



Lixo: desafios e compromissos

Pedro Sérgio Fadini e Almerinda Antonia Barbosa Fadini

Os resíduos gerados por aglomerações urbanas, processos produtivos e mesmo em estações de tratamento de esgoto são um grande problema, tanto pela quantidade quanto pela toxicidade de tais rejeitos. A solução para tal questão não depende apenas de atitudes governamentais ou decisões de empresas; deve ser fruto também do empenho de cada cidadão, que tem o poder de recusar produtos potencialmente impactantes, participar de organizações não-governamentais ou simplesmente segregar resíduos dentro de casa, facilitando assim processos de reciclagem. O conhecimento da questão do lixo é a única maneira de se iniciar um ciclo de decisões e atitudes que possam resultar em uma efetiva melhoria de nossa qualidade ambiental e de vida.

► lixo, sociedade, resíduos urbanos, tratamento de lixo, programa R3 ◀

Chamamos 'lixo' a uma grande diversidade de resíduos sólidos de diferentes procedências, dentre eles o resíduo sólido urbano gerado em nossas residências. A taxa de geração de resíduos sólidos urbanos está relacionada aos hábitos de consumo de cada cultura, onde se nota uma correlação estreita entre a produção de lixo e o poder econômico de uma dada população. O lixo faz parte da história do homem, já que a sua produção é inevitável. Para Teixeira e Bidone (1999), o lixo é definido de acordo com a conveniência e preferência de cada um. O IPT/CEMPRE (1995), define-o como restos das atividades humanas, consideradas pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis. Normalmente apresentam-se em estado sólido, semi-sólido ou semilíquido (com quantidade de líquido insuficiente para que possa fluir livremente). São também classificados como resíduos sólidos vários resíduos industriais, resíduos nucleares e lodo de esgoto desidratado, conforme aponta Mata-Alvarez *et al.* (2000).

O lixo sempre acompanhou a história do homem. Na Idade Média acumulava-se pelas ruas e imediações das cidades, provocando sérias epidemias e causando a morte de milhões

de pessoas (Branco, 1983). A partir da Revolução Industrial iniciou-se o processo de urbanização, provocando um êxodo do homem do campo para as cidades. Observou-se assim um vertiginoso crescimento populacional, favorecido também pelo avanço da medicina e conseqüente aumento da expectativa de vida. A partir de então, os impactos ambientais passaram a ter um grau de magnitude alto, devido aos mais diversos tipos de poluição, dentre eles a poluição gerada pelo lixo. O fato é que o lixo passou a ser encarado como um problema, o qual deveria ser combatido e escondido da população. A solução para o lixo naquele momento não foi encarada como algo complexo, pois bastava simplesmente afastá-lo, descartando-o em áreas mais distantes dos centros urbanos, denominados 'lixões'.

Nos dias atuais, com a maioria das pessoas vivendo nas cidades e com o avanço mundial da indústria provocando mudanças nos hábitos de consumo da população, vem-se gerando um lixo diferente em quantidade e diversidade. Até mesmo nas zonas rurais encontram-se frascos e sacos plásticos acumulando-se

devido a formas inadequadas de eliminação (IPT/CEMPRE, 1995). Para Bidone (1999), em um passado não muito distante a produção de resíduos era de algumas dezenas de quilos por habitante/ano; no entanto, hoje, países altamente industrializados como os Estados Unidos produzem mais de 700 kg/hab/ano. No Brasil, o valor médio verificado nas cidades mais populosas é da ordem de 180 kg/hab/ano.

A produção elevada de lixo norte-americano deve-se ao alto grau de industrialização e aos bens de consumo descartáveis produzidos e amplamente utilizados pela maioria da população. No caso do Brasil, a geração do lixo ainda é, em sua maioria, de

Países altamente industrializados como os Estados Unidos produzem mais de 700 kg/hab/ano. No Brasil, as cidades mais populosas produzem algo como 180 kg/hab/ano

procedência orgânica; contudo, nos últimos anos vem se incorporando o modo de consumo de países ricos, o que tem levado a uma intensificação do uso de produtos descartáveis.

Sem dúvida, a associação do crescimento populacional à intensa urbanização e às mudanças de consumo estão mudando o perfil do lixo brasileiro. Porém, essa 'modernidade' não está sendo acompanhada das medidas necessárias para dar ao lixo gerado um

destino adequado. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), realizada em 1989 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e editada em 1991 (IPT/CEMPRE, 1995), “o brasileiro convive com a maioria do lixo que produz. São 241.614 toneladas de lixo produzidas diariamente no país. Fica a céu aberto (lixão) 76% de todo esse lixo. Apenas 24% recebe tratamento mais adequado”.

Destinação final do lixo	(%)
Disposição a céu aberto	76
Aterro controlado	13
Aterro sanitário	10
Usina de compostagem	0,9
Incineração	0,1

Fonte: IBGE, 1991 (in: IPT/CEMPRE, 1995).

Dos 24% de tratamento considerado mais adequado, 13% é através de aterro controlado, o que ainda possibilita a contaminação do lençol freático. Mesmo os 10% de aterro sanitário não são eficiência e qualidade devido à necessidade constante de controle e manutenção, o que nem sempre acontece, mesmo porque são raros os



Figura 1: Vista do lixão de Indaiatuba-SP, em 1990. Foto: Acervo da Associação Ecológica Chico Mendes de Indaiatuba (AECHIN)



Figura 2: Vista do antigo lixão de Indaiatuba, hoje transformado em aterro sanitário. Foto: Acervo da Associação Ecológica Chico Mendes de Indaiatuba (AECHIN).

Lixão, aterros sanitários e aterros controlados

O lixão é uma mera disposição do lixo a céu aberto, sem nenhum critério sanitário de proteção ao ambiente, que possibilita o pleno acesso de vetores de doenças como moscas, mosquitos, baratas e ratos ao lixo. Segundo a ABNT/NBR-8849/85, um aterro controlado caracteriza-se pela disposição do lixo em local controlado, onde os resíduos sólidos recebem uma cobertura de solos ao final de cada jornada. Ao contrário dos aterros sanitários, os aterros controlados geralmente não possuem impermeabilização dos solos nem sistema de dispersão de chorume e gases, sendo comum nestes locais a contaminação de águas subterrâneas. (IPT/CEMPRE, 1995). As Figuras 1 e 2 apresentam imagens de um lixão e de um aterro sanitário, respectivamente.

aterros que operam convenientemente do ponto de vista ambiental (Figueiredo, 1995).

Para a maioria dos administradores o lixo é encarado como um problema e uma preocupação meramente higiênica. Porém, o problema maior são as medidas paliativas e impactantes adotadas, como a de afastar dos olhos e das narinas esse incômodo e apresentar uma falsa solução à população. Enquanto isso, na região receptora do lixo está o homem, no posto de separador de lixo, à espera da matéria-prima que possibilite a sua sobrevivência, convivendo com urubus, insetos, ratos e suscetível a doenças que através dele voltarão depois para os cen-

tros urbanos. A questão do lixo remete-nos a uma discussão sobre o modelo de desenvolvimento escolhido pelo país, cuja política se traduz na necessidade do aumento do consumo, favorecendo alguns e excluindo muitos. A opção por um crescimento meramente econômico, que nos coloca entre os países com os maiores PIBs mundiais, destoando do conceito de desenvolvimento, que deve ser acompanhado de melhorias sociais. O discurso adotado é que esse modelo industrial nos levará ao bloco dos países denominados ricos, e que para isso tem-se que investir em infra-estrutura, aumentando a oferta de combustíveis, de matérias-primas, de insumos pro-

dutivos e de eletricidade.

Sevá-Filho (1995) apresenta o questionamento pertinente ao fato: se com o aumento da demanda os recursos vão se tornando escassos, os investimentos vão se tornando maiores e a produção passa a provocar mais problemas ambientais. O certo não seria gastar menos, aproveitar melhor o que se produz, obter bens mais duráveis e então aproveitar cada vez mais o lixo assim produzido, e, enfim, alcançar-se uma geração cada vez menor de lixo, de poluição e de miséria?

Necessita-se repensar o tipo de desenvolvimento adotado no Brasil, no qual se valorizam os altos investimentos em produção sem acompanhamento e efetivação de planejamentos ambientais. A opção por esse tipo de desenvolvimento vem exigindo

uma alta demanda de recursos, estimulando a criação de uma sociedade altamente consumista e cujos resultados são a escassez e o esgotamento dos recursos naturais, a poluição do meio ambiente e um empobrecimento da população devido à falsa necessidade de produtos cada vez mais industrializados, além da continuidade da péssima distribuição da renda no país.

Lixo: uma questão de gerenciamento

Para o *Manual de Gerenciamento Integrado* (IPT/CEMPRE, 1995), gerenciar o lixo é adotar um conjunto articulado de ações normativas, operacionais, financeiras e de planejamento, com base em critérios sanitários, ambientais e econômicos para coletar, tratar e dispor o resíduo sólido municipal urbano. A execução de ações pla-

nejadas, de forma racional e integrada, leva ao gerenciamento adequado do lixo, assegurando saúde, bem-estar e economia de recursos públicos, além de ir ao encontro de um desejo maior que é a melhoria da qualidade de vida das gerações atuais e futuras.

Para o gerenciamento do lixo, é necessária a existência de um programa de educação ambiental que contemple a recusa de consumo de produtos com alta capacidade de geração de resíduos, redução do consumo, reuso e reciclagem (conforme será discutido no item “O Programa R3 – Redução de Consumo, Reutilização e Reciclagem do Lixo”).

A Tabela 1 apresenta a identificação das fontes e dos resíduos gerados e os responsáveis pela destinação final sanitariamente adequada.

Tabela 1: Geração e destino de resíduos.

Classificação por origem do lixo (<i>Manual de Gerenciamento Integrado</i> , IPT-CEMPRE, 1995)	Responsável pela destinação final
Domiciliar: Aquele originado da vida diária das residências, constituído por restos de alimentos (tais como cascas de frutas, verduras etc) produtos deteriorados, jornais e revistas, garrafas, embalagens em geral, papel higiênico, fraldas descartáveis e uma grande diversidade de outros itens. Contém, ainda, alguns resíduos que podem ser tóxicos.	Prefeitura
Comercial: Aquele originado dos diversos estabelecimentos comerciais e de serviços, tais como supermercados, estabelecimentos bancários, lojas, bares, restaurantes etc. O lixo desses estabelecimentos e serviços tem um forte componente de papel, plásticos, embalagens diversas e resíduos de asseio dos funcionários, tais como papel toalha, papel higiênico etc.	Prefeitura *
Público: São aqueles originados dos serviços: <ul style="list-style-type: none"> • de limpeza pública urbana, incluindo todos os resíduos de varrição das vias públicas, limpeza de praias, de galerias, de córregos e de terrenos, restos de podas de árvores etc.; • de limpeza de áreas de feiras livres, constituídos por restos vegetais diversos, embalagens etc. 	Prefeitura
Serviços de saúde e hospitalar: Constituem resíduos sépticos, ou seja, que contêm ou potencialmente podem conter germes patogênicos. São produzidos em serviços de saúde tais como hospitais, clínicas, laboratórios, farmácias, clínicas veterinárias, postos de saúde etc. São eles: agulhas, seringas, gaze, bandagens, algodão, órgãos e tecidos removidos, meios de cultura e animais usados em testes, sangue coagulado, luvas descartáveis, remédios com prazo de validade vencido, instrumentos de resina sintética, filmes fotográficos e raios X etc. Resíduos assépticos desses locais, constituídos por papéis, restos da preparação de alimentos, resíduos de limpeza geral (pó, cinza etc.) e outros materiais que não entram em contato direto com pacientes ou com os resíduos sépticos anteriormente descritos, são considerados domiciliares.	Gerador
Portos, aeroportos, terminais rodoviários e ferroviários: Constituem resíduos sépticos, ou seja, aqueles que contêm ou potencialmente podem conter germes patogênicos trazidos aos portos, terminais rodoviários e aeroportos. Basicamente, originam-se de material de higiene, asseio pessoal e restos de alimentação que podem veicular doenças provenientes de outras cidades, estados e países.	Gerador
Industrial: Aquele originado nas atividades dos diversos ramos da indústria metalúrgica, química, petroquímica, papelaria, alimentícia etc. O lixo industrial é bastante variado, podendo ser representado por cinza, lodo, óleo, resíduos alcalinos ou ácidos, plástico, papel, madeira, fibras, borracha, metais, escórias, vidro e cerâmica etc. Nessa categoria inclui-se a grande maioria do lixo considerado tóxico.	Gerador
Agrícola: Resíduos sólidos das atividades agrícolas e da pecuária, como embalagens de adubos, defensivos agrícolas, ração, restos de colheita etc. Em várias regiões do mundo, esses resíduos já constituem uma preocupação crescente, destacando-se as enormes quantidades de esterco animal geradas nas fazendas de pecuária intensiva. Também as embalagens de agroquímicos** diversos, em geral altamente tóxicos, têm sido alvo de legislação específica, definindo os cuidados na sua destinação final e, por vezes, co-responsabilizando a própria indústria fabricante desses produtos.	Gerador
Entulho: Resíduos da construção civil, como demolições e restos de obras, solos de escavações etc. O entulho é geralmente um material inerte, passível de reaproveitamento.	Gerador

(*) A prefeitura é co-responsável por pequenas quantidades de resíduos comerciais e entulhos (geralmente menos que 50 kg), e de acordo com a legislação municipal específica.

(**) Agroquímicos são produtos desenvolvidos pela indústria química com a finalidade de matar insetos, microorganismos e espécies de plantas que possam atrapalhar o desenvolvimento da cultura na qual se tem interesse. Nessa categoria enquadram-se os acaricidas, fungicidas, formicidas, matamatos e outros, cujos resíduos podem ser extremamente danosos ao consumidor dos alimentos cultivados nessas condições.

Tabela 2: Vantagens e desvantagens de diferentes destinações de resíduos.

Discriminação	Lixão	Aterro sanitário	Incinerador	Usina de compostagem
Definição	Local onde o lixo urbano ou industrial é acumulado de forma rústica, a céu aberto, sem qualquer tratamento. Em sua maioria são clandestinos	Processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos – doméstico e industrial – no solo impermeabilizado, com sistema de drenagem para o chorume	Local onde é feita a queima controlada do lixo inerte	Local onde a matéria orgânica é segregada e submetida a um tratamento que visa a obtenção do composto
Vantagem	No curto prazo, é o meio mais barato de todos, pois não implica em custos de tratamento nem controle	Solução mais econômica, pode ocupar áreas já degradadas, como antigas minerações	Propicia uma redução no volume de lixo; destrói a maioria do material orgânico e do material perigoso, que no aterro causa problemas; não necessita de áreas muito grandes; pode gerar energia através do calor	O composto originado pode vir a ser usado como adubo na agricultura ou em ração para animais, e poderá ser comercializado. Reduz a quantidade de resíduos a ser dispostos no aterro sanitário
Desvantagem	Contamina a água, o ar e o solo, pois a decomposição do lixo sem tratamento produz chorume, gases e favorece a proliferação de insetos (baratas, moscas), ratos e germes patológicos, que são vetores de doença	Tem vida útil curta; se não houver controle pode receber resíduos perigosos como lixo hospitalar e nuclear. Se não for feito com critérios de engenharia, pode causar os mesmos problemas do lixão; os materiais recicláveis não são aproveitados	É um sistema caro que necessita de manutenção rigorosa e constante. Pode lançar diversos gases poluentes e fuligem na atmosfera (dioxinas, furanos). Suas cinzas concentram substâncias tóxicas com potencial de contaminação do ambiente	Quando implantado com técnicas incorretas pode causar transtornos às áreas vizinhas, como mau cheiro e proliferação de insetos e roedores, produzindo compostos de baixa qualidade e contaminados com metais pesados, se houver falhas na separação

Adaptado de Gonçalves, 1997.

Todas as alternativas de tratamento de lixo apresentam vantagens e desvantagens, o que por si só já é uma boa justificativa para considerar a não geração como a melhor opção. Uma avaliação crítica das alternativas de destinação final de lixo é apresentada na Tabela 2.

A química e a biologia no aterro

Dentro do aterro sanitário, o resíduo sólido municipal sofre uma decomposição promovida por bactérias que metabolizam a matéria orgânica, produzindo dióxido de carbono e usando para isso alguma espécie química como receptor de elétrons. Tal processo pode ser classificado como um processo de respiração, no qual o agente oxidante que comumente atua como receptor de elétrons é o oxigênio atmosférico (O_2).

Como os aterros sanitários são cobertos com solo e são compactados com tratores, de modo a minimizar o acesso de vetores de doenças ao resíduo, o oxigênio atmosférico também encontra dificuldade em entrar em contato com o lixo e a sua concentração diminui até valores não significativos, à medida que a matéria orgânica é oxidada.

Mesmo na ausência de oxigênio, bactérias do tipo facultativas, que podem viver tanto em condições aeróbias (presença de oxigênio), quanto em condições anaeróbias (ausência de oxigênio), assim como as bactérias estritamente anaeróbias, promovem a degradação da matéria orgânica, usando para isso espécies receptoras de

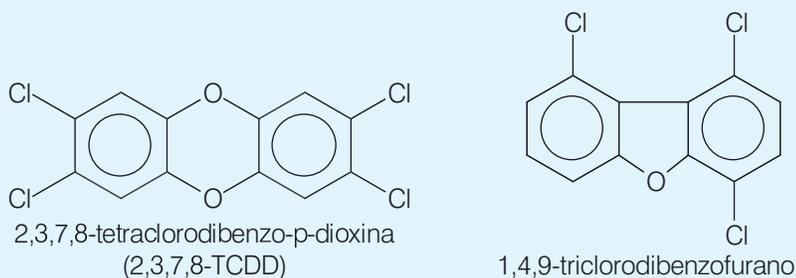
elétrons como o Mn(IV), nitrato (NO_3^-), Fe(III) e sulfato (SO_4^{2-}). Finalmente, na escassez destes, uma fração da matéria orgânica se reduz produzindo metano (CH_4), onde o carbono apresenta o seu menor número de oxidação possível (-4), enquanto parte da matéria orgânica, que transferiu elétrons para a formação do metano, é

Chorume: impacto ambiental associado à disposição inadequada de lixo

Chorume é o líquido que escoar de locais de disposição final de lixo. É resultado da umidade presente nos resíduos, da água gerada durante a decomposição dos mesmos e também das chuvas que percolam através da massa do material descartado. É um líquido com alto teor de matéria orgânica e que pode apresentar metais pesados provenientes da decomposição de embalagens metálicas e pilhas. A composição final do chorume é fruto do tipo de lixo depositado e do seu estado de degradação. Historicamente, os lixões têm sido construídos em vales, nas proximidades ou dentro de leitos de cursos d'água, o que torna o chorume um agente de comprometimento de recursos hídricos. Os lixões, por serem na verdade uma mera disposição de resíduos a céu aberto, são construídos sobre terrenos que permitem não apenas o escoamento do chorume, mas também a sua infiltração no solo, levando à contaminação das águas subterrâneas. Ao contrário dos lixões, os aterros sanitários, que recebem resíduo sólido municipal urbano (o lixo gerado em nossas casas), e os aterros industriais, que recebem resíduo sólido industrial, têm as suas construções pautadas em normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que prevê impermeabilização do terreno e o tratamento do chorume gerado. Poços de monitoração abertos nas proximidades do aterro permitem a avaliação constante da qualidade das águas subterrâneas e a tomada de decisões em caso de eventuais infiltrações.

Dioxinas e furanos: um risco em processos de incineração

Vários materiais, quando queimados, podem levar à formação de dioxinas. Mesmo quando realizados em incineradores liberam no meio ambiente várias substâncias congêneres da dioxina. Tais compostos são produzidos em baixas concentrações, como resíduos da queima de matéria orgânica em presença de produtos que contenham cloro. A produção de dioxinas pode ser evitada ou minimizada se forem empregadas altas temperaturas na incineração, visando assegurar a combustão completa dos resíduos. Como consequência de seu amplo espalhamento no meio ambiente, bem como de seu comportamento lipofílico (tendência em se dissolver em gorduras e não em meio aquoso), as dioxinas são biomagnificadas ao longo da cadeia alimentar, ou seja, como a eliminação de materiais lipossolúveis é mais lenta do que a dos hidrossolúveis, ocorre uma bioacumulação de dioxinas em cada organismo. Como os organismos do início da cadeia alimentar são presas dos organismos do topo (dentre eles o homem), tem-se um aumento da concentração do contaminante nos organismos predadores, que representam o topo da cadeia alimentar. Mais de 90% da exposição humana às dioxinas é atribuída aos alimentos que ingerimos, particularmente carne, peixe e produtos lácteos. Dioxinas e furanos (um grupo de compostos que lembra a dioxina em termos de estrutura) estão presentes em peixes e carnes, exibindo concentrações da ordem de dezenas a centenas de picogramas ($1 \text{ pg} = 10^{-12}$ grama) por grama de alimento. Em outras palavras, ocorrem em concentrações de parte por trilhão; ou seja, seria necessário consumir um milhão de toneladas de alimentos para ingerir alguns gramas de dioxinas ou furanos. No entanto, quantidades bem menores do que 1 grama e a exposição crônica a tais contaminantes podem causar sérios efeitos deletérios. Em estudos envolvendo animais, uma dose diária de 1 nanograma de 2,3,7,8-TCDD por quilograma de massa corpórea por dia tem sido suficiente para ocasionar o surgimento de câncer. Com base nesses estudos, o governo canadense fixou como limite máximo de exposição às dioxinas e furanos o valor de 0,010 ng/kg/dia, estabelecendo assim um fator de segurança de 100 vezes em relação ao estudo realizado. Embora os furanos não sejam compostos tão estudados quanto as dioxinas, acredita-se que ambas as classes exibam os mesmos padrões de toxicidade. Estruturas típicas de uma dioxina e de um furano são apresentadas a seguir:



Tais estruturas podem apresentar-se de diferentes formas, com maior ou menor número de átomos de cloro ligados aos anéis aromáticos. A molécula do 2,3,7,8 - TCDD é popularmente conhecida pelo nome 'dioxina' sendo a mais tóxica dos 75 isômeros de compostos clorados de dibenzo-p-dioxina existentes (Baird, 1995).

transformada em CO_2 , caracterizando a digestão anaeróbia do resíduo.

Na natureza os processos anaeróbios ocorrem comumente em ambientes onde a entrada de oxigênio é dificultada. Tais processos são algu-

mas vezes percebidos pelo cheiro desagradável que emanam, uma vez que a respiração que utiliza o SO_4^{2-} como receptor de elétrons produz H_2S , com seu característico cheiro de ovo podre.

A capacidade de oxidação de diferentes espécies receptoras de elétrons está associada ao ganho energético proveniente de cada reação, onde o oxigênio participa como a espécie química que pode propiciar a maior variação de energia livre associada, que é dada, numericamente, pela subtração do valor energético contido nos produtos do valor contido nos reagentes. Se esse resultado é negativo, é porque houve liberação de energia para o ambiente exterior, ou seja, os produtos encerram um conteúdo energético menor do que o dos reagentes. Essa energia liberada é utilizada pelos microorganismos que promovem a reação de modo a mantê-los vivos.

Quanto maior a quantidade de energia liberada, no caso de reações intermediadas por microorganismos, melhor é o processo do ponto de vista bioquímico, pois maior será a relação entre a energia obtida para a manutenção dos processos vitais e a quantidade de substrato metabolizado.

Uma vez dentro do aterro, a matéria orgânica não está imediatamente pronta para transformar-se em metano e dióxido de carbono. Condições ambientais adequadas de pH e temperatura têm um importante efeito sobre a sobrevivência e o crescimento dos microorganismos. Geralmente a otimização do crescimento ocorre dentro de uma estreita faixa de valores de pH e temperatura. Geralmente o pH ótimo para o crescimento de microorganismos situa-se entre 6,5 e 7,5, embora danos às suas estruturas celulares só sejam observados em valores de pH superiores a 9,0 e inferiores a 4,5. De acordo com a temperatura em que as bactérias atuam de modo mais eficiente na degradação da matéria orgânica, elas são classificadas como criofílicas (-10 - 30 °C), mesofílicas (20 - 50 °C) e termofílicas (45 - 75 °C).

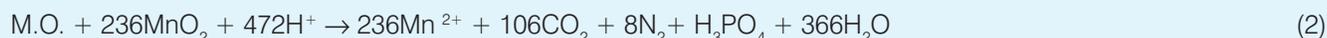
Na decomposição anaeróbia de resíduos, muitos microorganismos trabalham em conjunto para converter a porção orgânica de tais resíduos em produtos estáveis. Em uma primeira fase, denominada hidrólise, um grupo de microorganismos é responsável por hidrolisar material orgânico polimérico, lipídios e outras moléculas de alto peso molecular, transformando-os em

Receptores de elétrons em processos respiratórios

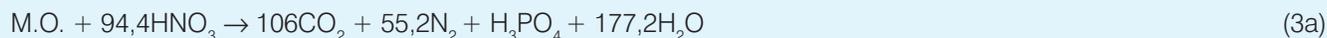
São apresentadas a seguir algumas reações de processos respiratórios onde se assume como matéria orgânica (M.O.) a fórmula geral $[(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}(\text{H}_3\text{PO}_4)]$ e que todas as reações ocorrem à mesma temperatura. Diferentes receptores de elétrons propiciam diferentes rendimentos energéticos. Observa-se o maior ganho quando o O_2 é reduzido (Froelich *et al.*, 1979).



$$\Delta G^\circ = -3.190 \text{ kJ/mol}$$



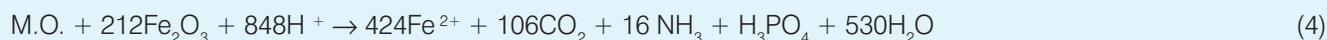
$$\Delta G^\circ = -3.090; -3.050; -2.920 \text{ kJ/mol (dependendo da forma alotrópica do MnO}_2)$$



$$\Delta G^\circ = -3.030 \text{ kJ/mol}$$



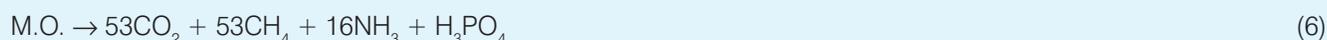
$$\Delta G^\circ = -2.750 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta G^\circ = -1.410 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta G^\circ = -380 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta G^\circ = -350 \text{ kJ/mol}$$

Neste sistema ilustrativo, supõe-se a matéria orgânica como o único doador de elétrons e O_2 , NO_3^- , Fe_2O_3 , MnO_2 e SO_4^{2-} como únicos receptores. A energia livre de Gibbs para cada reação foi calculada para as condições normais de temperatura e assumiu-se o valor do pH como constante e igual a 7,0. A ordem de liberação de energia apresentada não implica, necessariamente, que o receptor de elétrons que propicia maior liberação de energia tenha que ser exaurido para que outro receptor de elétrons, envolvido em uma reação com menor variação de energia livre, participe da oxidação da matéria orgânica. O valor da variação de energia livre indica apenas a ordem de preferência termodinâmica, onde alguns processos podem ocorrer de modo simultâneo. Um dos produtos de redução ocasionados pela matéria orgânica na respiração de sulfato, o sulfeto (reação 5), apresenta a capacidade de imobilizar metais na forma de sulfetos metálicos, sendo este um fator determinante da biodisponibilidade e toxicidade de metais (Morse *et al.*, 1987).

açúcares, aminoácidos, peptídios e compostos relacionados, em um processo no qual a atuação de enzimas é de fundamental importância. A segunda fase contempla a transformação dos produtos da primeira etapa em ácidos graxos de cadeia longa, ácidos propiônico e butírico, além de uma parcela de ácidos fórmico e acético. Nessa etapa, a razão entre as formas protonada e desprotonada dos ácidos será fruto da constante de ionização de cada ácido envolvido e do pH do meio, sendo comum a referência na literatura, por exemplo, tanto ao ácido acético quanto ao seu ânion acetato. A terceira etapa, denominada comumente de acidogênese, envolve a transformação dos ácidos de cadeias que contêm mais do que três átomos de carbono em ácidos acético e fómi-

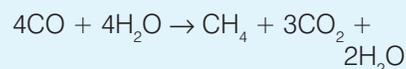
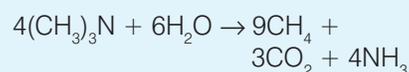
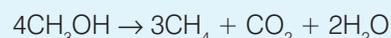
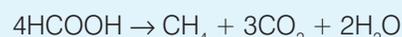
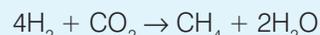
co. Finalmente, um quarto grupo de bactérias, denominadas metanogênicas, converte os produtos da terceira etapa em metano (Tchobanoglous *et al.*, 1993; Vazoller, 1999).

A descrição do processo em quatro etapas é uma simplificação dos complexos mecanismos envolvidos no metabolismo anaeróbio. Acredita-se que mais de 130 espécies de diferentes microorganismos podem coexistir dentro de um mesmo reator (Soubes, 1994), dentre eles espécies de bactérias, fungos, leveduras e actinomicetos (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Os produtos apontados em cada etapa são predominantes, porém não os únicos a serem obtidos. Uma ilustração dessa complexidade é demonstrada pelo fato de que não são apenas os ácidos fórmico e acético os substratos que levam

à formação de metano (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

De uma forma simplificada, as etapas da digestão anaeróbia de resíduos podem ser vistas conforme mostrado na Figura 3.

Formação de metano a partir de diferentes substratos



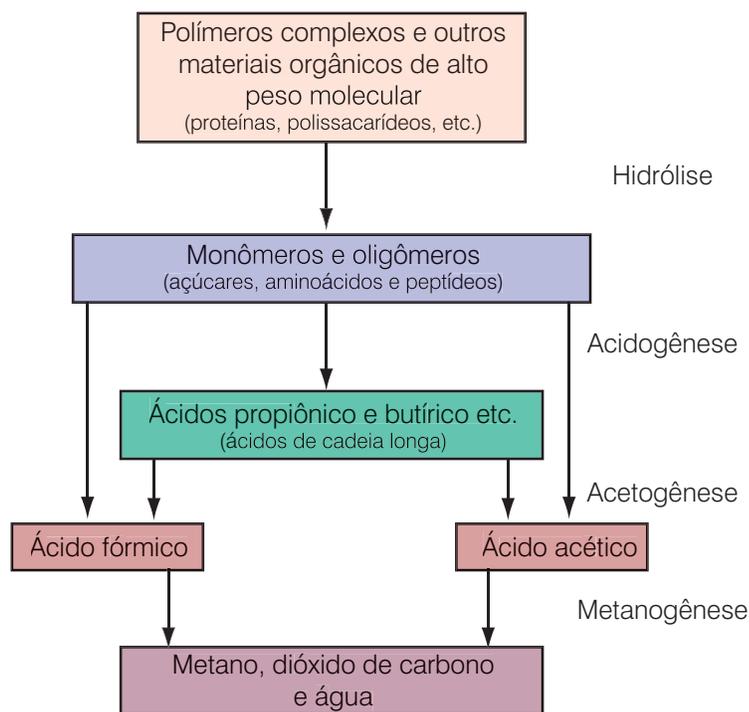


Figura 3: Etapas da digestão anaeróbia (Adaptada de Vazoller, 1999).

Uma das características da digestão anaeróbia é a obtenção de um produto, o gás metano, que encerra um conteúdo energético relativamente alto, que pode ser utilizado para movimentar veículos, gerar eletricidade ou propiciar aquecimento. Tal conteúdo energético é fruto da baixa liberação de energia observada durante a metanogênese, energia conservada no produto, conforme pode ser inferido a partir da comparação entre as reações 1 e 6.

A viabilidade econômica do uso do metano como fonte de energia é ainda questionável devido à presença no gás de impurezas como o H_2S , que pode ocasionar corrosão em motores de combustão interna. Em aterros sanitários, os gases de compostos reduzidos são queimados, minimizando-se assim o mau cheiro do H_2S e o efeito estufa relacionado à emissão de metano, que apresenta um potencial de absorção de radiação infravermelha e aquecimento da atmosfera muito maior do que o observado para o CO_2 . Como efeito dessa queima ocorre também a emissão de SO_2 , o que representa um incremento na incidência de chuvas ácidas.

Compostagem de resíduos

O processo aeróbio pode ser empregado no tratamento de resíduos sólidos municipais urbanos de origem orgânica e também no tratamento de tais resíduos dispostos conjuntamente com lodo gerado em estações de tratamento de esgotos domésticos. Tais processos envolvem a preparação de pilhas na forma de leiras, nas quais se injeta ar por meio de tubos perfurados introduzidos no resíduo, ou então por meio do constante revolvimento do material submetido à compostagem.

Durante o processo aeróbio da compostagem, atua uma sucessão de microorganismos facultativos e aeróbios estritos. Na fase inicial, bactérias mesofílicas são observadas em maior proporção e à medida que a temperatura vai aumentando, as termofílicas começam a predominar. Fungos termofílicos aparecem depois de 5 a 10 dias e, no estágio final do processo, conhecido como período de cura, actinomicetos e fungos filamentosos começam a surgir. Como nem todo resíduo é rico em microorganismos, alguns tipos de materiais, como papéis, exigem a adição de um inóculo apropriado para iniciar-se o processo. Tal

inóculo pode ser resíduo de outras fontes ou de lodo de esgoto.

Compostos obtidos a partir de resíduos de diferentes origens podem ser misturados de modo a se obterem razões C/N ótimas, que permitam sua incorporação ao solo, como fertilizantes. Contudo, o uso de compostos como fertilizantes exige um cuidadoso estudo das características microbiológicas e ecotoxicológicas, bem como a escolha da cultura que será desenvolvida, antes da tomada da decisão de aplicação em solos.

A relação carbono/nitrogênio

Um fator crítico para a compostagem de resíduos é a relação C/N, cuja faixa ótima é de 20-25 para 1. Espécies químicas que contêm nitrogênio atuam como nutrientes nos processos de degradação da matéria orgânica. Resíduos pobres em nitrogênio, como jornais, que apresentam relação C/N de aproximadamente 980, devem ser misturados a outros resíduos mais ricos em nitrogênio. Em processos de compostagem, a relação C/N comumente diminui ao longo do tempo, pois o carbono é eliminado para a atmosfera na forma de CO_2 e/ou CH_4 . O aumento da quantidade relativa de nitrogênio, um importante nutriente para culturas agrícolas, torna o composto potencialmente utilizável como fertilizante agrícola, desde que observados outros parâmetros sanitários de interesse, como presença de organismos patogênicos, metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas.

O Programa R3 – redução de consumo, reutilização e reciclagem do lixo

A Agenda 21 trata, em seu capítulo 21, do 'manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com os esgotos' e propõe, no item 21.4, a utilização de um manejo integrado nas questões relacionadas aos resíduos, conforme segue:

- O manejo ambientalmente saudável dos resíduos deve ir além do simples depósito ou aproveitamento por métodos seguros dos resíduos gerados, buscando resolver a causa fundamental do problema e procurando mudar os padrões não sustentáveis de

Efeitos causados por alguns metais pesados ao homem

Elemento	Onde é encontrado	Efeitos
Mercúrio	<ul style="list-style-type: none">equipamentos e aparelhos elétricos de medidaprodutos farmacêuticoslâmpadas de néon, fluorescentes e de arco de mercúriointerruptoresbaterias/pilhastintasantissépticosfungicidastermômetros	<ul style="list-style-type: none">distúrbios renaisdistúrbios neurológicosefeitos mutagênicosalterações no metabolismodeficiências nos órgãos sensoriais
Cádmio	<ul style="list-style-type: none">baterias/pilhasplásticosligas metálicaspigmentospapéisresíduos de galvanoplastia	<ul style="list-style-type: none">dores reumáticas e miálgicasdistúrbios metabólicos levando à osteoporosedisfunção renal
Chumbo	<ul style="list-style-type: none">tintas, como as de sinalização de ruaimpermeabilizantesanticorrosivoscerâmicavidroplásticosinseticidasembalagenspilhas	<ul style="list-style-type: none">perda de memóriador de cabeçairritabilidadetremores musculareslentidão de raciocínioalucinaçãoanemiadepressãoparalisia

(Fonte: IPT-CEMPRE, 1995)

produção e consumo. Isso implica na utilização do conceito de manejo integrado do ciclo vital, o qual apresenta oportunidade única de conciliar o desenvolvimento com a proteção do meio ambiente.

Em seu item 21.5, aponta a necessidade de ações e formulação de objetivos centrando-se em quatro principais áreas de programas relacionados com os resíduos, a saber:

- redução ao mínimo dos resíduos;
- aumento ao máximo da reutilização e reciclagem ambientalmente saudáveis dos resíduos;
- promoção do depósito e tratamento ambientalmente saudáveis dos resíduos;
- ampliação do alcance dos serviços que se ocupam dos resíduos.

E, no item 21.6, alerta para as quatro áreas de programas estarem correlacionadas e se apoiando mutuamente, devendo estar integradas a fim de

constituir uma estrutura ampla e ambientalmente saudável para o manejo dos resíduos sólidos municipais. A combinação de atividades e a importância que se dá a cada uma dessas quatro áreas variarão segundo as condições sócio-econômicas e físicas locais, as taxas de produção de resíduos e a composição destes. Todos os setores da sociedade devem participar em todas as áreas de programas.

Nesse contexto, serão apresentadas as várias opções para a disposição final e o tratamento de resíduos sólidos, sejam estes de origem doméstica, hospitalar, agrícola ou industrial, envolvendo a aplicação dos 3 Rs – *redução* do consumo e desperdício, *reutilização* de resíduos e *reciclagem*.

O verdadeiro desafio pertinente à questão do lixo, seja ele de que natureza for, diz respeito a como não gerar tal lixo ou, ao menos, minimizar a geração

Em alguns casos, pode ser viável a queima em incineradores com rigoroso controle da qualidade dos gases emitidos e dos resíduos remanescentes, ou ainda a combustão em fornos de fabricantes de cimento. Alternativas como compostagem aeróbia e disposição em aterros sanitários ou industriais também são viáveis. Contudo, inúmeros impactos ambientais poderiam ser associados a cada uma das opções de tratamento citadas ou a qualquer outra que venha a ser criada.

O verdadeiro desafio pertinente à questão do lixo, seja ele de que natureza for, diz respeito a como não gerar tal lixo ou, ao menos, minimizar a geração. Havendo essa opção, assume-se que o melhor seria não gerar lixo, mas essa é uma alternativa nem sempre viável, uma vez que o modelo de vida adotado globalmente é pautado na produção e no consumo, que têm como consequência a geração de resíduos. Contudo, com alguma reflexão e auxílio de programas de educação ambiental, podemos nos habituar enquanto consumidores a exercer determinados tipos de escolha de embalagens de produtos, rejeitando por exemplo aqueles que possuem invólucros múltiplos e às vezes desnecessários e dando preferência a embalagens retornáveis em detrimento às descartáveis, bem como minimizando desperdícios dentro de casa. A **recusa** de tais produtos com múltiplas embalagens representa a consolidação de um quarto e importante 'R' ao programa, que força a indústria a ter uma

atitude ambientalmente responsável por pressão do mercado consumidor. Atitudes como essas, segundo um recente estudo realizado por Teixeira (1999), podem **reduzir** em até 50% a quantidade de resíduos sólidos domésticos encaminhados aos aterros. Uma vez minimizada a geração, parte-se para a avaliação do **reuso** dos resíduos, que se nas nossas casas apresenta um leque de opções relativamente limitado, pode apresentar um

maior número de opções em relação a resíduos industriais e agrícolas.

A terceira etapa da minimização do descarte envolve a **reciclagem**, que é facilmente explicada pela já difundida teoria de que resíduo nada mais é do que um material não adequadamente localizado no espaço e no tempo. Ou seja, aquilo que é considerado um resíduo hoje pode não sê-lo amanhã, assim como o que uma determinada pessoa ou grupo de pessoas classifica como resíduo pode ser matéria-prima para outra. O entendimento da necessidade da segregação na fonte, ou seja, da separação adequada dos tipos de resíduos por seus geradores, é essencial para facilitar o trabalho do reciclador, assim como a colocação do material reciclado no mercado, enquanto matéria-prima ou produto acabado.

Reciclagem

É o resultado de uma série de atividades através das quais materiais que se tornariam lixo ou estão no lixo são desviados, sendo coletados, separados e processados para uso como matéria-prima na manufatura de bens, feitos anteriormente apenas com matéria-prima virgem.

Benefícios da reciclagem

- diminui a quantidade de lixo a ser aterrado (conseqüentemente aumenta a vida útil dos aterros sanitários);
- preserva os recursos naturais;
- economiza energia;
- diminui a poluição do ar e das águas;
- gera empregos, através da criação de indústrias recicladoras.

A reciclagem, no entanto, não pode ser vista como a principal solução para o lixo. É uma atividade econômica que deve ser encarada como um elemento dentro de um conjunto de soluções. Estas são integradas no gerenciamento do lixo, já que nem todos os materiais são técnica ou

economicamente recicláveis. A separação de materiais do lixo aumenta a oferta de materiais recicláveis. Entretanto, se não houver demanda de produtos reciclados por parte da sociedade o processo é interrompido, os materiais abarrotam os depósitos e, por fim, são aterrados ou incinerados como rejeitos (IPT-CEMPRE, 1995).

Apenas quando estiverem esgotadas as alternativas de redução de consumo, reuso e reciclagem é que se deve fazer a opção pelo tratamento, levando-se em consideração o ônus ambiental de cada alternativa que possa vir a ser adotada. O mesmo raciocínio vale para o setor produtivo, onde a busca por tecnologias menos impactantes, chamadas também 'limpas', é essencial para a manutenção da qualidade de vida no planeta. Tais tecnologias devem ser avaliadas dentro de uma ótica do ciclo de vida dos produtos, ou seja, levando-se em conta todos os impactos ambientais envolvidos desde a primeira etapa de obtenção da matéria-prima, passando-se pela fabricação, utilização, alternativa de reuso, reciclagem e alternativas de disposição final do produto quando o mesmo não se prestar mais a fim algum.

Agenda 21 e desenvolvimento sustentável

A Agenda 21 é um documento que surgiu a partir de discussões conduzidas durante a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, a ECO-92, realizada no Rio de Janeiro entre 3 e 14 de junho de 1992. É um programa de ação abrangente, a ser implementado pelos governos, agências de desenvolvimento, organizações das Nações Unidas e grupos setoriais

independentes em cada área onde a atividade humana afeta o meio ambiente, visando atingir o chamado desenvolvimento sustentável. Segundo a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, "O desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras satisfazerem suas próprias necessidades"

Dentro de tal enfoque, considera-se que:

- as necessidades dos pobres são prioritárias;
- por desenvolvimento entende-se o progresso humano, em todas as suas facetas – cultural, econômica, social e política –, que deve ser possível em todos os países;
- essa sustentabilidade não é rígida; antes, deve admitir a possibilidade de mudanças, às quais se reage com adaptações;
- está implícita uma preocupação com a igualdade social entre as pessoas de uma mesma geração e entre as pessoas de uma geração e de outra.

A Agenda 21 é um documento de 700 páginas que se subdividem em 40 capítulos. A versão em português do documento completo foi publicada no Diário Oficial da União como suplemento ao número 146, do dia 2 de agosto de 1994.

Cooperativas de catadores

A formação de associações e cooperativas de catadores de lixo representa a alternativa de saída do homem dos lixões e o resgate da sua condição de cidadão, com direito a benefícios sociais, educação para os filhos, autonomia administrativa e possibilidade de ascensão social. A cooperativa deve oferecer aos seus membros assistência jurídica, cursos de aperfeiçoamento e acesso ao lazer/esporte, desenvolvendo no catador criticidade e maturidade para tomar posição nas decisões dentro da cooperativa e até uma

A aparente utopia de um meio ambiente que concilie desenvolvimento associado a sustentabilidade ambiental, qualidade de vida e igualdade social só será alcançada com muita reflexão, boa vontade e esforços pessoal e comunitário

visão política sobre o seu país e o mundo em que vive.

A aparente utopia de um meio ambiente que concilie desenvolvimento associado a sustentabilidade ambiental, qualidade de vida e igualdade social só será alcançada

com muita reflexão, boa vontade, esforços pessoal e comunitário, disposição e ações políticas aliadas ao fundamental entendimento de que o planeta como um todo é afetado por cada atitude isolada.

Pedro Sérgio Fadini, graduado em química pela

UFSCar, mestre em engenharia em recursos hídricos e saneamento e doutor em química ambiental, ambos pela UNICAMP, é professor na PUC-Campinas. **Almerinda Antonia Barbosa Fadini**, graduada em geografia pela PUC-Campinas, mestre em geociências e meio ambiente e doutoranda em geografia, ambos pela UNESP de Rio Claro, é professora na Universidade São Francisco, em Bragança Paulista.

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos: NBR-8849/85*. São Paulo, 1985.

BAIRD, C. *Environmental chemistry*. New York: W.H. Freeman and Company, 1995.

BIDONE, F.R.A. Introdução. Em Bidone, F.R.A. (organizador). *Metodologias e técnicas de minimização, reciclagem e reutilização de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999.

BRANCO, S.M. *Poluição: A morte de nossos rios*. São Paulo: ASCETESB, 1983.

FIGUEIREDO, P.J.M. *A sociedade do lixo*. Piracicaba: Editora Hemus, 2 ed., 1995.

FROELICH, P.N.; KLINKHAMMER, G.P.; BENDER, M.L.; LUEDTKE, N.A.; HEATH, G.R.; CULLEN, D.; DAUPHIN, P.; HAMMOND, D. e HARTMAN, B. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, n. 43, p. 1075-1090, 1979.

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa nacional de saneamento básico*, PNSB, 1989. São Paulo, 1991. Apud IPT/CEMPRE, *Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado* – 1 ed.: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo: Publicação IPT 2163, 1995.

GONÇALVES, C.L. *Definindo a questão do lixo urbano. Consumo, lixo e meio ambiente*, Edição Especial, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 1997.

IPT/CEMPRE, *Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado*. 1 ed.: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Publicação IPT 2163, 1995.

MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S. e LLABRÉS, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Biore-source Technol.*, n. 74, p. 3-16, 2000.

MORSE, J.W.; MILLERO, F.J. e CORNWELL, J.C. The chemistry of the hydrogen sulfide and iron sulfide systems in natural waters. *Earth Science Reviews*, n. 24, p. 1-42, 1987.

SEVÁ-FILHO, A.O. *Lixo é o progresso sem solução?* Em Figueiredo, P.J.M. A

Sociedade do lixo. Piracicaba: Editora Hemus, 2 ed., 1995.

SOUBES, M. Microbiologia de la digestión anaerobia. *Anais do Seminario Latinoamericano de Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales*, Montevideo, 1994.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H. e VIGIL, S. *Integrated solid waste management*. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1993.

TEIXEIRA E.N. Redução na fonte de resíduos sólidos: Embalagens e matéria orgânica. Em Bidone, F.R.A. (org.). *Metodologias e técnicas de minimização, reciclagem e reutilização de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999.

TEIXEIRA, E.N e BIDONE, F.R.A. Conceitos básicos. Bidone, F.R.A. (org.). *Metodologias e técnicas de minimização, reciclagem e reutilização de resíduos sólidos urbanos*. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999.

VAZOLLER, R.F. *Microbiologia e saneamento ambiental* <http://www.bdt.org.br/~marinez/padct.bio/cap9/3/rosana.html>, 1999.

Alguns sítios sobre Agenda 21, redução de uso, reciclagem, reuso e catadores de lixo

www.bdt.org.br/publicacoes/politica/agenda21/

A base de dados da Fundação André Tosello de Pesquisas e Tecnologia apresenta a íntegra da agenda 21, em português.

www.matrix.com.br/peixe/

Trata-se de um Instituto Virtual de Educação para Reciclagem. Discute temas relacionados ao lixo, principalmente sobre catadores de lixo, Redução, Reutilização e Reciclagem.

www.cityalpha.com.br/regiao8.htm

Este site apresenta o lixão de Carapicuíba-SP, considerado pela CETESB como um dos três piores do Estado de São Paulo.

www.curitiba.pr.gov.br/agencia/especiais/material02.html

Apresentação do Programa de Reciclagem desenvolvido pela Prefeitura Municipal de Curitiba-PR.

www.curitiba.pr.gov.br/servicos/SMLP/compralixo.html

Apresenta o Programa Compra Lixo, implantado pela Prefeitura Municipal de

Curitiba, no qual envolve a comunidade, através da criação de associações de moradores de bairro.

www.projekte.org/meioambiente99/tema03/rodrigues/text.html

Trata-se da apresentação do Projeto Lixo e Cidadania na Região Metropolitana de Belo Horizonte desenvolvido pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) e o envolvimento de instituições como Associação de Catadores, Prefeituras de municípios envolvidos e UNICEF.

www.recicloteca.org.br/quem_recebe.htm

Apresenta um relação bem ampla das pessoas e instituições que recebem ou compram diversos materiais recicláveis dos estados da Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Pernambuco, Rio de Janeiro e São Paulo – capital e interior.

www.clin.rj.gov.br/programa.htm

Apresenta os programas sociais desenvolvidos pela Companhia de Limpeza de Niterói (CLIN), preocupada com as iniciativas de cunho social que são desenvolvidas por empresas e comunidade.

www.cempre.org.br/links.html

Um site rico em informações e vínculos sobre a questão do lixo. O endereço citado neste espaço abre vários vínculos de associações de reciclagem e bancos que financiam programas relacionados ao meio ambiente.

www.latasa.com.br/recicla.htm

Apresenta o Centro de Reciclagem de Latas de alumínio, cujos projetos envolvem os temas Projeto Escola e Disk Lata. Informa também os endereços dos Centros de Reciclagem da Latasa.

www.cetesb.sp.gov.br/InformacoesAmbientais/inventario_residuos/inventario.htm

Apresenta uma série de vínculos sobre lixo, e a possibilidade de baixar o Inventário de Resíduos formulado pela CETESB, que discute de forma integrada os aspectos técnicos e sociais envolvidos na questão do lixo.

<http://cecae.usp.br/recicla/3rs.htm>

Trata-se de um canal com o projeto USP Recicla, o qual discute o programa dos R3s e informa os meios de contato com cooperativas de catadores e empresas de reciclagem.