



Modelo de estimativa dos custos em aterros sanitários para apoio no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos

Dr. Eng. de Minas Raul Oliveira Neto¹

Prof. Dr. Eng. de Minas Carlos Otávio Petter²

¹ Prof. Substituto do Depto. de Eng. Minas da UFRGS e Consultor ambiental da Minerar Consultoria e Projetos. (raul.oneto@uol.com.br)

² Prof. Titular do Depto. de Eng. de Minas e do PPGEM/UFRGS.

Resumo

O gerenciamento de resíduos municipais é um tema que vem se tornando cada vez mais importante no contexto das preocupações mundiais dos governos, e teve um considerável desenvolvimento na última década. Porém, muito pouco é divulgado em termos dos custos de implantação e operação sobre aterros, existindo uma lacuna a se preencher, que subsidie estudos técnico-econômicos de apoio a decisão dos gestores do setor. O objetivo principal do presente trabalho é a concepção de modelos a serem utilizados como ferramentas de trabalho neste sentido, aplicadas aos estudos de engenharia econômica denominados de “*quick evaluations*”. Foram realizadas análises de regressão ou correlação “custo x capacidade do aterro”, em caráter univariável e multivariável, a partir de estudo investigativo de banco de dados obtidos no Brasil e comparados com outros países. São apresentados os modelos resultantes com testes de validação atingindo-se um nível de erro aceitável para estudos a este nível de detalhamento. Todos estes aspectos tornam o estudo uma importante contribuição ao setor.

Palavras-chave: Aterros sanitário. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Custos.

Área Temática: Resíduos Sólidos.

1 Introdução

A questão dos resíduos sólidos e seu gerenciamento esta cada vez mais se revestindo de fundamental importância no contexto do desenvolvimento sustentável de um país. Principalmente em um país como o Brasil, onde se coleta cerca de 230 mil t de resíduos sólidos diariamente, sendo que destes, cerca de 55% são resíduos domiciliares, segundo Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – PNSB – realizada em 2000 (IBGE, 2000). A geração “per capita” teve um acréscimo de 120% só para a região sudeste de 1998 a 2000, onde o índice era de 0,89 kg/hab/dia e passou para 1,96 kg/hab/dia. Dados mais atualizados, entre 2000 e 2004, já indicam que no Brasil se geram 162.000 t/dia de resíduos domiciliares, resultando em um índice de geração “*per capita*” de 0,9 kg/hab/dia (CALDERONI, 2005).

A situação se torna ainda mais complexa quando se conclui que apenas 2% desta geração de resíduos foram destinados à reciclagem, segundo o mesmo PNSB de 2000, e, evidentemente o restante foi destinado aos depósitos do tipo lixões, aterros controlados e aterros sanitários. Nos Estados Unidos, por exemplo, com uma taxa de geração de 2,5 kg/hab/dia, 18% são reciclados, e em torno de 60% são destinados aos aterros (ALEMU, 2001).

Ainda quanto à situação no Brasil, dos 5.507 municípios brasileiros, 63,6% usavam os “lixões” como forma de destino final, de acordo com o Atlas de Saneamento do IBGE divulgado no Rio de Janeiro, sendo uma forma inadequada de armazenar os dejetos ou resíduos, pois contaminam os rios e o solo. O aterro sanitário, o modo mais indicado de



depositar os resíduos, era utilizado por apenas 13,8% dos municípios brasileiros, segundo a mesma publicação.

O que também se observa é que há uma carência muito grande de dados econômicos mais precisos, que auxiliem nos estudos desta questão, principalmente no que tange ao direcionamento de verbas e equacionamento das alternativas disponíveis. Muito pouco é divulgado sobre os custos reais de implantação e operação em aterros sanitários para as condições brasileiras, e a literatura técnica é omissa sobre o tema (REICHERT, 1998).

Existem limitações ou condicionantes que entravam a otimização do gerenciamento dos aterros e levam à busca de soluções, seja quanto ao aperfeiçoamento das metodologias empregadas nos próprios aterros, seja na fuga ou no desvio destes para outras tecnologias de destinação final. As principais são as seguintes (CALDERONI, 2003):

1. *Aumento dos custos operacionais por tonelada*, devido às exigências técnicas cada vez mais severas por parte dos órgãos de controle;
2. *Aumento do volume de lixo ou resíduos*, que vem apresentando crescimento significativo, como por exemplo, no município de São Paulo que, no período de um ano, entre 1995 e 1996, teve um acréscimo no volume total descarregado nos aterros em 10%, ou ainda, o acréscimo de 120% em apenas dois anos na região sudeste, conforme demonstrou a pesquisa do IBGE realizada em 2000;
3. *São cada vez mais escassas as áreas disponíveis para a implantação*, já que, as condicionantes ou parâmetros da legislação são cada vez mais restritivos e os custos com transporte são limitadores;

A complexidade do tema fica demonstrada em estudos como os realizados entre os anos de 2000 e 2004 onde a taxa de crescimento da geração de resíduos domésticos no Brasil foi de 8,22% ao ano, ou seja, muito superior às taxas de crescimento da população e da economia, de 1,3% e 2,8% ao ano, respectivamente (CALDERONI, 2005).

No exterior, há que se destacar o exemplo da União Européia, que passa por uma transformação significativa em termos de GRSU (Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos), motivada pela conhecida “Diretiva Européia 75/442/CEE”. Esta legislação forçou os países membros a redirecionarem seus esforços na busca de alternativas para a destinação dos RSU (Resíduos Sólidos Urbanos), já que determinou que a partir de junho de 2005 a destinação aos aterros sanitários direta deveria terminar, ou seja, o resíduo deveria passar por todos os tipos de tratamentos prévios, restando uma fração mínima não aproveitável que então teria este fim.

Destaca-se o caráter prático do presente trabalho com possibilidade de aplicação imediata principalmente no âmbito dos gestores municipais responsáveis pelo destino final dos resíduos sólidos urbanos, embasando valores condicionantes de licitações públicas.

2 Objetivos

- a) Identificar as fases e os componentes para uma estruturação de custos para aterros sanitários;
- b) Pesquisar e compor banco de dados de custos na gestão de aterros sanitários, tanto do Brasil como do Exterior;
- c) Pesquisar e analisar os fatores ou parâmetros que influenciam nos valores dos custos com aterros sanitários, em nível de estudo de pré-viabilidade;
- d) Usar técnicas para análise de dados e estimação para gerar modelos.

3 Etapas e metodologias empregadas no desenvolvimento do trabalho

O trabalho foi conduzido adotando-se as seguintes etapas:

1. Coleta de dados;
2. Tratamento dos dados;



3. Diagnóstico e organização;
4. Geração dos modelos;
5. Validação da consistência do modelo;
6. Adaptação informática do modelo.

A *coleta dos dados* foi feita em municípios previamente selecionados, seguindo-se os critérios da existência do aterro sanitário implantado e em operação (licenciado pelo órgão ambiental) e do porte do aterro em função da capacidade diária de recebimento dos resíduos (t/h), a partir de uma definição de pequeno, médio e grande porte.

O *tratamento dos dados* dos custos consistiu na organização dos mesmos em tabelas comparativas, utilização de uma mesma base monetária (dólar americano) e atualização dos valores.

O *diagnóstico* foi feito através de uma *análise crítica dos dados* coletados, sobre a ótica da consistência e coerência dos mesmos, detectando-se a necessidade de alguma correção nas etapas anteriores, sendo após procedida a organização em planilhas de cálculo.

Quanto à *geração dos modelos*, duas modalidades foram concebidas, ou seja, uma em nível de uma variável independente, e outra em nível multivariável, ou seja, mais de uma variável. Para a análise univariável, este estudo tomou por base modelo criado para o setor de mineração, o Modelo de O'Hara, onde são feitas análises das correlações das variáveis de "custo" com o parâmetro de produção "toneladas por hora". Este modelo vem sendo utilizado há muito tempo, no mundo inteiro, na análise de custos e investimentos em estudos de pré-viabilidade para projetos de exploração mineral. Para isto empregaram-se programas de tratamento estatístico de dados, para determinação da melhor equação matemática de correlação gerando gráficos ilustrativos das curvas de correlação. No caso multivariável, adotou-se também a teoria da análise estatística de regressão, porém com o auxílio do programa computacional denominado *UNSCRAMBLER*, o qual se baseia na teoria da *Análise de Componentes Principais – PCA* e na *Análise da Correlação dos Mínimos Quadrados – PLS*.

Para *validação da consistência do modelo*, ou seja, testar se o modelo satisfaz a premissa do nível de erro aceitável estabelecido para o estudo, foram comparados os resultados com dados reais dos bancos de dados pesquisados e com dados recentes que estão sendo divulgados nos informes do setor.

A partir das análises apresentadas e dos resultados obtidos foi então *desenvolvida uma adaptação do modelo em um programa computacional*, para tornar mais fácil e direta a aplicação final pelos futuros usuários.

4 Modelo Univariável de estimação de custos em aterros sanitários

A proposta de modelo de estimação de custos de investimentos (implantação) e de operação para projetos de aterros sanitários esta dentro do objetivo inicial de desenvolvimento do mesmo através do ajustamento de curvas aos dados de "custo – capacidade", disponibilizados na pesquisa, e adaptados a fase de pré-viabilidade. Dentro deste contexto se enquadram o tipo de estimação por "ordem de grandeza" (estágio de projeto de estudo conceitual e preliminar), e a técnica de estimação por "ajustamento exponencial" que considera o "efeito escala". Desta forma a proposta se enquadra dentro do conceito das "*quick evaluations*", ou avaliações rápidas para estudos de análise e tomada de decisões em nível de projeto preliminar. O nível ou grau de precisão buscado para os resultados do modelo gerado, dentro do cenário e objetivos expostos, está na faixa de -30% a +50%.

As equações do modelo univariável foram obtidas através de correlações tendo-se como variável independente a capacidade de recebimento diário de resíduos do aterro (Cap) e como variáveis dependentes ou de respostas, os custos. Os bancos de dados foram escolhidos dentro do critério de melhor detalhamento já que decompõe os custos de investimento e de operação em custos parciais ou componentes, e por terem a maior confiabilidade conforme



descrito na análise crítica do capítulo precedente. Esta decomposição é uma necessidade também para poder desenvolver convenientemente um modelo de estimação de custos pela técnica de ajuste “custo x capacidade” de modo a diminuir as incertezas que são maiores quanto maior for a generalização dos dados.

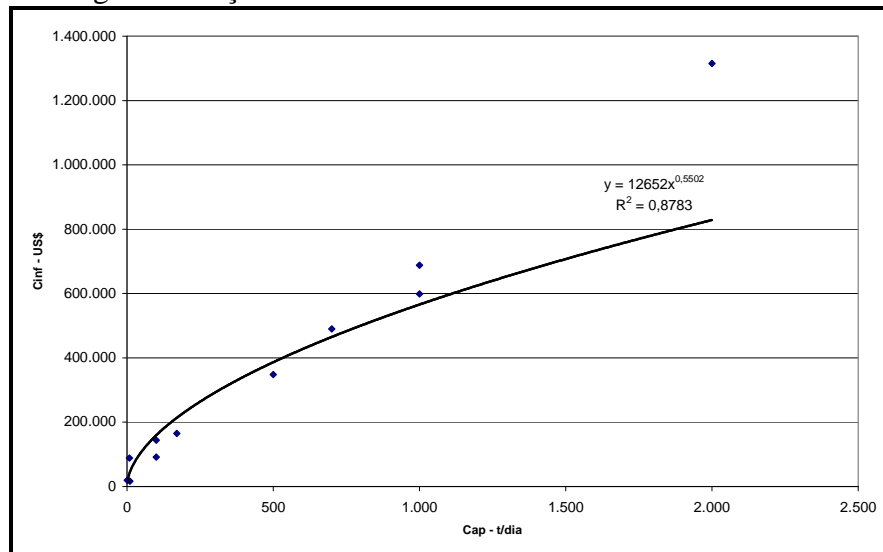


Figura 01 – Exemplo de Gráfico de correlação utilizado - ajuste *Cinf* (custo com infra-estrutura- US\$) x *Cap*(capacidade do aterro sanitário- t/dia);

5 Modelo Multivariável para estimação de custos em aterro sanitários

Tendo em vista uma complementação ao modelo univariável e dar ao modelo como um todo uma abrangência maior, agregando um universo de dados mais completo e a possibilidade da influência de outras variáveis sobre os custo que não somente a variável “capacidade”, é que foi gerado o modelo multivariável elaborado com auxílio da ferramenta computacional denominada Unscrambler já descrita na revisão bibliográfica.

Para o desenvolvimento do modelo multivariável, inicialmente procedeu-se a análise dos *Principals Components Analysis – PCAs (Unscrambler)*, para verificação da relação das variáveis e a importância de cada uma na “identificação do fenômeno”, ou do modelo.

6 Adaptação informática dos modelos e testes de validação

6.1 – Adaptação Informática - Software

A adaptação informática dos modelos de estimação gerados foi concebida de modo bem compacto e de simples acesso pelo usuário, tornando mais rápido o entendimento e a visualização dos resultados. Desta forma fica facilitada a execução de quantas forem as estimações que se deseja realizar com agilidade e rapidez, o que vai ao encontro do objetivo das “*quick evaluations*”.

Já na tela inicial do programa é possível visualizar todos os cálculos disponíveis, permitindo o rápido acesso as janelas, separadamente, ou seja:

- Estimação de custo “Detalhado de Implantação”, que corresponde ao modelo univariável “custo (US\$) x capacidade do aterro sanitário (t/dia)”;
- Estimação de custo “Detalhado de Operação”, que corresponde ao modelo univariável “custo (US\$) x capacidade do aterro sanitário (t/dia)”;
- Estimação de custo “Totais”, que corresponde ao modelo multivariável “custo (US\$) x capacidade do aterro sanitário (t/dia) e tipo do tratamento do lixiviado”;
- Estimação do custo com “Transporte”, que corresponde ao modelo de cálculo dos custos de transporte do resíduo ao aterro;



- e) Estimação do custo com “Fechamento”, que corresponde ao modelo de estimação de custos globais após o encerramento do aterro sanitário.

Na parte superior da tela o programa permite inserir o título da simulação que o usuário deseja para seu controle posterior de comparação de resultados testados. Logo abaixo aparecem os campos de entrada para os dados iniciais que o programa utiliza em todos os cálculos das estimações, e que são dois basicamente, ou seja, a “População” do município em número de habitantes e a “Capacidade” do aterro em t/dia. Não há necessidade de se ter em mãos os dois dados, sendo que inserindo apenas um dos dois o programa irá executar as simulações e fornecer os resultados. Se para um determinado município só se conhecer a população estimada para o mesmo pode-se obter a capacidade diária média que o aterro sanitário deve ter. Esta correlação entre “população e capacidade do aterro” esta baseada nos dados obtidos das pesquisas realizadas pelo IBGE e pela CETESB.

O programa permite também que o usuário faça as modificações nos resultados dos valores de custo estimados, podendo ajustá-los de acordo com seu interesse, seu objetivo na estimação ou também de acordo com sua experiência, tornando mais particular ou específico as suas simulações. Dentro de todas as janelas os resultados são fornecidos em US\$ / ano e em US\$ / t de resíduo, com exceção dos custos de transporte que são fornecidos somente em US\$ / t e de fechamento que são em US\$ / t e US\$ / m².

Quanto aos custos com transporte o programa permite simulações de acordo com a distância do município até o aterro e do tipo ou capacidade do caminhão de transporte a ser utilizado, que pode ser de pequeno porte (15m³) ou de grande porte (40m³), porém isto é a critério do usuário de acordo com seu interesse.

6.1.1 Exemplo de simulação para custos detalhados de implantação (modelo univariável)

A Figura 02 ilustra o resultado da aplicação do modelo para uma simulação para o caso de Jundiaí/SP, onde se obtêm os valores dos custos detalhados de implantação para Estudos Iniciais – Cinf, Infra Estrutura de Apoio – Cinf, Preparação – Cpr, e Segurança de Proteção Ambiental – Camb, e o correspondente CI – custo total de implantação ou de investimento para o caso testado. Para os custos citados o Software também fornece os respectivos custos unitários por tonelagem de resíduo a ser disposto no aterro sanitário.

	Valores Estimados (US\$/ano)	Valores Usuário (US\$/ano)	Valores em US\$/t
Estudos Iniciais	35.821,42	35.821,42	0,1
Infra Estrutura de Apoio	159.426,01	159.426,01	0,44
Preparação	641.709,42	641.709,42	1,76
Segurança e Prot. Ambiental	34.765,03	34.765,03	0,1
Custo Total de Implantação	871.721,89	871.721,89	2,39

Figura 02 - Tela resultante da simulação para os custos detalhados de implantação (modelo univariável);



6.1.2 Exemplo de simulação para custos totais (modelo multivariável)

A Figura 03 ilustra o resultado da aplicação do modelo para uma simulação para o caso de Porto Alegre/RS, onde se obtêm os valores dos custos totais, ou seja, custos de implantação (CI) somados ao custos de operação (CO) para o caso de tratamento a nível terciário do lixiviado (TT). Para os custos citados o Software também fornece os respectivos custos unitários por tonelagem de resíduo a ser disposto no aterro sanitário.

	Valores Estimados (US\$/ano)	Valores Usuário (US\$/ano)	Valores em US\$/t
Implantação ou Construção	10.967.527,92	10.967.527,92	2,61
Operação ou Disposição dos Resíduos	2.800.940,63	2.800.940,63	6,67
Custos totais	13.768.468,54	13.768.468,54	9,29

Valores considerando a participação dos níveis de tratamento do lixiviado

☒ Tratamento Primário ☒ Tratamento Secundário ☒ Tratamento Terciário

Figura 03 - Tela resultante da simulação para os custos totais com tratamento do lixiviado a nível terciário (modelo multivariável);

6.2 Testes de validação do modelo aplicando o “Software”

A validação consiste nas comparações entre dados considerados como “reais” e os “respectivos valores obtidos através da aplicação do modelo desenvolvido”.

Alguns dos testes de validação estão apresentados a seguir na tabela 01 e figura 04, onde se apresenta a comparação dos resultados do modelo em relação a dados divulgados pela pesquisa do SNIS – Sistema Nacional de Informações de Saneamento (SNIS, 2005), Ministério das Cidades, e específica ao tema do saneamento e gestão de resíduos sólidos urbanos que vem sendo atualizada ano a ano. Portanto, os dados têm um grau de confiabilidade satisfatório para o objetivo de “testagem” do modelo. Neste caso se dispõe de três tipos de dados ou de variáveis integrantes do modelo, ou seja:

- custo total, CT em US\$/t de resíduo;
- existência ou não de instalação de recuperação de biogás para geração de energia (BG);
- tipo de tratamento do lixiviado (TLx).



1º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 29 a 31 de Outubro de 2008

município	t resid./ano	t res./dia	CT R\$/t (2004)	CT US\$/t(2007)	BG (biogás)	TLx (trat.Lixiviado)	CT US\$/t MODELO	% MODELO - SNIS
1. Anápolis	62395	170,95	20,80	10,26	0	1	11,54	12,53
2. Caxias do Sul	86400	236,71	20,00	15,96	0	2	16,49	3,29
3. Curitiba	640799	1755,61	11,23	8,96	0	2	7,32	-18,32
4. Dourado	3404	9,33	50,17	40,04	0	2	61,19	52,81
5. Duque de Caxias	2016063	5523,46	5,16	4,12	1	2	4,60	11,74
6. Feira de Santana	107644	294,92	19,49	15,56	0	3	16,12	3,61
7. Goiânia	387258	1060,98	14,98	11,96	0	2	8,98	-24,91
8. João Pessoa	271472	743,76	14,16	11,30	0	2	10,37	-8,27
9. Nova Lima	15945	43,68	25,89	20,66	0	2	32,71	58,30
10. Ribeirão Preto	139174	381,30	10,95	8,74	0	3	14,52	66,19
11. Rio de Janeiro	1041592	2853,68	12,90	10,30	1	2	6,01	-41,60
12. Salvador	896364	2455,79	26,88	21,45	0	3	6,83	-68,17
13. Santo André	181686	497,77	19,77	15,78	0	2	12,20	-22,69
14. Santo Antônio Jesus	21380	58,58	25,00	19,95	0	2	29,04	45,55
15. São Paulo – Band.	1430563	3919,35	23,34	18,63	1	3	5,65	-69,66
16. Serra	72511	198,66	20,04	15,99	0	2	17,70	10,67
17. Uberlândia	112343	307,79	19,28	15,39	0	3	14,82	-3,67

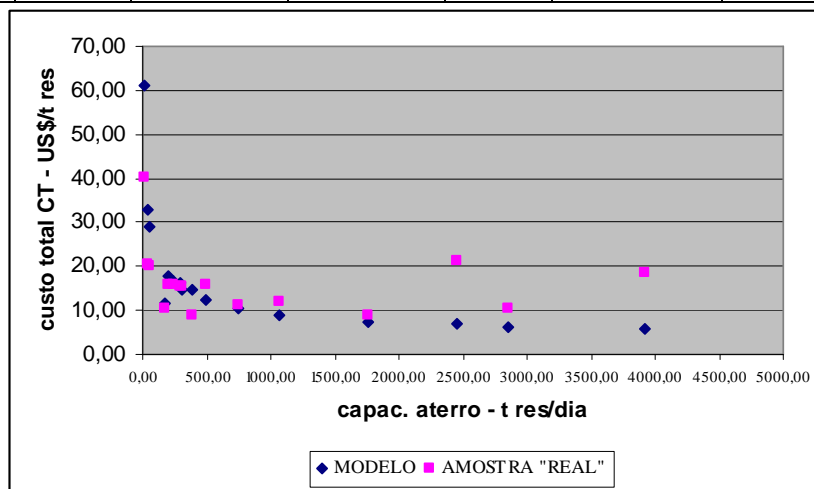


Figura 04 - Gráfico de dispersão comparativo entre os valores da pesquisa “SNIS” (amostra “real”) e os do modelo.

Tabela 01 - Teste de validação do modelo em comparação com dados divulgados pela pesquisa do SNIS.

7 Conclusões

1. Os aterros sanitários apresentam uma estrutura de custos com componentes bem definidos, podendo ser generalizada para todos os portes ou tamanhos de acordo com a capacidade diária de recebimento dos resíduos, com duas fases bem distintas, inicial ou de construção e a de operação durante sua vida útil.

2. As técnicas de análise e estimação de dados adotadas se adequaram muito bem ao caso em estudo, com ênfase ao “ajuste exponencial, devido ao efeito escala que ficou claramente evidenciado para o caso dos aterros sanitários”.

3. Na validação do modelo há que se dar especial ênfase às seguintes conclusões obtidas nos resultados:



- a. Os dados apresentados como “reais” para efeito de comparação com os do “modelo” são fidedignos porém podem conter alguma imperfeição decorrente do atual momento que vive o setor analisado;
 - b. Todos os resultados ficaram abaixo do limite de precisão ou de erro superior, de +50%;
 - c. Com relação ao limite inferior, de -30%, os resultados indicaram que para o caso dos aterros sanitários pode ser aceito uma extrapolação para - 40%, resultando então em um ajuste para o intervalo admissível de precisão para estudos em fase de escopo ou de pré-viabilidade, ficando entre - 40% e + 50%.
4. As vantagens e aplicações principais do modelo no contexto da gestão dos resíduos sólidos municipais são:
- a. Embasar preços limites para os editais de licitações públicas lançados pelas prefeituras, evitando desperdício de dinheiro público;
 - b. Embasar linhas de financiamento e subsídios emitidos pelos governos a níveis municipais, estaduais e federais;
 - c. Auxílio ao estabelecimento de taxas municipais de “lixo” cobradas da população;
 - d. Definição dos custos a serem compartilhados entre os municípios na formação de consórcios;
 - e. Definição dos custos envolvidos nas PPP (parcerias público privadas);
 - f. Possibilidade de adaptação do modelo no *software* de rápida e fácil utilização.

Toda esta gama de aplicações práticas vai ao encontro do objetivo de auxiliar o desenvolvimento e otimização de aterros sanitários como forma de contribuir a um melhor planejamento da gestão integrada dos resíduos sólidos municipais.

Referências

- ALEMU, C. **La bonne élève de l'Union Européene**. Label France, dez. 2001.
- CALDERONI, S. **Os Bilhões Perdidos no Lixo**. 4. edição – São Paulo: Humanitas Editora / FFLCH / USP, 2003, 346 p.
- CALDERONI, S. **A tecnologia da incineração na gestão de resíduos sólidos**. 1º Simpósio Brasileiro de Incineração – UPAN. Porto Alegre, dezembro de 2005.
- IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia Econômica, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB**. 2000.
- KOUSHKI P.A., AL-DUAIJ U. & AL-GHIMLAS W. **Collection and transportation cost of household solid waste in Kuwait**. Waste Management n. 24, 2004, pp. 957-964.
- REICHERT, G.A & REIS, J.C.F. **Custos de Implantação e Operação Unitário – Estudo de Caso: Aterro da Extrema, Porto Alegre, RS**. II Simpósio Internacional da Qualidade Ambiental, Porto Alegre, 1998.
- RIERA, P. & GARCÍA, L., **Análisis económico de la gestión de residuos urbanos**. XXIII Reunión de Estudios Regionales, Valencia, 18-21 noviembre 1997.
- SNIS, **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos**. PMSS. Ministério das Cidades, Brasília, 2005, 350 p.
<http://www.snis.gov.br>
- THORPE, S. G. **Estimating the Costs of Solid Waste Disposal is Messy Business**.
<http://www.scirus.com>, 2003.