

# RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: INTERFACES ENTRE QUÍMICA, MEIO AMBIENTE E EDUCAÇÃO

## URBAN SOLID WASTE: INTERFACES BETWEEN CHEMISTRY, ENVIRONMENT AND EDUCATION

**Raysa de Melo Lima**

Universidade Estadual do Piauí

E-mail: [rdemlima@aluno.uespi.br](mailto:rdemlima@aluno.uespi.br)

**Nielson José Silva Furtado**

Universidade Estadual do Piauí

E-mail: [nielsonfurtado@prp.uespi.br](mailto:nielsonfurtado@prp.uespi.br)

LATES ID: <http://lattes.cnpq.br/7124178002064233>

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5868-4116>

**RESUMO:** A crescente geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) configura um dos maiores desafios ambientais do século XXI, exigindo soluções integradas entre ciência, tecnologia e educação. Este trabalho tem como objetivo analisar a aplicação da Química no tratamento dos RSU, bem como sua relevância na formação de uma consciência ambiental crítica por meio do Ensino. A pesquisa possui caráter qualitativo e bibliográfico, baseando-se em documentos oficiais, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), relatórios do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e autores da área de ensino de química e sustentabilidade. Observou-se que a composição química dos resíduos influencia diretamente os impactos ambientais e as possibilidades de reaproveitamento dos RSU. Processos como a incineração, a compostagem e a reciclagem química foram discutidos na ótica de práticas sustentáveis e de baixo impacto ambiental, dentro dos princípios da química verde. Além disso, constatou-se que a inserção da temática educação ambiental no ensino de Química contribui para a contextualização dos conteúdos químicos em sala de aula e para o desenvolvimento da cidadania dos estudantes frente ao problema da poluição pelos RSU. Portanto, o artigo mostra que a integração entre química, meio ambiente e educação é essencial para promover um manejo mais consciente dos RSU e formar indivíduos capazes de atuar criticamente frente aos desafios ambientais contemporâneos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos Sólidos Urbanos. Química. Educação Ambiental. Sustentabilidade.

**ABSTRACT:** The growing generation of municipal solid waste (MSW) represents one of the greatest environmental Challenger of the 21<sup>st</sup> century, requiring integrated solutions across science, technology, and education. This study aims to analyze the application of Chemistry in MSW treatment, as well as its relevance in fostering critical environmental awareness through Education. The research is qualitative and bibliographic in nature, drawing on official documents such as the National Solid Waste Policy (Law No. 12.305/2010), reports from the United Nations Environment Programme (UNEP), and authors in the fields of chemistry education and sustainability. It was observed that the chemical composition of waste directly influences environmental impacts and the possibilities for MSW reuse. Processes such as incineration, composting, and chemical recycling were discussed from the perspective of sustainable, low-impact practices aligned with the principles of green chemistry. Furthermore, the study found that incorporating environmental education into Chemistry teaching contributes to the contextualization of chemical content in the classroom and to the development of students' citizenship in relation to the issue of pollution caused by MSW. Therefore, the article shows that the integration of chemistry, environment, and education is essential to promote more conscious MSW management and to prepare individuals capable of critically addressing contemporary environmental challenge

**KEY WORDS:** Municipal Solid Waste. Chemistry. Environmental Education. Sustainability.

## Introdução

O aumento da geração de resíduos sólidos urbanos é um dos maiores desafios ambientais da atualidade. Segundo o (Programa das Nações Unidas no Brasil [PNUB] 2024), o custo global da gestão de resíduos pode saltar de US\$252 bilhões, registrados em 2020, para US\$600 bilhões por ano até 2050. Esses números revelam a magnitude do problema e a urgência em desenvolver soluções sustentáveis e viáveis do ponto de vista econômico. De acordo com a (Política Nacional de Resíduos Sólidos [PNRS] 2010), resíduos sólidos são todos os materiais, substâncias, objetos ou bens descartados resultantes de atividades humanas em sociedade, em estado sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas características tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgoto ou exijam para isso soluções que sejam inviáveis em face da melhor tecnologia disponível. Assim, a presença desses materiais no ambiente acarreta uma série de consequências, pois contaminam as águas dos rios, córregos, lagos, mares e oceanos, o que causa graves impactos na biodiversidade, como por exemplo, contaminam o ar, o solo e o subsolo, modificam a paisagem, degradando as espécies vegetais locais; causam assoreamento de rios, córregos e lagos; atraem vetores de doenças como baratas, ratos, moscas, mosquitos e escorpiões; emitem poluentes diversos (Secretaria do Meio Ambiente do Município de São Paulo [SEMIL], 2024).

Diante desse cenário, a gestão dos RSU tornou-se tema de destaque nas políticas públicas e nas pesquisas científicas. Isso mostra que esses resíduos não são apenas elementos visíveis acumulados nas cidades, mas um conjunto complexo de compostos que interagem com o meio ambiente, resultando em reações químicas responsáveis tanto pela contaminação quanto pelo reaproveitamento. Nesse sentido, a química pode ser utilizada para caracterizar a composição dos resíduos, compreender seus processos de decomposição e degradação, identificando substâncias tóxicas formadas durante o descarte incorreto, bem como desenvolver métodos de tratamento e recuperação sustentáveis. Entretanto, como aponta o químico ambiental Rodrigo Oliveira em entrevista com o (Conselho Federal de Química [CFQ] 2021), fala que existe na sociedade civil um “vácuo de informação”, uma lacuna de conhecimento que impede a população de compreender a real natureza dos resíduos e de adotar práticas adequadas de descarte. Essa falta de compreensão reforça a necessidade de fortalecer a Educação Ambiental aliado aos fundamentos da química verde, de modo que os estudantes e cidadãos consigam compreender as transformações químicas envolvidas no manejo dos resíduos, tornando-se agentes de mudança. Por esse motivo, torna-se importante a realização de pesquisas que discutam o papel da educação química na minimização dos resíduos sólidos urbanos, destacando sua relevância na compreensão dos impactos ambientais, na comunicação das tecnologias de tratamento e na formação de uma consciência ambiental através do Ensino.

Este artigo tem como objetivo apresentar os fundamentos químicos relacionados à composição, transformação e tratamento dos RSU, destacando o papel do conhecimento Químico e da Educação Ambiental na formação de uma consciência ambiental crítica por meio do Ensino, buscando a minimização desse problema.

## Revisão Bibliográfica

### Resíduos Sólidos Urbanos

A (PNRS, 2010) estabelece diferentes classificações para os resíduos sólidos, considerando sua origem e natureza. No contexto urbano, os RSU englobam os resíduos domiciliares, originários de atividades domésticas em residências, e os resíduos de limpeza urbana, provenientes da varrição, da manutenção de logradouros, vias públicas, dentre outros. A própria legislação também define outras categorias específicas, conforme transcrito a seguir:

(01) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais; (02) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS; (03) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis; (04) Resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica (PNRS, 2010).

Nas últimas décadas, o crescimento populacional, o avanço tecnológico e crescimento econômico juntamente com a expansão das áreas urbanas e os padrões de consumo e produção insustentáveis intensificaram a geração dos RSU em todo o mundo. Segundo o (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente [PNUMA] 2024), entre 2020 e 2050 haverá um crescimento anual de RSU de 2,1 bilhões de toneladas para 3,8 bilhões de toneladas, um aumento de 56%.

No contexto brasileiro, os dados seguem a mesma tendência. De acordo com a (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente [ABREMA] 2024), cada habitante gerou, em média, 1,047 kg de RSU por dia no ano de 2023. Multiplicando-se esse valor pela população estimada para o país, obteve-se uma geração anual de aproximadamente 81 milhões de toneladas de RSU, o que equivale a mais de 221 mil toneladas diárias. Deste total, cerca de 35% ainda são destinados de forma inadequada, principalmente à lixões onde ocorre descarte a céu aberto sem planejamento, sem impermeabilização do solo e sem controle de chorume e gases, causando poluição e riscos à saúde e à aterros controlados que apresentam cobertura parcial do lixo e alguma organização, mas não possuem sistemas eficientes de impermeabilização, drenagem de chorume e controle ambiental (Ministério do Desenvolvimento Regional, 2021).

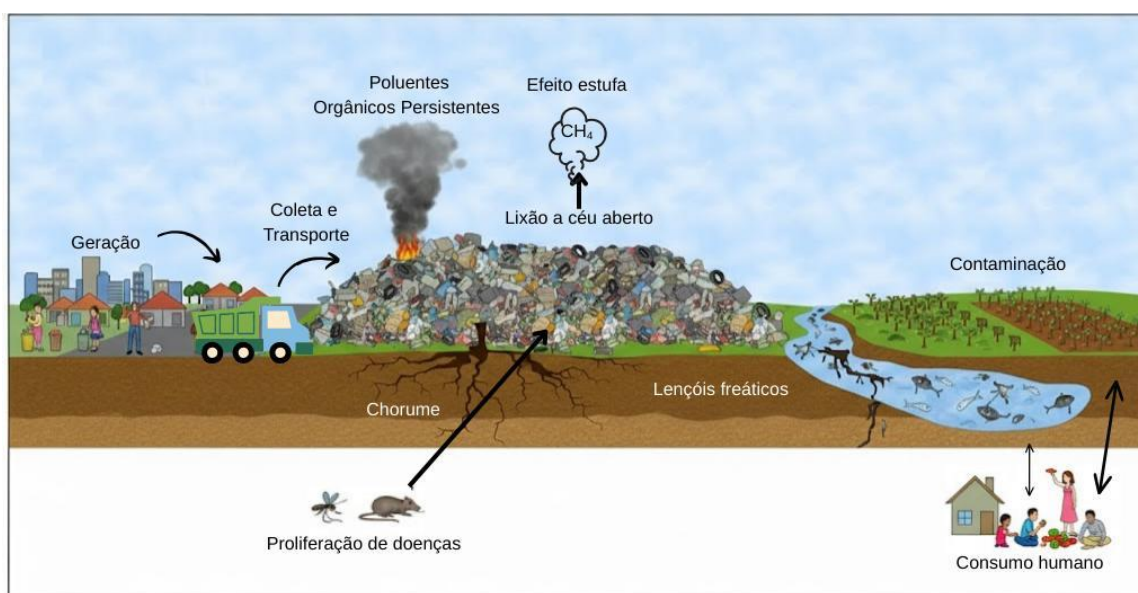
A composição dos RSU brasileiros é outro fator relevante para a compreensão do problema, como pode-se observar na Tabela 01 o RSU é composto por 45,30% do total de matéria orgânica, seguida de plásticos (16,80%), papel e papelão (10,40%), vidro (2,70%), metais (2,30%) e outros materiais (Ministério do Meio Ambiente [MMA], 2022).

**Tabela 01:** Composição média dos RSU no Brasil.

Tipo de material	Percentual médio (%)
Orgânico	45,30
Plástico	16,80
Papel/Papelão	10,40
Vidro	2,70
Metais	2,30
Outros	22,50

Fonte: adaptado de (MMA, 2022).

A predominância da fração orgânica reforça o potencial para tratamentos biológicos, como compostagem e biodigestão anaeróbia, os quais podem reduzir o volume destinado a aterros. No entanto, a mistura inadequada de resíduos e a presença de materiais perigosos ou não recicláveis continua ainda sendo um obstáculo à gestão eficiente. Além disso, a falta de infraestrutura adequada para o manejo de resíduos também resulta em sérios impactos ambientais e sociais. De acordo com o (PNUMA, 2024), os resíduos depositados em solo podem causar a poluição a longo prazo das fontes de água doce por metais pesados e outros compostos perigosos. Além disso, a queima de resíduos a céu aberto libera Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) que podem se concentrar na cadeia alimentar e ter efeitos negativos na vida selvagem e na saúde humana, incluindo câncer e infertilidade sem falar da proliferação de vetores de doenças, como mosquitos, ratos e baratas, um esquema dos efeitos dessa poluição ao meio ambiente é apresentado na Figura 01.

**Figura 01:** Esquema mostrando a poluição e efeitos causados pelos RSU

Fonte: adaptado de Google Gemini, 2025

Conforme o (*United Nations Environment Programme* [UNEP] 2024), as emissões de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e gases fluorados como hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) representam cerca de 25% do total de emissões de GEE (gases de efeito estufa). Sendo que as emissões de CH<sub>4</sub> compõe a segunda maior fonte de emissões de GEE e uma das suas formas de geração é o gerenciamento inadequado de resíduos. Assim, os RSU não representam apenas um problema de saneamento, mas também uma questão climática e de saúde pública.

A seção 2, Art. 30 da (PNRS, 2010), propõe como um dos princípios fundamentais a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e a logística reversa, envolvendo fabricantes, distribuidores, comerciantes e consumidores em uma cadeia de corresponsabilidade ambiental. A efetividade dessas políticas depende da integração entre ciência, gestão pública e educação ambiental. Assim, é na Educação Ambiental que a Química se torna uma aliada essencial para compreender, tratar e reduzir os impactos causados pelos RSU no meio ambiente.

### **Química Aplicada aos Resíduos Sólidos Urbanos**

A química é uma ciência necessária na compreensão, no tratamento e na redução dos impactos ambientais causados pelos RSU. Cada material descartado possui uma composição química específica, que determina seu comportamento no ambiente, seu tempo de degradação, seus riscos e suas possibilidades de ser reaproveitado. Dessa forma, o conhecimento químico é indispensável para aprender os processos de decomposição e poluição, para assim formular soluções sustentáveis.

Os processos químicos estão presentes em todas as etapas do ciclo de vida dos resíduos, desde a decomposição natural até o tratamento em aterros, incineradores ou usinas de reciclagem. No caso da matéria orgânica, a degradação ocorre quando bactérias decompõem resíduos orgânicos formando muitos gases diferentes. O metano (CH<sub>4</sub>) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) compõem de 90 a 98% do gás de aterro sanitário, enquanto que os 2 a 10% restantes incluem o gás nitrogênio (N), oxigênio (O), amônia (NH<sub>3</sub>), sulfetos(), hidrogênio (H) e vários outros gases (*New York State*, 2012).

Em relação aos plásticos, a química desempenha papel central na identificação e no desenvolvimento de alternativas biodegradáveis. Os plásticos são formados por polímeros, que são macromoléculas que consistem de unidades químicas repetidas, ligadas umas às outras. O polietileno, polipropileno e poliestireno são exemplos de polímeros derivados do petróleo, cuja estrutura molecular é estável e dificulta sua degradação natural. Já os biopolímeros, como o poliacido láctico (PLA), são obtidos a partir de fontes renováveis e possuem ligações químicas mais suscetíveis à ação de microrganismos (Menda, 2011).

Além dos plásticos, o papel é outra grande fonte de liberação de resíduos sólidos, seja pelo processo de destintagem (processo de remover a tinta das fibras do papel), polpação (transformar a madeira em uma polpa que é a matéria prima na fabricação do papel) ou tratamento de águas residuais, em geral, eles são úmidos e contêm quantidades significativas de cinzas. Além disso, uma variedade de gases, como óxidos de nitrogênio (NO, entre outros), sulfetos de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), sulfetos de sódio (Na<sub>2</sub>S), metil mercaptano (CH<sub>3</sub>SH), dióxidos de cloro (ClO<sub>2</sub>) e compostos de enxofre (SO<sub>2</sub>, entre outros) são liberados no ar a partir de resíduos sólidos. Esses gases são responsáveis por distúrbios crônicos, juntamente com outras complicações, como dor de cabeça e náusea (Dixit *et al.*, 2019).

O vidro é outro exemplo de RSU e apresenta composição e propriedades variáveis, sendo formado principalmente por silício (), presente naturalmente na areia e quartzo, o vidro possui

uma estrutura amorfa e desordenada, o que lhe confere diferentes pontos de fusão e de características físicas conforme sua composição. Entre os tipos mais comuns de vidro estão o vidro borossilicato, utilizado por sua resistência a variações térmicas, e o vidro cristal, que anteriormente continha chumbo em sua composição, porém devido aos riscos de lixiviação (processo em que a água dissolve e carrega compostos do solo ou dos resíduos, formando soluções chamadas lixiviados, que podem infiltrar-se e atingir os lençóis freáticos) desse metal tóxico, passaram a ser empregados outros óxidos metálicos como substitutos (Da Silva & Filgueiras, 2023).

Um outro exemplo de RSU são os metais, estando presentes em pilhas, baterias e equipamentos eletrônicos, os quais são liberados nos corpos de água. Metais não essenciais como alumínio (Al), níquel (Ni), tálio (Tl), chumbo (Pb), cádmio (Cd) e mercúrio (Hg) e berílio (Be) são altamente tóxicos, mesmo em pequenas concentrações, também considerados contaminantes para o ecossistema devido às suas características de persistência no ambiente e bioacumulação (Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva [INCA] 2024).

Uma vertente química importante no estudo dos RSU são os conceitos de química verde, que se aplica a todo ciclo de vida de um produto químico, desde seu design, ao seu descarte, visando reduzir ou eliminar o uso ou a geração de substâncias perigosas. Diferente da remediação que remove materiais perigosos do meio ambiente, a química verde impede que os materiais perigosos sejam gerados, essa abordagem propõe o desenvolvimento de produtos e processos sustentáveis, baseados em princípios como: uso de matérias-primas renováveis, aumento da eficiência energética e substituição de reagentes tóxicos (*U.S. Environmental Protection Agency [EPA], Office of Chemical Safety and Pollution Prevention [OCSPP], 2013*). A química verde se apoia em doze princípios fundamentais, os quais são apresentados no Quadro 02, que orientam o desenvolvimento dos processos químicos sustentáveis.

Quadro 02: Os 12 Princípios da Química Verde

Nº	Princípio	Aplicação na gestão de RSU
01	Prevenção	Evitar a geração de resíduos na fonte.
02	Economia atômica	Maximizar o uso de todos os materiais nas reações químicas.
03	Síntese menos perigosa	Substituir reagentes tóxicos por alternativas seguras.
04	Design de produtos seguros	Desenvolver compostos biodegradáveis e não tóxicos.
05	Solventes e auxiliares mais seguros	Reduzir o uso de solventes orgânicos poluentes.
06	Eficiência energética	Utilizar processos que demandem menos energia.
07	Uso de matérias-primas renováveis	Empregar fontes naturais como biomassa.
08	Redução de derivados desnecessários	Evitar etapas químicas que gerem subprodutos.
09	Catálise	Aplicar catalisadores em vez de reagentes estequiométricos.
10	Degradabilidade planejada	Projetar produtos que se decomponham naturalmente.
11	Análise em tempo real para prevenção da poluição	Monitorar processos para evitar emissões.
12	Química inerentemente mais segura	Reduzir riscos de acidentes químicos.

Fonte: Adaptado de (EPA, OCSPP, 2013).

A aplicação desses princípios na gestão dos RSU tem se mostrado essencial para reduzir impactos e promover o reaproveitamento de materiais. Muitos são os exemplos de uso da química verde em materiais do cotidiano, como por exemplo, os plásticos biodegradáveis, Chips fabricados a partir de penas de galinhas, mistura de óleo de soja e açúcar que substitui resinas e solventes de tintas, entre outras inovações (*American Chemical Society* [ACS], 2025). Isso mostra que, por meio da química verde, torna-se possível converter resíduos orgânicos em biogás, bioetanol e outros compostos de valor agregado, enquanto resíduos inorgânicos, como metais e vidros, podem ser purificados e reintegrados em cadeias produtivas (MMA, 2022). O desenvolvimento de novos materiais e meios de reaproveitamento químico reforça o papel da química como ciência transformadora e esse conhecimento deve ser transmitido por diferentes meios à sociedade.

#### Educação Ambiental e o Ensino de Química



Para a (Constituição da República Federativa do Brasil, 1988) incumbe ao poder público, promover a Educação Ambiental em todos os níveis de ensino e a conscientização pública para a preservação do meio ambiente. Isso mostra que a educação ambiental é um processo contínuo e permanente na formação dos cidadãos, tendo o papel de levar ao público conhecimentos e informações sobre as questões ambientais e sensibilizar os cidadãos estimulando a iniciativa e o senso de responsabilidade para a construção de um futuro melhor, pois como é dito na lei 225 da constituição federal:

Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (Constituição da República Federativa do Brasil, 1988).

Uma das melhores formas de sensibilizar e formar cidadãos conscientes da responsabilidade em preservar o meio ambiente é adicionar a educação ambiental às disciplinas curriculares. Porém de acordo com a seção dois, inciso 1 da lei nº 9795 (Brasil, 1999), sabe-se que diferente das disciplinas como química, matemática, português, entre outros, a educação ambiental não deve ser posta como disciplina isolada e sim como tema transversal que pode ser estudado em diferentes vertentes.

Ainda sobre a lei nº 9795 (Brasil, 1999), no Art. 10. A educação ambiental será desenvolvida como uma prática educativa integrada, contínua e permanente em todos os níveis e modalidades do ensino formal. Para buscar cumprir a lei, a (Base Nacional Comum Curricular [BNCC] 2018) é essencial, pois incorpora tanto nos anos iniciais quanto nos anos finais, a relação entre ciência e meio ambiente, da seguinte forma:

Nos anos iniciais, [...] saberes dos alunos vão sendo organizados a partir de observações orientadas, com ênfase na compreensão dos seres vivos do entorno, como também dos elos nutricionais que se estabelecem entre eles no ambiente natural. Nos anos finais, a partir do reconhecimento das relações que ocorrem na natureza, evidencia-se a participação do ser humano nas cadeias alimentares e como elemento modificador do ambiente, seja evidenciando maneiras mais eficientes de usar os recursos naturais sem desperdícios, seja discutindo as implicações do consumo excessivo e descarte inadequado dos resíduos. Contempla-se, também, o incentivo à proposição e adoção de alternativas individuais e coletivas, ancoradas na aplicação do conhecimento científico, que concorram para a sustentabilidade socioambiental. Assim, busca-se promover e incentivar uma convivência em maior sintonia com o ambiente, por meio do uso inteligente e responsável dos recursos naturais, para que estes se recomponham no presente e se mantenham no futuro (BNCC, 2018, p. 326-327).

Nesse contexto, a química como uma das três matérias que compõem as ciências da natureza pode ser vista como essencial para conscientizar os estudantes e sensibilizá-los nas atitudes e posturas em relação às questões ambientais. A educação ambiental é um instrumento fundamental para reduzir a geração dos RSU e promover a gestão responsável. Porém, quando associada ao ensino de química, possibilita que os estudantes compreendam a partir da inserção da temática dos resíduos sólidos as transformações químicas envolvidas na degradação e na reciclagem dos materiais, proporcionando a junção entre conhecimento científico e vivência diária dos estudantes. Ao usar problemas reais, temas que estejam em evidência nos meios de



comunicação, como nos jornais e redes sociais, é possível tornar as salas de aulas em um ambiente participativo, colaborativo e engajador.

Além disso, a formação docente desempenha papel central na consolidação de práticas pedagógicas voltadas à sustentabilidade. Professores de química devem ser capacitados para relacionar conceitos abstratos a problemas concretos do cotidiano, como a poluição e a gestão de resíduos, já que o ensino de ciências supervaloriza a memorização de fórmulas, regras e cálculos, em detrimento do desenvolvimento de habilidades e competências essenciais para que o aluno exerça a cidadania (Dos Santos et al., 2012). Desse modo, o docente ao inserir a questão ambiental em sua prática pedagógica na perspectiva de educar para a sustentabilidade contribui para que os alunos tenham interpretação própria, instigando o desenvolvimento de uma prática social centrada no conceito da natureza, fortalecendo o vínculo entre ciência e cidadania. A abordagem integrada entre ciência e cidadania promove o entendimento de que a química não é apenas uma disciplina teórica, mas uma ferramenta de transformação social e ambiental (Aprígio et al., 2024). Assim, a problemática dos RSU ultrapassa o campo técnico e científico, alcançando dimensões educacionais e sociais. A formação de uma consciência crítica sobre o consumo e o descarte responsável é um componente essencial da educação ambiental e do ensino de química.

## Metodologia

### Procedimentos Metodológicos

A pesquisa foi desenvolvida por meio da leitura, seleção e análise crítica de materiais científicos, relatórios técnicos e documentos oficiais sobre Resíduos Sólidos Urbanos. As principais fontes utilizadas incluíram: Leis e políticas públicas: Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), Constituição Federal de 1988 e Política Nacional de Educação Ambiental (Lei nº 9.795/1999); Relatórios institucionais: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2024), Ministério do Meio Ambiente (2017 e 2022), Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2024) e *United Nations Environment Programme* (UNEP, 2024), Ministério do Desenvolvimento Regional (2021), Ministério da Educação (2018), Instituto Nacional de Câncer (INCA, 2024); Fontes acadêmicas e técnicas: artigos publicados em bases como *ScienceDirect*, Revista Polymers, Revista Brasileira de Energias Renováveis, Revista Brasileira de Pós-Graduação, Revista Química Nova, Revista Interdisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão, Revista Mediação, Editora *Blackwell Publishing Ltd*, Publicadora *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ); bem como publicações sobre química verde, sustentabilidade e gerenciamento de resíduos: *American Chemical Society*, *California Air Resources Board*, *New York State*, Conselho Federal e Regional de Química, Painel de Mudanças Climáticas, Programa das Nações Unidas no Brasil (PNUB, 2024), Secretaria do Meio Ambiente do Município de São Paulo, *U.S. Environmental Protection Agency* (2013, 2025, n.d.).

### Crítérios de Seleção das Fontes

Os materiais foram selecionados considerando os seguintes critérios de relevância temática, com publicações que abordassem a geração, composição química, tratamento ou impacto ambiental dos resíduos sólidos urbanos e confiabilidade da fonte, onde priorizou-se, instituições oficiais e publicações revisadas por pares. Tomando-se por base isso, teve preferência por materiais publicados entre 2010 e 2025, sem excluir obras clássicas ou legislações anteriores (como a Constituição Federal de 1988) por seu valor histórico e normativo.

### Organização da Análise

Foi realizada uma leitura exploratória e interpretativa, estruturada em três eixos temáticos, que correspondem às seções do referencial teórico: (01) Resíduos Sólidos Urbanos: abordando conceitos, classificações, geração e impactos.; (02) A química aplicada aos resíduos: explorando as composições químicas, reações de decomposição e princípios da química verde e (03) Educação ambiental e ensino de química: discutindo o papel da educação formal na formação de uma consciência ambiental crítica.

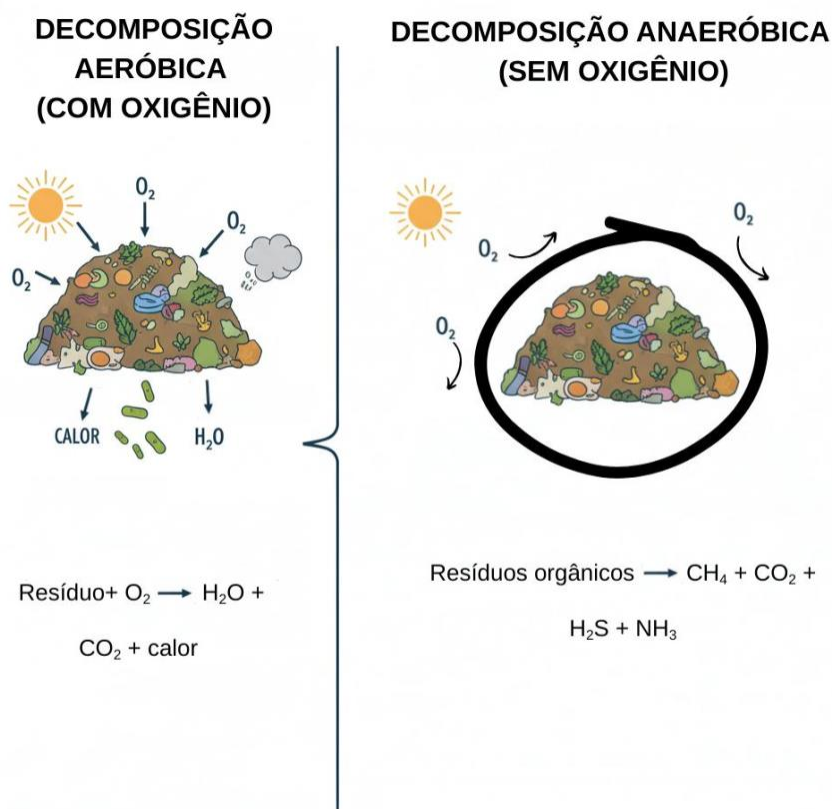
A análise foi desenvolvida de forma integrada e descritiva, buscando estabelecer conexões entre os aspectos químicos, ambientais e educacionais. Não foram realizadas coletas de dados primários, experimentos laboratoriais ou entrevistas, pois o foco do estudo está na sistematização do conhecimento abordado.

## **Resultados e Discussão**

### **Impactos Ambientais dos RSU com uma visão Química**

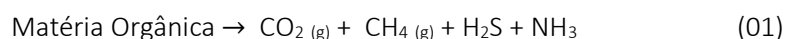
A composição química dos RSU é variada, refletindo o padrão de consumo e a diversidade de atividades humanas. Estudos indicam que cerca de 45,30% dos RSU no Brasil são compostos por resíduos orgânicos, 16,70% por plásticos, 10,40% por papel e papelão, 2,70% por vidro e 2,30% por metais, com o restante dividido entre têxteis, rejeitos e outros materiais (MMA, 2022). Essa diferença faz com que os processos químicos envolvidos na decomposição e degradação desses materiais sejam complexos e quando não tratados ou destinados de forma adequada, desencadeiam uma série de processos químicos que afetam diretamente a terra, a água e o ar (Christensen, 2011).

Durante a decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários, ocorrem reações bioquímicas anaeróbicas, como mostrada na Figura 02.

**Figura 02:** Tipos de decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários

**Fonte:** adaptado de Google Gemini, 2025

As reações bioquímicas anaeróbicas liberam gases como metano ( $CH_4$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ) e amônia ( $NH_3$ ), (Equação 01).



O  $CH_4$  é responsável por cerca de 25% das emissões globais de gases de efeito estufa, o que torna o manejo inadequado dos RSU, sendo também um problema climático e não apenas sanitário (UNEP, 2024). Outro aspecto relevante é a formação de lixiviados, soluções aquosas ricas em compostos orgânicos e inorgânicos que se infiltram no solo e podem atingir os lençóis freáticos. Esses lixiviados contêm macromateriais inorgânicos, metais pesados e outros compostos químicos detectáveis, que incluem borato ( $BO_3^{-3}$ ), bário (Ba), arseniato ( $AsO_4^{-3}$ ) (El-Saadony, M. T., et al., 2023). Além das transformações no solo e na água, o ar também é afetado. O processo de decomposição libera gases como o  $H_2S$ , que é um gás incolor e prejudicial à saúde humana em grandes concentrações (*California Air Resources Board*, n.d.).

Outro contaminante são os materiais inorgânicos contidos nos resíduos, como plásticos, papéis, metais e vidros. Os plásticos convencionais, formados por polímeros derivados do petróleo - como o polietileno (PE), o polipropileno (PP) e o poliestireno (PS) - apresentam ligações químicas extremamente estáveis (C-C e C-H), o que explica sua alta resistência à degradação natural. Esses polímeros quando expostos à luz solar e ao calor sofrem oxidação fotoquímica, as cadeias poliméricas sofrem cisões e liberam microplásticos e aditivos tóxicos, como ftalatos e

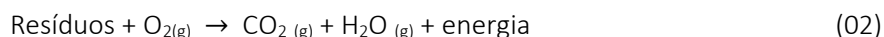
bisfenol-A (BPA). Esses fragmentos microscópicos são facilmente transportados por correntes de ar e água, atingindo ambientes aquáticos e integrando-se à cadeia alimentar (Zhang et al., 2024).

No vidro, cujo componente principal é o dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), possui estrutura amorfa e grande estabilidade química, podendo permanecer inalterado por séculos. Mas, o descarte inadequado de vidros especiais - como o vidro chumbo ( $\text{PbO}$ ) - pode liberar íons metálicos tóxicos para o ambiente. O mesmo ocorre com metais pesados presentes em pilhas, baterias e equipamentos eletrônicos, como níquel, cádmio, mercúrio e berílio, todos com alto potencial de bioacumulação e persistência ambiental (*U.S. Environmental Protection Agency*, n.d.). Isso mostra que de forma geral, a análise química dos impactos dos RSU evidencia as várias interações complexas que ocorrem entre matéria orgânica, metais, plásticos e o próprio ambiente. A liberação de gases, a contaminação de águas subterrâneas e a poluição por microplásticos são consequências diretas de transformações químicas que ocorrem após o descarte inadequado. Isso mostra que é importante compreender esses processos para propor soluções sustentáveis e educar estudantes e população geral quanto à importância do descarte e tratamento corretos, além da necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias sustentáveis para o tratamento dos RSU.

### Tratamentos Químicos e Tecnológicos aplicados aos RSU

No Brasil, cerca de 35% dos resíduos gerados ainda são destinados de forma inadequada (ABREMA, 2024), o que reforça a necessidade de ampliar os métodos de tratamento e reaproveitamento. Do ponto de vista químico, quatro processos se destacam: incineração, pirólise, reciclagem química e compostagem. Esses processos de forma direta ou indireta empregam princípios químicos como combustão, termodinâmica, cinética química, reações de decomposição, biodegradação e ciclos bioquímicos, para transformar ou reduzir o potencial poluidor dos materiais descartados.

A incineração de RSU é projetada para tratar resíduos domésticos tipicamente misturados e crus, além de certos resíduos industriais e comerciais, como vidro, metais, papel e resíduos de construção. Esse processo diminui o volume dos resíduos e permite o aproveitamento energético do calor gerado, esse fenômeno é representado pela equação 02:



O processo de incineração libera gases e pó tóxicos, como por exemplo, ácido clorídrico (HCl), ácido fluorídrico (HF) e dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), além de diversos componentes contendo mercúrio (Hg), dioxinas (grupo de compostos químicos tóxicos que compartilham certas estruturas químicas e características biológicas) ou dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ). Assim, para evitar riscos irreversíveis à saúde da população local e ao meio ambiente é necessário cumprir as normas internacionais de emissões e o monitoramento e registro das emissões (Mutz et al., 2017; *U.S. Environmental Protection Agency*, 2025).

Um outro exemplo de tratamento químico dos RSU é a pirólise, a qual ocorre na ausência de oxigênio e provoca a decomposição térmica dos resíduos, gerando três produtos principais: bio-óleo, a fração gasosa e o carvão. Assim, o bio-óleo é um líquido que apresenta alto poder calorífico e ausência de compostos sulfurados, o que aponta para a possibilidade de aplicação deste produto como biocombustível. O bio-óleo pode ser utilizado em substituição ao óleo diesel em caldeiras, ligantes na fabricação de briquetes siderúrgicos, emulsões para asfalto, aditivos de gasolina e óleo diesel. A fração gasosa obtida tem alto poder calorífico e é composta por hidrocarbonetos de até 6 carbonos, hidrogênio, CO e  $\text{CO}_2$ . O gás de síntese (CO e  $\text{H}_2$ ) é representativo na mistura e pode ser empregado em processos químicos. O carvão também pode

ser utilizado na remoção de metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas de efluentes, substituindo o carvão ativado comercial. Além disso, podem ser utilizados em caldeiras e fornos tubulares, fornos comerciais (pizzaria, padaria, por exemplo) e uso doméstico (lareiras e churrasqueiras) (Pedroxa et al., 2017). A reação genérica para esse processo é mostrada pela equação 03 a seguir:



Um outro aproveitamento energético dos RSU é a reciclagem química. Esta envolve a “desconstrução” das longas cadeias de moléculas que compõem os plásticos principalmente, gerando fragmentos menores chamados monômeros. Esses componentes são então reagrupados para dar origem a novos plásticos, insumos químicos ou combustíveis. A grande vantagem da reciclagem química é que os produtos originados apresentam qualidade similar à dos plásticos virgens. Nesse processo, as moléculas componentes do plástico não sofrem degradação significativa, o que permite preservar a estrutura física do material original, além de possibilitar o aproveitamento de diversos tipos de resíduos plásticos, em particular daqueles difíceis de reciclar de forma mecânica, como os produzidos pela mistura de materiais (Painel de Mudanças Climáticas, 2025).

A compostagem é um processo no qual se reproduzem condições ideais (de umidade, oxigênio e de nutrientes, especialmente carbono e nitrogênio) que favorece e acelera a degradação dos resíduos de forma segura, evitando assim a atração de vetores de doenças e patógenos. Assim, a criação dessas condições ideais favorece que uma diversidade grande de macro e micro-organismos (bactérias, fungos) aceleram a degradação dos resíduos, tendo como resultado final um material de cor e textura homogêneas, com características de solo e húmus, chamada composto orgânico. É um método simples, seguro e que garante um produto uniforme pronto para ser utilizado nos cultivos de plantas e que pode ser realizado em pequena (doméstica) e média escala (comunitária, institucional) ou grande escala (municipal, industrial), (Ministério do Meio Ambiente, Centro de Estudos e Promoção da Agricultura de Grupo, & Serviço Social do Comércio, 2017). Apesar de ser a alternativa mais sustentável para os resíduos orgânicos, a (ABREMA, 2024) indica que somente 300 mil toneladas de material foram recebidas em pátios ou usinas de compostagem no Brasil, o que é aproximadamente 0,4% dos RSU gerados no país inteiro. A reação representada pela equação 04, resume o processo de compostagem dos RSU.



A análise comparativa contida na Tabela 03, confirma que os métodos químicos e físico-químicos são necessários para transformar resíduos em insumos energéticos ou novos produtos, reduzindo assim os impactos ambientais. Embora desafios possam existir, a química exerce papel central na inovação de materiais e na otimização dos processos de tratamento dos RSU, consolidando-se como ciência necessária para uma transição ecológica, sustentável e bem estruturada.

**Quadro 03:** Comparativo entre métodos de tratamento químico dos RSU

Método	Tipo de Reação	Principal produto	Vantagens	Desvantagens
Incineração	Oxidação exotérmica	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, energia térmica e cinzas	Reduz volume de resíduos e gera energia	Libera gás e pó tóxicos
Pirólise	Decomposição térmica sem oxigênio	Gases, bio-óleo, carvão	Biocombustíveis; aproveitamento energético; produção de carvão	Necessidade de controle térmico
Reciclagem química	Quebra molecular	Monômeros, combustíveis, insumos químicos	Reutilização de plásticos	Alto custo operacional
Compostagem	Oxidação parcial aeróbia	Húmus, CO <sub>2</sub> , calor e vapor d'água	Sustentável e natural	Processo lento, restrito a orgânicos

**Fonte:** Adaptado de Mutz et al. (2017) e ABREMA (2024).

### O Papel da Química e da Educação na minimização dos impactos ambientais causados pelos RSU

A química contribui para reduzir a poluição pelos RSU, podendo ocorrer em múltiplas frentes, desde o desenvolvimento de novos materiais até a Educação Ambiental. No campo tecnológico, a pesquisa em polímeros biodegradáveis tem ganhado destaque, bem como o desenvolvimento de embalagens inteligentes e compostáveis (embalagens que se biodegradam em condições adequadas e ao mesmo tempo), com revestimentos naturais e indicadores de pH capazes de sinalizar a deterioração dos alimentos, exemplos são apresentados na Figura 03.

**Figura 03:** Imagens de embalagens inteligentes e compostáveis



**Fonte:** Pixabay, 2025.

No âmbito educativo, a integração entre a química e a educação ambiental constitui uma ferramenta pedagógica estratégica para formar cidadãos críticos e conscientes. Trabalhar os



conteúdos químicos - como reações de oxidação, decomposição e formação de compostos tóxicos - em atividades experimentais e projetos escolares fazem com que os estudantes compreendam a ligação direta entre os fenômenos químicos e os problemas ambientais reais presentes em sua localidade e no mundo (Aprígio et al., 2024).

Um exemplo prático é o projeto realizado com 206 alunos do ensino médio em Ubá-MG, que demonstrou que 1 litro de óleo de cozinha descartado incorretamente pode contaminar até 1 milhão de litros de água, entupir esgotos, impermeabilizar solos e gerar gases de efeito estufa. A pesquisa revelou que 45% dos estudantes descartam óleo em pias ou no lixo comum, 81% desconhecem os impactos ambientais e riscos à saúde associados, como a formação de peróxidos tóxicos durante a reutilização, enquanto 91% consomem óleo regularmente e 81% o reaproveitam de alguma forma. Essa abordagem interdisciplinar conecta-se à química verde ao transformar resíduos sólidos urbanos (RSU) em sabão por meio da saponificação — reação de triglicerídeos com NaOH que gera sais graxos, com propriedades hidrofílicas e hidrofóbicas, e glicerol, formando micelas (agregados de moléculas que possuem uma parte hidrofílica – que gosta de água – e uma parte hidrofóbica – que repele água) capazes de remover gorduras. Esse processo promove práticas limpas, uso de matérias-primas renováveis e economia circular, desde o design até o descarte, envolvendo atividades como elaboração de slides, debates e fabricação em sala, que aumentaram em 88% o interesse dos alunos por sustentabilidade (Dias, *et.al.* 2020).

Dessa forma, o ensino de química assume caráter interdisciplinar, contribuindo para o desenvolvimento da sustentabilidade e também da cidadania do estudante. Além disso, é possível incluir nesse tema as abordagens referentes a química verde, à qual propõe princípios que priorizam o uso de reagentes não tóxicos, a economia de átomos e a diminuição dos RSU durante os processos industriais e conscientização. Com isso é possível aplicar a química verde desde o design dos produtos até o descarte, orientando a criação de processos limpos, o uso de matérias-primas renováveis e o desenvolvimento de compostos biodegradáveis, contribuindo diretamente para a redução dos RSU (EPA, OCSPP, 2013). Essa experiência evidencia a importância da interdisciplinaridade entre Química, Educação Ambiental e Tecnologia, pois permite que conceitos científicos sejam compreendidos dentro de contextos reais, tornando a aprendizagem mais significativa. Ao relacionar teoria e prática, os estudantes conseguem perceber como o conhecimento químico pode influenciar diretamente o meio ambiente e a vida cotidiana, por exemplo, o estudo “Compostagem de resíduos sólidos urbanos: uma proposta para o ensino de Química Ambiental” relata a realização de uma oficina com alunos do Ensino Médio em que foi construída uma composteira usando resíduos sólidos urbanos. A prática de compostagem não apenas demonstrou os princípios químicos envolvidos na decomposição de matéria orgânica e no ciclo de nutrientes, mas também promoveu a conscientização ambiental e o protagonismo dos estudantes frente à questão do lixo e da sustentabilidade (Jesus *et. Al.*, 2024).

Dessa forma, a Química ultrapassa o papel de ciência de transformação da matéria e se torna um instrumento de transformação social, capaz de contribuir para a resolução de problemas concretos — como a geração, o tratamento e a destinação dos RSU. Ao promover práticas educativas transformadoras, baseadas em experimentação e sustentabilidade, é possível formar cidadãos críticos, conscientes e preparados para atuar de maneira sustentável frente à crise ambiental contemporânea.

## Conclusão

As leituras dos documentos mostraram que o gerenciamento inadequado dos RSU tem se mostrado um dos maiores desafios ambientais contemporâneos, sobretudo em países em desenvolvimento como o Brasil. Assim, a discussão que segue busca integrar a perspectiva química à ambiental e educacional, destacando a relevância da química como ciência



fundamental para compreender, reduzir e transformar a realidade dos RSU. Nesse contexto, a análise dos dados oriundos de relatórios técnicos, artigos científicos e documentos oficiais permite compreender como os RSU se tornaram um dos principais desafios ambientais da atualidade. Além de mostrar que essa problemática não se restringe apenas à quantidade dos RSU gerados, mas também à natureza química dos materiais descartados, aos processos de degradação que ocorrem no ambiente e às tecnologias empregadas para reduzir os impactos.

A crescente geração dos RSU evidencia a necessidade de uma conscientização através de uma abordagem integrada entre Química, tecnologia, educação e meio ambiente. A Química, mostra-se essencial para compreender e reduzir os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado dos RSU, além de oferecer soluções alternativas sustentáveis por meio de processos como reciclagem, pirólise e compostagem.

A integração entre Química e Educação Ambiental é essencial para formar cidadãos conscientes e promover práticas sustentáveis. Portanto, o enfrentamento do problema dos RSU requer tanto inovação científica quanto mudança de postura social, especialmente entre estudantes. Assim o ensino de Química se consolida como um instrumento de transformação ambiental e social, contribuindo para a construção de um futuro mais sustentável.

## Referências

American Chemical Society. (2025). **Examples of green chemistry & sustainable chemistry.**

<https://www.acs.org/green-chemistry-sustainability/what-is-green-chemistry/examples.html>

Aprígio, S. S. de O., Nascimento, M. V. L., Cantanhede, L. B., Cantanhede, S. C. da S., Trindade Júnior, O. C. da, Silva Barbosa, D. R. e, & Araújo, L. da S. (2024). Abordagem da educação ambiental no ensino de química: Uma análise a partir de artigos publicados na Revista Química Nova na Escola (QNEsc). **Química Nova**, 47(10). <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20240067>

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA). (2024). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. ABREMA.

Brasil. (1999). Lei nº 9.795, de 27 de abril de 1999. Dispõe sobre a educação ambiental, institui a Política Nacional de Educação Ambiental e dá outras providências. Diário Oficial da União.

[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9795.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9795.htm)

Brasil. (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União. [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm)

Brasil. Ministério do Desenvolvimento Regional. (2021). Roteiro para encerramento de lixões – Apoio para tomada de decisões. Brasília: MDR.

Brasil. Ministério da Educação. (2018). Base nacional comum curricular: Educação infantil e Ensino Fundamental. [https://www.gov.br/mec/pt-br/escola-em-tempo-integral/BNCC\\_EI\\_EF\\_110518\\_versaofinal.pdf](https://www.gov.br/mec/pt-br/escola-em-tempo-integral/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal.pdf)

California Air Resources Board. (n.d.). Hydrogen sulfide & health. <https://ww2.arb.ca.gov/resources/hydrogen-sulfide-and-health>

Christensen, T. H. (Ed.). (2011). Solid waste technology & management (Vol. 1). John Wiley & Sons.

Conselho Federal de Química, (2021, junho 25). O papel da Química na destinação correta de resíduos. <https://cfq.org.br/noticia/o-papel-da-quimica-na-destinacao-correta-de-residuos/>

Da Silva, W., & Filgueiras, C. (2023). O VIDRO E SUA IMPORTÂNCIA NA VIDA E NA QUÍMICA. Química Nova. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230033>

Dias, L. C., Silva, N. C. da, Patrício, P. da R., & Coutinho, T. de S. A. (2020). Prática educacional e ambiental no ensino de química para alunos do ensino médio: Reciclagem do óleo de cozinha e a produção de sabão. *Mediação: Educação e Humanidades*, 5(1).  
<https://revista.uemg.br/mediacao/article/view/4355>

Dixit, M., Gupta, G. K., Liu, H., & Shukla, P. (2019). Pulp and paper industry based pollutants, their health hazards and environmental risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.09.010>

Dos Santos, D. G., Aparecida Borges, A. P., Borges, C. de O., Marciano, E. da P., Brito, L. C. da C., Carneiro, G. M. B., Epoglou, A., & Nunes, S. M. T. (2012). A Química do Lixo: utilizando a contextualização no ensino de conceitos químicos. *Revista Brasileira De Pós-Graduação*, 8(2).  
<https://doi.org/10.21713/2358-2332.2012.v8.241>

El-Saadony, M. T., Saad, A. M., El-Wafai, N. A., Abou-Aly, H. E., Salem, H. M., Soliman, S. M., Abd El-Mageed, T. A., Elrys, A. S., Selim, S., Abd El-Hack, M. E., Kappachery, S., El-Tarabily, K. A., & AbuQamar, S. F. (2023). Hazardous wastes and management strategies of landfill leachates: A comprehensive review. *Environmental Technology & Innovation*, 30, Article 103150.  
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103150>

Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva (INCA). (2024). Metais pesados, câncer e os riscos ambientais. Ministério da Saúde.  
<https://ninho.inca.gov.br/jspui/handle/123456789/15363>

Jesus, C. F. A., Vilela, A. H. S., Trajano, E. S., Siqueira, J. C., & Silva, N. A. (2024). Compostagem de resíduos sólidos urbanos: uma proposta para o ensino de química ambiental. *Revista Interdisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão*, 4(2).  
<https://periodicos.ifg.edu.br/riepex/article/view/1987>

Menda, M. (2011, 4 de julho). O que são plásticos? Conselho Regional de Química de São Paulo.  
<https://crqsp.org.br/plasticos/>

Ministério do Meio Ambiente. (2022). Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Secretaria de Qualidade Ambiental.  
[https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-projetos-acoes-obras-atividades/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano\\_nacional\\_de\\_residuos\\_solidos-1.pdf&ved=2ahUKEwj12uT6oqWRAXVHqpUCHe8vEWQQFnoFCIEBEAE&usq=AOvVaw3M\\_yDLzXl6Md9wHHYyoLA](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.gov.br/mma/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programa-projetos-acoes-obras-atividades/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf&ved=2ahUKEwj12uT6oqWRAXVHqpUCHe8vEWQQFnoFCIEBEAE&usq=AOvVaw3M_yDLzXl6Md9wHHYyoLA)

Ministério do Meio Ambiente, Centro de Estudos e Promoção da Agricultura de Grupo, & Serviço Social do Comércio. (2017). Compostagem doméstica, comunitária e institucional de resíduos orgânicos: Manual de orientação. Ministério do Meio Ambiente.  
<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/protegeer/biblioteca/CompostagemDomsticaComunitariaeInstitucionaldeResduosOrgnicosMMA.pdf>

Mutz, D., Hengevoss, D., Hugl, C., & Gross, T. (2017). Opções em waste-to-energy na gestão de resíduos sólidos urbanos: Um guia para tomadores de decisão em países emergentes ou em desenvolvimento. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).  
<https://www.giz.de/de/downloads/GIZ%20WasteToEnergy%20Guidelines%202017.pdf>

New York State. (2012). Important Things to Know About Landfill Gas.  
[https://www.health.ny.gov/environmental/outdoors/air/landfill\\_gas.htm](https://www.health.ny.gov/environmental/outdoors/air/landfill_gas.htm)

Painel de Mudanças Climáticas. (2025). Reciclagem Química: alternativa para a valorização de resíduos plásticos. <https://paineldemudancasclimaticas.org.br/noticia/reciclagem-quimica>

Pedroxa, M. M., Gomes, M. C. F. de A., Paz, E. C. da S., Pedrosa, A. L., Viera, G. E. G., & Soares, J. E. M. (2017). APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM PROCESSO DE PIRÓLISE. *Revista Brasileira De Energias Renováveis*, 6(2).  
<https://doi.org/10.5380/rber.v6i2.46577>

Pixabay. (2025). Imagens de embalagens inteligentes e compostáveis. Pixabay.  
<https://pixabay.com/pt/images/search/embalagem%20sustent%c3%a1vel/>

Programa das Nações Unidas no Brasil. (2024, 28 de fevereiro). PNUMA: O mundo precisa superar a era do desperdício e transformar o lixo em recurso. <https://brasil.un.org/pt-br/261852-pnuma-o-mundo-precisa-superar-era-do-desperdício-e-transformar-o-lixo-em-recurso>

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). (2024). Resumo executivo: Panorama global do manejo de resíduos em 2024 – Para além de uma era de resíduos: Transformando lixo em recurso. Nairobi. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44992>

Secretaria do Meio Ambiente do Município de São Paulo. (2024, março). O que podemos fazer no nosso dia a dia para proteger os recursos naturais e reduzir o volume de lixo?  
<https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/2024/03/o-que-podemos-fazer-no-nosso-dia-a-dia-para-protetor-os-recursos-naturais-e-reduzir-o-volume-de-lixo/>

Senado Federal. (n.d.). Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Senado Federal.

United Nations Environment Programme (2024). Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! With a massive Gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments. Nairobi. <https://doi.org/10.59117/20.500>.

U.S. Environmental Protection Agency, Office of Chemical Safety and Pollution Prevention. (2013, February 12). Basics of green chemistry. <https://www.epa.gov/greenchemistry/basics-green-chemistry>

U.S. Environmental Protection Agency. (2025, January 18). Learn about dioxin. EPA.  
[https://www.epa.gov/dioxin/learn-about-dioxin?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.epa.gov/dioxin/learn-about-dioxin?utm_source=chatgpt.com)

U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). Requirements for Transboundary Shipments of Specific Wastes: Cathode Ray Tubes (CRTs). <https://www.epa.gov/hwgenerators/requirements-transboundary-shipments-specific-wastes>

Zhang, X., Yin, Z., Xiang, S., Yan, H., & Tian, H. (2024). Degradation of Polymer Materials in the Environment and Its Impact on the Health of Experimental Animals: **A Review**. *Polymers*, 16(19), 2807. <https://doi.org/10.3390/polym16192807>