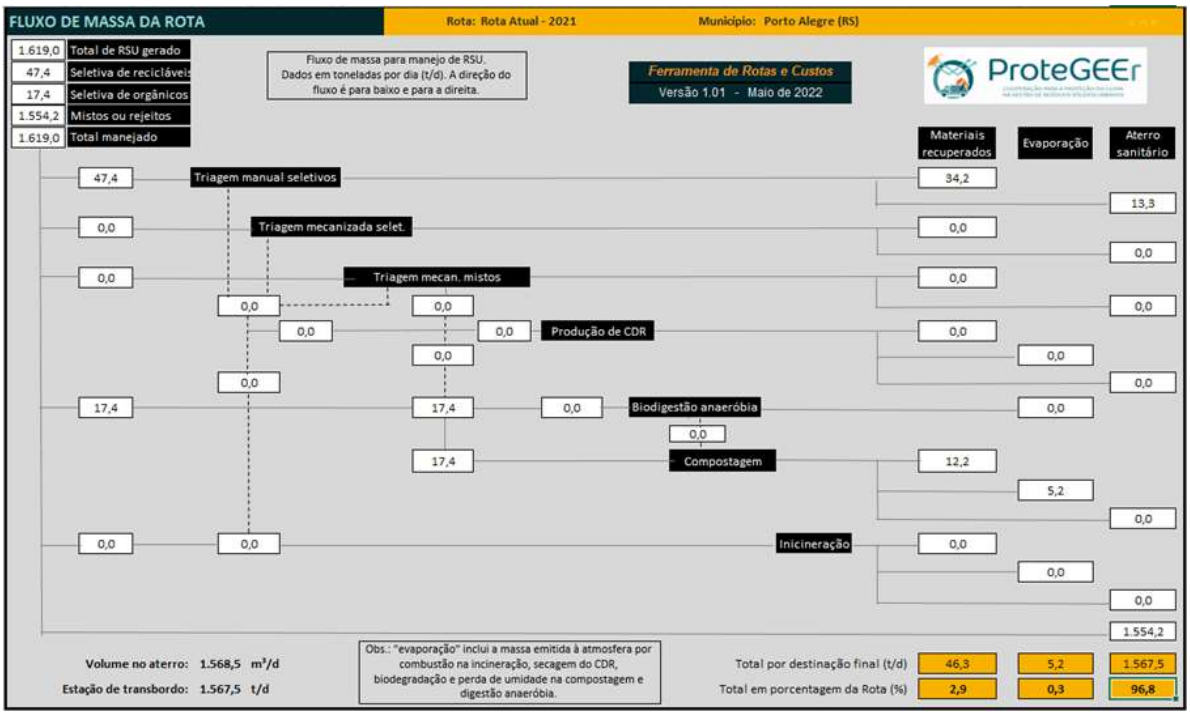

Figura 1: Fluxo de massa da Rota Tecnológica Atual de manejo de RSU

O índice efetivo de reciclagem de resíduos seletivos secos (sobre o total de RSU) é de apenas 2,1%. Em relação aos orgânicos, apenas os resíduos verdes e arbóreos são compostados (1,1%). Isso resulta em um desvio do aterro de 3,2%, sempre em massa.

Os custos unitários do manejo dos RSU (excluídos os custos da limpeza urbana), são estimados em R$ 392,15 por tonelada de RSU.

Os dados descritos na sequência foram utilizados para a avaliação das rotas tecnológicas futuras.

Dados econômico-financeiros também foram inseridos na Ferramenta para a realização das simulações de rotas futuras. Essas informações foram levantadas para a realidade dos preços e valores praticados no município e na região, referentes ao segundo semestre de 2022.

Os principais dados utilizados estão apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 – Informações para os cálculos de Capex e Opex

Informações sobre Capex & Opex | Capex	Unidade	Valor
Custo de Câmbio: Real/Euro	R$.€$^{-1}$	5,55
Custo de Câmbio: Real/Dólar Americano	R$.US $$^{-1}$	5,11
Taxas + Impostos sobre Importação de Equipamentos	%	50
Preço Médio do Terreno para Construção	R$.m^{-2}	110,00
Preço Médio do Terreno para Construção de Aterro Sanitário	R$.m^{-2}	30,00
Preço Médio de Paisagismo + Pavimentação em Concreto	R$.m^{-2}	600,00
Incineração: Origem Base Tecnológica	**Tecnologia Europeia**	
Preço Médio do Concreto Usinado Ind. Aplicado	R$.m^{-3}	6.000,00
Preço Médio da Construção de Galpão Industrial com Piso	R$.m^{-2}	1.210,48
Reajuste de Preços Nacionais vs. Março/2020	%	21
Informações sobre Capex & Opex | Opex	**Unid.**	**Valor**
Salário Médio - Nível Gerencial	R$.mês^{-1}	25.000
Salário Médio - Nível Supervisão	R$.mês^{-1}	15.000
Salário Médio - Nível Operacional	R$.mês^{-1}	2.500
Regime de Contratação Operação Triagem Manual	**Regime Cooperativa**	
Salário Médio - Triador/Operador Triagem Manual	R$.mês^{-1}	2.000
Custo Médio de Consumo de Energia Elétrica	R$.MWh^{-1}	800,00
Custo Fixo - Demanda de Energia Elétrica Contratada Ind.	R$.MW^{-1}.mês^{-1}	30.000,00
Custo Médio de Serviço — Terceiros Auxiliares Fixos	R$.mês^{-1}	150.000,00
Custo Médio de Aluguel de Pá Carregadeira com Operação	R$.mês^{-1}	30.000
Custo Médio de Aluguel de Equipamentos Móveis para Aterro	R$.h^{-1}	150,00
Custo Médio de Destinação de Efluente Líquido	R$.m^{-3}	120,00
Custo Médio de Óleo Diesel para Movimentação Interna de Resíduos	R$.L^{-1}	7,00
Custo Médio de Ureia — Abatimento das Emissões - Incinerador	R$.kg^{-1}	180,00
Custo Médio de Cal Hidratada - Abatimento das Emissões - Incinerador	R$.kg^{-1}	0,75
Custo Médio de Carvão Ativado - Abatimento das Emissões - Incinerador	R$.kg^{-1}	100,00
Custo Tarifa Média de Água Industrial para Incinerador	R$.m^{-3}	10,00

Tabela 3: Custos das coletas, transbordo e disposição final em aterro

Dados de Custos Econômicos	Unidade	Valor
Custo de Coleta e Transporte - Seletiva Secos	$R\$.t^{-1}$	980
Custo de Coleta e Transporte - Seletiva Orgânicos	$R\$.t^{-1}$	450
Custo Coleta e Transporte - Mistos/Rejeitos	$R\$.t^{-1}$	228
Custo Operação Estação Transbordo Coleta Mistos/Rejeitos	$R\$.t^{-1}$	0
Custo Transporte Unidade Tratamento Resíduos até Aterro	$R\$.t^{-1}$	64
Custo para Disposição Aterro Sanitário	$R\$.t^{-1}$	88
Custo Médio CIF para Disposição Aterro Resíduos Perigosos	$R\$.t^{-1}$	250

Tabela 4: Valores unitários de comercialização de subprodutos ou receitas acessórias

Dados — Receitas Acessórias Unitárias	Unidade	Valor
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): Papel/Papelão	$R\$.t^{-1}$	485,81
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): Plástico Filme	$R\$.t^{-1}$	1.410,65
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): Plástico Rígido	$R\$.t^{-1}$	2.343,82
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): Vidros	$R\$.t^{-1}$	67,13
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): Metais Ferrosos	$R\$.t^{-1}$	776,75
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): Metais Não Ferrosos	$R\$.t^{-1}$	4.982,67
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): Composto para Uso Nobre	$R\$.t^{-1}$	105,00
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): Composto Uso Não Nobre	$R\$.t^{-1}$	0,00
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): CDR Fino	$R\$.t^{-1}$	40,00
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): CDR Grosso	$R\$.t^{-1}$	30,00
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): Energia Elétrica - UTR	$R\$.MWh^{-1}$	300,00
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): Energia Elétrica - Aterro	$R\$.MWh^{-1}$	300,00
Preço Médio Líquido — Venda (FOB): Biometano - UTR	$R\$.Nm^{-3}$	2,10
Preço Médio Líquido —Venda (FOB): Biometano - Aterro	$R\$.Nm^{-3}$	2,10

As principais premissas utilizadas nas simulações das rotas futuras no PMGIRS com a Ferramenta Rotas e Custos foram as seguintes:

- Gravimetria média ponderada dos RSU (domiciliares da coleta convencional e automatizada de mistos, seletivos, arbóreos, de focos de disposição irregular, da limpeza pública, comerciais e outros) – dados da Tabela 1;
- Possibilidade de implantação escalonada, com base nas metas de reciclagem e de desvio de aterro sanitário propostas no Planares;
- Triagem 100% manual dos seletivos secos por catadores nas UTs contratadas;
- Doação dos materiais recicláveis secos, da coleta seletiva, às UTs;
- Triagem mecanizada dos RSU mistos;
- Materiais recicláveis secos oriundos da triagem mecanizada de mistos são comercializados, ou seja, fazem parte das receitas acessórias;
- Produção de composto nobre somente de orgânicos coletados seletivamente;
- Somente o composto nobre é comercializado e contabilizado como receita acessória;
- Produção de composto não nobre dos orgânicos da triagem de resíduos da coleta de mistos;
- Composto não nobre da triagem de resíduos mistos vai para doação, não sendo contabilizado como receita acessória;
- Comercialização de CDR e energia gerados e contabilização como receitas acessórias;
- Como premissa da Ferramenta Rotas e Custos, utilizada nas simulações das Rotas, tanto a população atendida como a geração de RSU são consideradas constantes no tempo; e somente tecnologias consolidadas nacional ou internacionalmente podem ser utilizadas.

Como principais objetivos das rotas futuras estabeleceu-se o aumento significativo dos índices de reciclagem e de desvio de envio de resíduos ao aterro sanitário. Tomando como base as metas estabelecidas pelo Planares para a região Sul do Brasil, utilizou-se as metas de desvio de aterro para 2028, 2033 e 2040, respectivamente, como metas de curto, médio e longo prazo para o planejamento.

No Quadro 1 apresenta-se, na primeira coluna, a identificação das rotas avaliadas; o seu objetivo quanto à meta de desvio de aterro sanitário, na coluna mais à direita; e, na coluna central, uma descrição sucinta dos processos de coleta seletiva e das tecnologias de tratamento utilizadas.

Quadro 1: Descrição das rotas tecnológicas avaliadas e metas estabelecidas

Rota	Descrição da Rota	Meta da Rota
Atual	Somente coleta seletiva de 2,9% de secos e compostagem de 1,1% de resíduos verdes (em relação ao total de RSU).	
1	Aumento 1,5 X seletiva atual, 100% triagem manual seletivos, triagem mecanizada de 32% dos resíduos mistos, produção CDR dos rejeitos, compostagem nobre de seletivos orgânicos, orgânicos da triagem de mistos para digestão anaeróbia e composto não nobre.	Metas de curto prazo Desvio de aterro sanitário de 29,5% (Meta Planares para 2028)
1A	Idem 1, sem digestão anaeróbia, somente compostagem.	
1B	Idem 1A, sem CDR dos rejeitos. Rejeitos vão para aterro sanitário.	
2	Aumento 2 X seletiva atual, 100% triagem manual seletivos, triagem mecanizada de 51% dos resíduos mistos, produção CDR dos rejeitos, compostagem nobre de seletivos orgânicos, orgânicos da triagem de mistos para digestão anaeróbia e composto não nobre.	Metas de médio prazo Desvio de aterro sanitário de 45,0% (Meta Planares para 2033)
2A	Idem 2, sem digestão anaeróbia, somente compostagem.	
2B	Idem 2A, sem CDR dos rejeitos. Rejeitos vão para aterro sanitário.	
3	Aumento 3 X seletiva atual, 100% triagem manual seletivos, triagem mecanizada de 79% dos resíduos mistos, produção CDR dos rejeitos, compostagem nobre de seletivos orgânicos, orgânicos da triagem de mistos para digestão anaeróbia e composto não nobre.	Metas de longo prazo Desvio de aterro sanitário de 66,7% (Meta Planares para 2040)
3A	Idem 3, sem digestão anaeróbia, somente compostagem.	
3B	Idem 3A, sem CDR dos rejeitos. Rejeitos vão para aterro sanitário.	
4	Idem 3, substitui CDR por incineração.	Extrapola Planares, c/ incineração

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Utilizando a Ferramenta Rotas e Custos para fazer as simulações de balanço de massa para as combinações tecnológicas, feitas para as dez rotas futuras apresentadas no Quadro 1, tem-se os resultados apresentados por toneladas por dia em cada opção de tratamento na Tabela 5, e em termos percentuais na Tabela 6.

Tabela 5: Massa enviada para cada de tipo de tecnologia utilizada em cada rota

Rota	Capacidade das tecnologias empregadas na Rota Tecnológica avaliada ($t.d^{-1}$)							
	Triagem			Tratamento biológico		Tratamento térmico		Dispos. final
	Manual secos	Mecan. secos	Mecan. mistos	Composta-gem	Digestão anaeróbia	CDR	Incineração	Aterro sanitário
Atual	47,4	0,0	0,0	17,4	0,0	0,0	0,0	1.568,1
1	72,9	0,0	486,5	160,9	153,3	143,4	0,0	1.134,2
1A	72,9	0,0	486,5	179,3	0,0	143,4	0,0	1.134,8
1B	72,9	0,0	486,5	179,3	0,0	0,0	0,0	1.260,3
2	97,1	0,0	758,0	247,2	240,4	213,4	0,0	884,5
2A	97,1	0,0	758,0	276,1	0,0	213,4	0,0	885,3
2B	97,1	0,0	758,0	276,1	0,0	0,0	0,0	1.072,1
3	145,7	0,0	1.121,7	371,3	361,1	323,7	0,0	538,2
3A	145,7	0,0	1.121,7	414,6	0,0	323,7	0,0	539,5
3B	145,7	0,0	1.121,7	414,6	0,0	0,0	0,0	822,7
4	145,7	0,0	1.121,7	371,3	361,1	0,0	512,1	411,7

Tabela 6: Porcentagem da massa tratada por tecnologia e por rota

Rota	Em % da massa total de RSU gerenciados - Resultados da simulação					
	Coleta seletiva		Reciclagem e tratamento			Dispos. final
	De secos	De orgânicos	Rec. secos	Trat. biológico	Trat. térmico	Desvio de AS
Atual	2,9	1,1	2,1	1,1	0,0	3,2
1	4,5	1,6	11,4	10,8	7,8	29,9
1A	4,5	1,6	11,4	10,7	7,8	29,9
1B	4,5	1,6	11,4	10,7	0,0	22,1
2	6,0	2,2	17,2	16,6	11,5	45,4
2A	6,0	2,2	17,2	16,5	11,5	45,3
2B	6,0	2,2	17,2	16,5	0,0	33,7
3	9,0	3,3	24,3	24,9	17,5	66,8
3A	9,0	3,3	24,3	24,8	17,5	66,7
3B	9,0	3,3	24,3	24,8	0,0	49,2
4	9,0	3,3	24,5	24,9	25,1	74,6

Da mesma forma que faz o balanço de massa, com a Ferramenta Rotas e Custos é possível fazer uma estimativa de todos os custos envolvidos na implantação e na operação das rotas avaliadas. Na Tabela 7.7 apresenta-se esses custos, com o custo de implantação (Capex) e os custos de operação (Opex) por rota.

O custo atual de operação foi estimado com base no orçamento anual de 2021 do Departamento de Limpeza Urbana, e considerando que 61,5% do orçamento (R$ 190.607.000,00) é utilizado em manejo dos RSU e o restante na limpeza urbana.

Tabela 7: Resultados econômico-financeiros

Rota	Receitas acessórias	Custos unitários			Opex (MR$.ano^{-1})	Capex (MR$)
		R$.t^{-1}	R$.hab^{-1}.mês^{-1}	R$.dom^{-1}.mês^{-1}		
Atual	Sem	376,60	10,69	28,73	190,607	-
1	Sem	583,37	16,49	44,51	295,254	338,703
	Com	470,73	13,30	35,92	238,245	
1A	Sem	494,06	13,96	37,70	250,055	175,953
	Com	382,92	10,82	29,22	193,804	
1B	Sem	495,85	14,01	37,83	250,961	149,802
	Com	385,27	10,89	29,40	194,994	
2	Sem	587,90	16,61	44,86	297,548	459,991
	Com	427,21	12,07	32,60	216,220	
2A	Sem	556,58	15,73	42,47	281,699	304,518
	Com	398,24	11,25	30,39	201,559	
2B	Sem	560,02	15,83	42,73	283,438	262,402
	Com	402,48	11,37	30,71	203,703	
3	Sem	636,89	18,00	48,59	322,345	677,694
	Com	422,51	11,94	32,24	213,843	
3A	Sem	587,62	16,61	44,83	297,407	430,447
	Com	376,77	10,65	28,75	190,691	
3B	Sem	594,24	16,79	45,34	300,758	364,391
	Com	384,61	10,87	29,34	194,657	
4	Sem	761,69	21,52	58,12	385,507	1.716,096
	Com	529,86	14,97	40,43	268,173	

Para auxiliar na interpretação dos resultados e na tomada de decisão final sobre qual a rota tecnológica futura é mais sustentável, apresenta-se na sequência uma série de figuras com os resultados já apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7.

Na Figura 2 pode-se visualizar claramente que à medida que os processos de tratamento são incrementados, aumentam os índices de reciclagem (de secos e de orgânicos) e diminui a disposição em aterro sanitário.

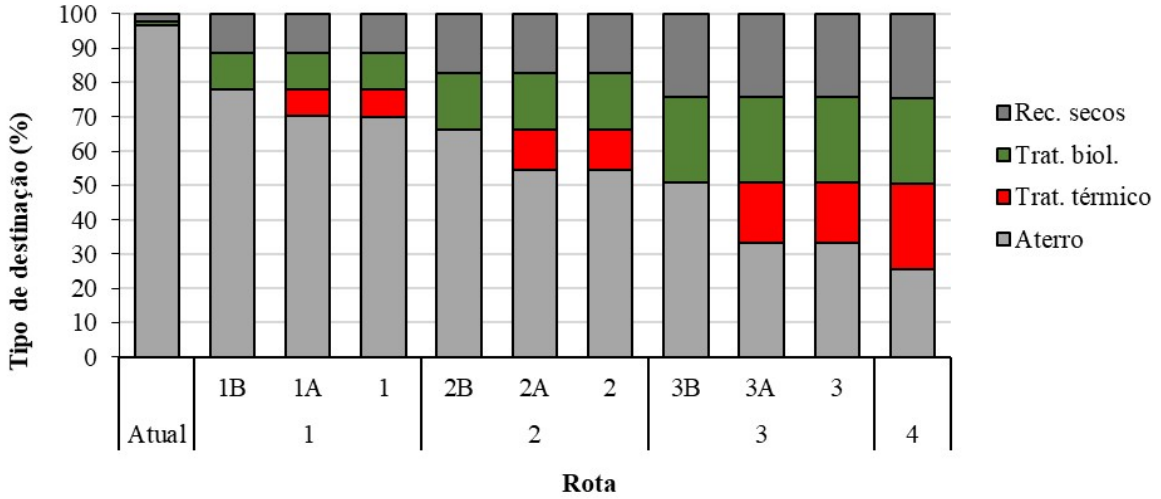

Figura 2: Resultados balanços de massas comparativos

Outra observação interessante que pode ser feita é a de que desde que se implante um sistema integrado e planejado de gerenciamento de resíduos, a utilização de processos térmicos (como CDR, nas Rotas 3A e 3, ou incineração, na Rota 4) não afeta os índices de reciclagem, como comumentemente se quer fazer crer. Nota-se que, na Figura 2, a Rota 3B, que não utiliza processos térmicos, aparecem os mesmos índices de reciclagem que as outras três já citadas.

Com base nos custos de implantação que constam na Tabela 6 construiu-se a Figura 3, onde se mostra as porcentagens de desvio de aterro sanitário em cada Rota. Considerando as metas de desvio de aterro estabelecidas conforme Quadro 1, verifica-se que além da Rota Atual, apenas a Rota B (1B, 2B e 3B) não atinge a meta estabelecida.

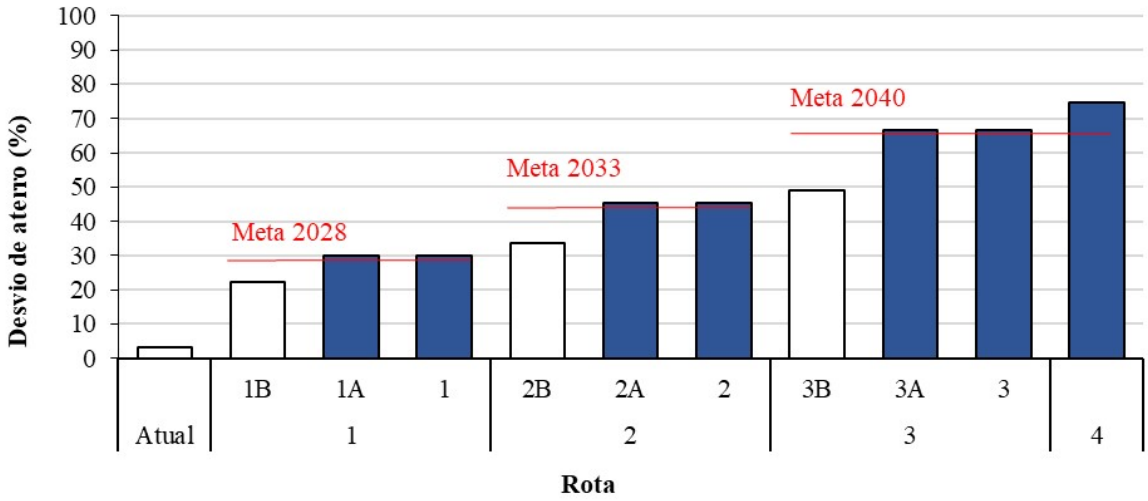

Figura 3: Resultados índices desvio de aterro

Com a Rota 3B, bem como suas parciais 1B e 2B, não atingindo a meta fundamental de desvio de aterro, construiu-se a Figura 4 com os resultados dos custos de implantação (Capex).

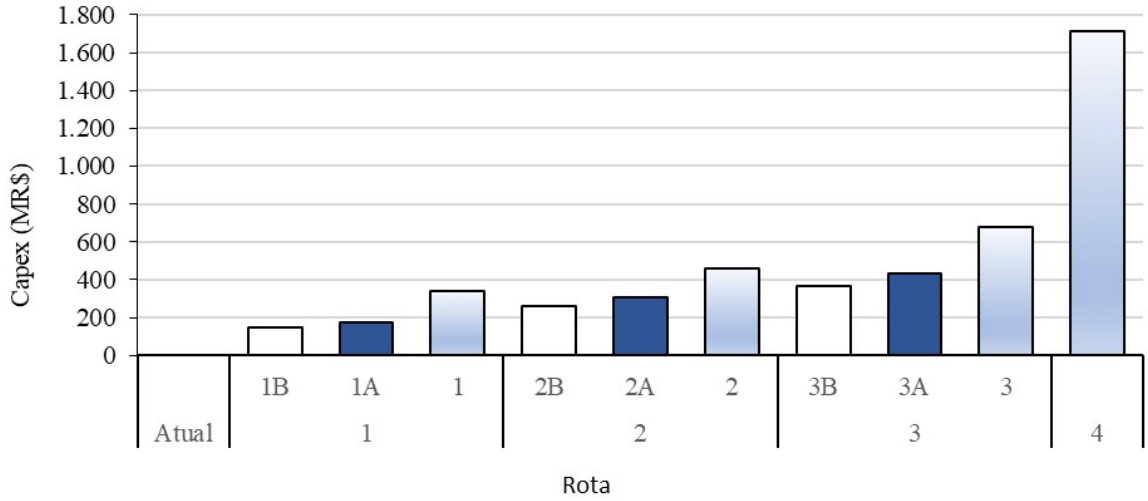

Figura 4: Resultados de Capex

Dentre as rotas que atendem às metas de longo prazo de desvio de aterro, a de menor Capex é a Rota 3A. A Rota 3 tem um Capex 57% maior que a Rota 3A. A Rota 4 tem Capex 153% maior que a Rota 3, e 300% maior que a Rota 3A.

Os custos de operação foram estimados sem considerar as receitas acessórias e também com a monetização das receitas acessórias advindas da comercialização de subprodutos, cujos resultados em ordem crescente dos custos de operação, estão apresentados nas Figuras 5 e 6. É importante lembrar que foram consideradas como receitas acessórias a venda dos recicláveis da triagem de resíduos mistos, do CDR, do composto nobre e da energia. Considerou-se a doação dos recicláveis da coleta seletiva e do composto não nobre, de modo que estes não geram receitas acessórias a considerar.

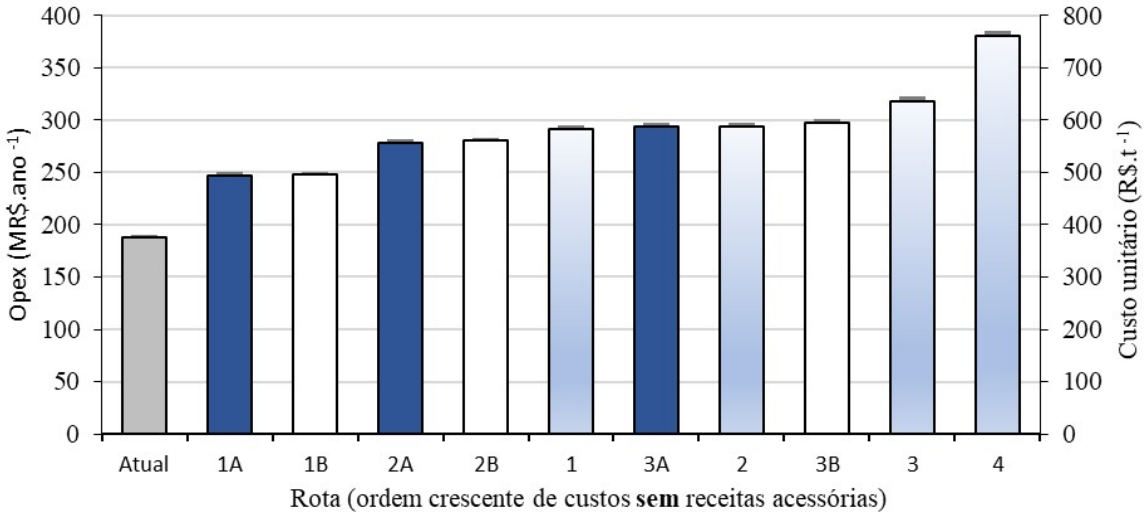

Figura 5: Resultados de Opex (sem receitas acessórias)

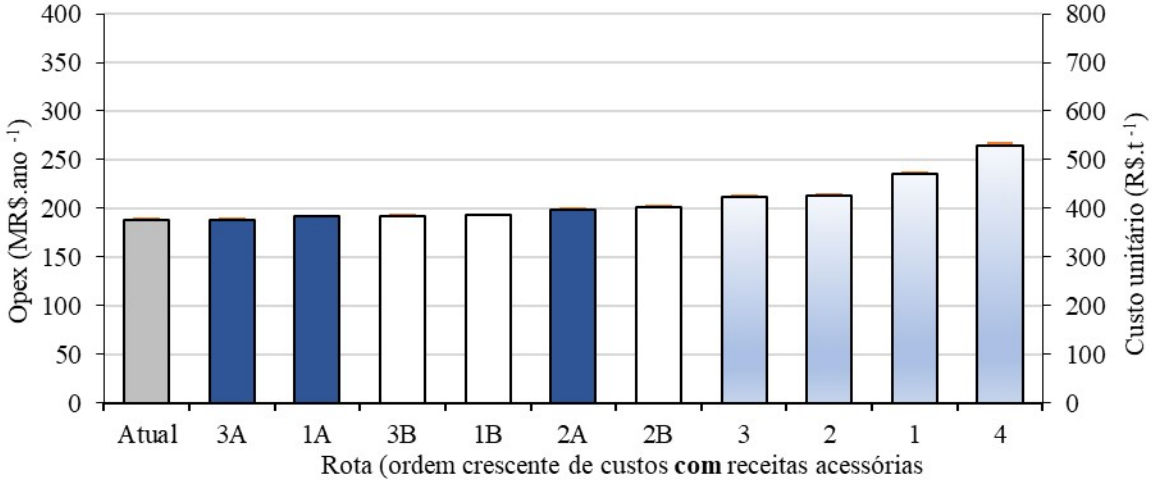

Figura 6: Resultados de Opex (com receitas acessórias)

Analisando os dados das Figuras 7.5 e 7.6 pode-se concluir que:

- A rota com inclusão da incineração, além da Capex maior, tem também custo de operação mais elevado;
- As receitas acessórias são fundamentais para dar maior sustentabilidade financeira;
- Quando são consideradas as receitas acessórias, o custo de operação é cerca de 33% menor;
- Quando são consideradas as receitas acessórias, as rotas futuras 4 e 3 têm custos de operação maiores que a Rota Atual, respectivamente 41% e 56% maiores; já a Rota 3A tem o mesmo custo de operação da Rota Atual;
- Quando não são consideradas as receitas acessórias, as rotas futuras avaliadas têm custos maiores que a Rota Atual: 100% maior na Rota 4, 69% maior na Rota 3 e 56% maior na Rota 3A;
- A Rota 3A com receitas acessórias, é a que tem o menor custo entre todas as rotas futuras avaliadas, com custos de operação similares aos da Rota Atual.

Na Tabela 8 apresenta-se os custos de implantação e de operação considerando a Rota Atual e as três rotas futuras que atendem a meta estabelecida para o ano de 2040.

Novamente se verifica que a rota tecnológica futura mais sustentável é a Rota 3A, com custos de operação similares aos custos de operação atuais, quando as receitas acessórias são consideradas, e custos de operação cerca de 36% maiores quando as receitas acessórias não são consideradas.

Essa separação de Opex em com e sem receitas serve para se ter uma ideia dos custos associados. No entanto, devido à já referida importância financeira dessas receitas, não se imagina um cenário futuro de implantação de nova rota tecnológica sem que essas receitas acessórias sejam incluídas, ainda que parcialmente.

Tabela 8: Comparativos de Capex e Opex das Rotas que atendem a meta 2040

Rota	Capex (MR$)	Opex			
		Sem receitas acessórias		Com receitas acessórias	
		(MR$.ano^{-1})	(R$.t^{-1})	(MR$.ano^{-1})	(R$.t^{-1})
Atual	-	190,607	376,60	190,607	376,60
3A	430,447	297,407	587,62	190,691	376,77
3	677,694	322,345	636,89	213,843	422,51
4	1.716,096	385,507	761,69	268,173	529,86

O custo de implantação da Rota 3A está estimado em cerca de R$ 430,5 milhões.

Essa Rota prevê 24,3% de reciclagem de secos e 24,8% de reaproveitamento de orgânicos por compostagem, e 17,5% enviados para comercialização como CDR, o que resulta em um desvio total de aterro sanitário de 66,7% dos resíduos gerenciados.

O balanço final da Rota Futura 3A pode ser visualizado na Figura 7.

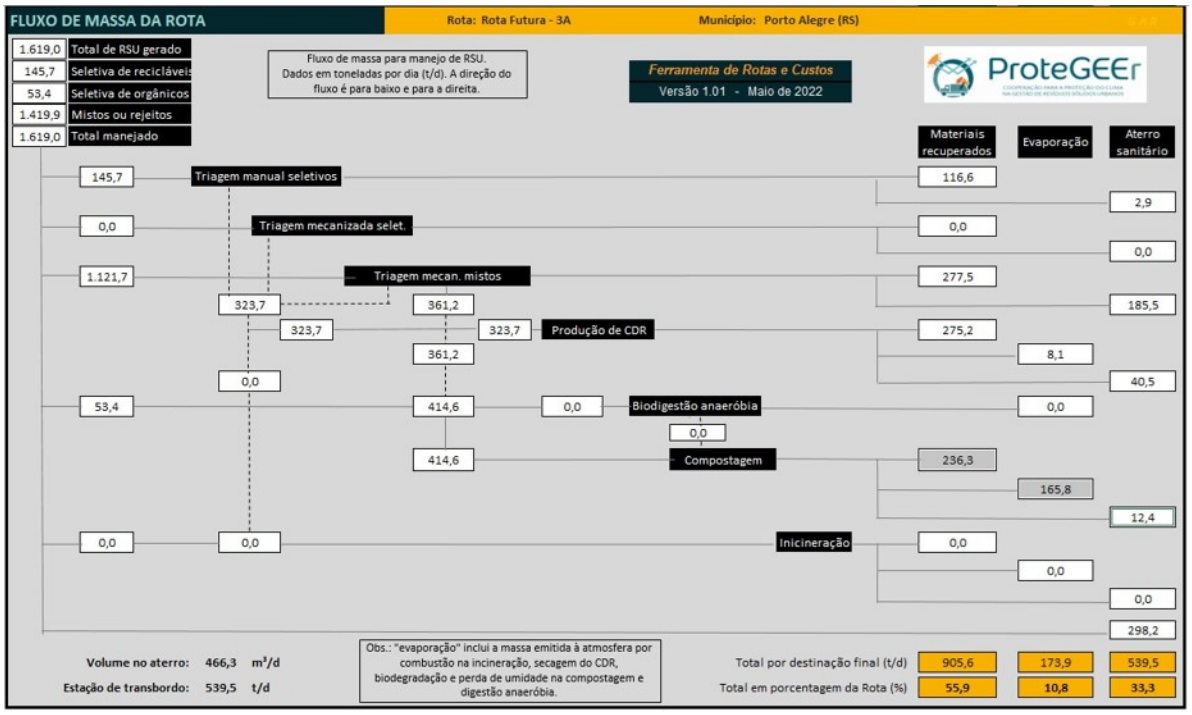

Figura 7: Fluxo da massa da Rota Tecnológica Futura 3A (melhor Rota)

Os custos apresentados anteriormente são valores estimados, com base na utilização da Ferramenta Rotas e Custos. Estudos e projetos futuros mais detalhados devem ser desenvolvidos para melhor definição técnica e financeira da rota a ser implantada.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A utilização de ferramenta computacional na avaliação de possíveis rotas futuras de manejo de RSU mostrou-se uma ótima alternativa para a realização ou a atualização de planos municipais ou regionais de gestão integrada de resíduos sólidos. Uma vez que as informações e dados para a modelagem da rota atual vigente, e

dos dados técnicos e econômico-financeiros, sejam levantados e conhecidos, torna-se muito fácil e rápido a simulação de tantas rotas futuras quantas forem desejadas, tornado a tomada de decisão mais assertiva.

Outras questões e recomendações importantes sobre a utilização da ferramenta utilizada e sobre a amplitude do estudo de rotas aqui realizado são:

- A Ferramenta Rotas e Custos é uma ferramenta de apoio à tomada de decisão e não resulta em um modelo (ou rota) ótimo;
- Os resultados de balanço de massa e de custos são balizados pela exatidão da gravimetria de entrada na modelagem. Havendo mudanças futuras na composição estimada dos resíduos, os resultados serão diferentes também, uma vez que a gravimetria influencia no balanço de massas, na geração de subprodutos e, consequentemente, nos custos associados;
- Nas simulações feitas adotou-se que os materiais seletivos triados na coleta seletiva não gerariam receitas (seriam doados às cooperativas que operam as UTs contratadas), assim como não as geram o composto não nobre produzido. Todas as demais vendas gerariam receitas acessórias;
- Os custos de operação com receitas acessórias dependem do real mercado para esses materiais (como composto e CDR), bem como de contratos futuros de venda (energia). Variações de mercado podem afetar significativamente os fluxos financeiros e a viabilidade econômico-financeira das alternativas estudadas;
- O estudo aqui apresentado é um estudo comparativo de pré-viabilidade. Para se chegar aos custos reais da rota e a uma estimativa confiável de tarifa final a ser cobrada do usuário, estudos mais profundos e detalhados devem ser conduzidos, como o Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental – EVTEA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional - MDR. 2023. Programa ProteGEEr: Ferramentas Rotas e Custos:. Brasília: MDR, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/protegeer/ferramenta-de-rotas-tecnologicas-e-custos-para-manejo-de-rsu-e-manual-do-usuario-200b/FerramentaRotaseCustosV.1.01_Mai.2022.xlsm/view. Acesso em: 17 jan. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos – SINIR. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos** (Planares). Brasília, DF: MMA, 2022. Disponível em: https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf. Acesso em: 17 jan. 2025.

DE PAULA e REICHERT, 2021. Manual do Usuário: Ferramenta Rotas e Custos. Organização: Cooperação para a proteção do clima na gestão dos resíduos sólidos urbanos – ProteGEEr. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. 223 p. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/protegeer/ferramenta-de-rotas-tecnologicas-e-custos-para-manejo-de-rsu-e-manual-do-usuario-200b/01.ManualdaFerramentaRotaseCustos_jun.2021.pdf. Acesso em: 17 jan. 2025.

JUCÁ, J.F.T. *et al*. 2014. Uso de modelos de apoio à decisão para análise de alternativas tecnológicas de tratamento de resíduos sólidos urbanos na Região Sul do Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, João Pessoa, v. 19, p. 33-42, jan./mar. 2014.

REICHERT, G.A. *et al*. 2023. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: PMGIRS-POA (2023-2033). Coordenação técnica Geraldo Antônio Reichert; grupo técnico gestor de elaboração e revisão do PMGIRS. 216 p. Porto Alegre: PMPA. Disponível em: https://prefeitura.poa.br/sites/default/files/usu_doc/sites/dmlu/PMGIRS_POA_2023.pdf. Acesso em: 17 jan. 2025.