

Avaliação Ecotoxicológica de Lixiviados de Dois Aterros Sanitários de Grande Porte e de um Lixão Desativado Localizados na Região Metropolitana do Rio de Janeiro

Caroline Almeida Teixeira
UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, carolineteixeira@live.com

Fernanda de Oliveira Mury França
UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, nana.mury@gmail.com

Elisabeth Ritter
UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, ritter.uerj@gmail.com

Daniele Maia Bila
UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, danielebilauerj@gmail.com

RESUMO: Tanto lixões como aterros sanitários geram lixiviado resultante da decomposição da matéria orgânica e a infiltração das águas de chuva nas camadas de solo e resíduos que compõe o aterro. As altas concentrações de compostos orgânicos, nitrogênio amoniacal e cloretos, além de outros compostos solúveis conferem ao lixiviado um grande potencial tóxico, fazendo necessário que além de sua caracterização físico-química também sejam necessários ensaios ecotoxicológicos que possam mensurar o impacto desse efluente no ecossistema natural do corpo receptor e áreas adjacentes assim como no solo do aterro. A toxicidade do lixiviado de dois aterros sanitários de grande porte e de um lixão desativado foi avaliada através de ensaios de toxicidade de quatro organismos-teste: *Alivibrio Fischeri* (bactéria luminescente), *Lactuca sativa L.* (semente de alface), *Daphnia similis* (microcrustáceo) e *Danio rerio* (peixe). A *Lactuca sativa L.* foi utilizada para avaliar o potencial tóxico do lixiviado no solo. Os organismos apresentaram alta sensibilidade ao lixiviado, sendo que a amostra do efluente tratado obteve a menor toxicidade para a maioria dos organismos. Observou-se também que os testes em solo obtiveram um valor de CE50 maior do que os testes realizados em meio líquido.

PALAVRAS-CHAVE: Lixiviado, Toxicidade, Ecotoxicologia Terrestre.

1 INTRODUÇÃO

A estrutura do aterro sanitário permite uma destinação ambientalmente segura dos resíduos, permitindo minimizar os impactos ambientais gerados pelo lixiviado e gases inerentes a decomposição dos resíduos. Há uma grande preocupação do ponto de vista ambiental com a geração de lixiviado proveniente da degradação biológica e as águas de chuvas que penetram no maciço de resíduos gerando um percolado rico em matéria orgânica e inúmeras espécies química,

representando uma fonte poluidora altamente tóxica (GIORDANO, 2003).

A composição altamente complexa do lixiviado, a sua variabilidade de vazão sujeita aos índices pluviométricos de cada época e a idade do aterro são características que influenciam a composição química do lixiviado e consequentemente tornam esse efluente difícil de ser tratado. A combinação de processos de tratamento biológico e físico-químico são amplamente utilizados no tratamento do lixiviado de aterros sanitários e também no tratamento de outros efluentes e

objetivam a remoção dos poluentes para que o efluente tratado se enquadre nos padrões exigidos pela legislação ambiental e que seja técnica e economicamente viável (LIMA, 2008). Devidos a complexidade da sua composição e ao sinergismo entre os seus componentes o lixiviado apresenta-se altamente tóxico aos ecossistemas, principalmente devido às altas concentrações de nitrogênio amoniacal, salinidade, DQO, DBO e metais (CARNIATO et al. 2007).

A caracterização físico-química do lixiviado é muito importante para conhecer as espécies químicas presentes no efluente e assim tornar possível o seu tratamento, porém esta ferramenta não é capaz de medir os efeitos aos organismos. A exposição simultânea a dois contaminantes pode causar diferentes respostas biológicas, causando efeitos sinérgicos, de potenciação, antagonicos ou aditivos, por esses motivos as análises físico-químicas devem ser utilizadas em conjunto com as ecotoxicológicas (RAND, 1995). Os ensaios ecotoxicológicos são utilizados para verificar a toxicidade de uma substância específica ou do efeito sinérgico de diversos poluentes identificados ou não na amostra, relacionando-se ao impacto sobre a biota do corpo receptor (GIORDANO, 2007).

Os ensaios para avaliação dos efeitos ecotoxicológicos em organismos aquáticos são amplamente utilizados e padronizados pelas normas brasileiras vigentes, entretanto, os ensaios para avaliação da ecotoxicidade com organismos terrestres não estão bem estabelecidos no Brasil por existirem poucas normas que os padronizem. Por esse motivo faz-se necessário a utilização das normas internacionais que padronizam as análises das amostras de solo. A maior parte das normas internacionais utilizam solos artificiais para que os interferentes presentes no solo natural sejam eliminados; portanto, essa característica das normas internacionais apresenta um desafio nos estudos ecotoxicológicos em solos contaminados (SISINNO, 2006). A norma NBR ISSO 11269-2 (ABNT, 2009) que determina os efeitos dos poluentes na flora terrestre permite a utilização do solo natural, contaminando-o com as diluições da espécie

química estudada ou fracionando o solo contaminado com o solo preservado da mesma área.

Essa pesquisa tem como objetivo avaliar os efeitos ecotoxicológicos das amostras de lixiviado e seus efeitos no solo. A pesquisa foi efetuada em dois aterros sanitários de grande porte e em um lixão desativado na região metropolitana do Rio de Janeiro.

2 METODOLOGIA

2.1 Coletas, Preservação das Amostras e Caracterização Físico-Química

Foram realizadas 6 coletas no período de maio de 2015 a fevereiro de 2016. Nos meses de maio, junho e novembro de 2015 foram realizadas 3 coletas de lixiviado bruto no Aterro Sanitário 1. Em novembro de 2015 foram coletadas duas amostras de lixiviado no Aterro Sanitário 2: a primeira coletada na entrada da lagoa biológica e outra após a membrana de nanofiltração que compreende a última etapa do tratamento. Em fevereiro de 2016 repetiu-se a amostragem realizada em novembro de 2015. No mês de setembro foi realizada a coleta da amostra de lixiviado bruto na lagoa de acumulação do extinto lixão da Marambaia e do solo a montante da área de destinação dos resíduos, na jazida utilizada. Este lixão operou de maio de 1987 a fevereiro de 2003, e foi encerrado de forma adequada, com projeto de remediação executado. Devido ao fechamento e reintegração de posse da área ocupada pelo antigo lixão da Marambaia não ocorreu uma nova coleta.

A preservação e caracterização físico-química das amostras foram realizadas no Laboratório de Engenharia Sanitária da UERJ de acordo com os métodos descritos em AWWA (APHA, 2012). Foi realizada uma análise físico-química robusta que abrangeu os seguintes parâmetros: pH, turbidez, cor (real e aparente), OD, condutividade, DQO, nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito, fósforo total, alcalinidade total, cloreto, COD, sólidos (SDT, SST, SVT) de acordo com os métodos descritos em AWWA (APHA, 2012).

Uma amostra de solo não contaminado foi coletada a montante da área de disposição dos resíduos sólidos urbanos do lixão.

2.2 Testes Ecotoxicológicos

Foram realizados testes de toxicidade com quatro organismos *Alivibrio Fischeri* (bactéria luminescente), *Lactuca sativa L.* (semente de alface) em solo virgem contaminado por lixiviado e em meio líquido, *Daphnia similis* (microcrustáceo) e *Danio rerio* (peixe). Os ensaios com *Alivibrio Fischeri*, *Lactuca sativa L.* em solo, *Daphnia similis* e *Danio rerio* foram realizados segundo às normas NBR 15411-3 (ABNT, 2006), NBR 11269-2 (ABNT, 2009), NBR 12713 (ABNT, 2009) e NBR 15088 (ABNT, 2006) respectivamente. O ensaio com *Lactuca sativa L.* em meio líquido seguiram a metodologia utilizada por Keddy et al.,1995.

2.3 A Caracterização do Solo

A caracterização do solo, com a determinação de limites de Atterberg, da densidade dos grãos e da curva granulométrica foram realizadas segundo as normas NBR 7180/7181, no Laboratório e Mecânica de Solos da UERJ (LMS/UERJ).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Físico-Química das Amostras de Lixiviado

A tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros analisados nas amostras de lixiviado bruto A1, A2 e A3 do aterro de grande porte 1. A tabela 2 apresenta a caracterização das amostras B1 bruta, B1 tratada, B2 bruta e B2 tratada do aterro de grande porte 2. A tabela 3 apresenta a caracterização da amostra C, lixiviado bruto coletada na lagoa de acumulação do lixão.

Tabela 1. Caracterização físico químicas das amostras A1, A2 e A3.

Parâmetros físico-químicos	A1	A2	A3	Unidade
pH	8,14	8,06	8,00	–
COD	2468	2645	2657	mg de C / L
DQO	515	479	467	mg de O ₂ / L
Alcalinidade Total	4995	4953	3903	mg de CaCO ₃ / L
Nitrogênio amoniacal	1684	1663	1607	mg N-NH ₃ / L
Nitrito	1,7	3,6	0,9	mg N-NO ₂ / L
Nitrato	10,7	8,8	12,1	mg N-NO ₃ / L
Cloreto	4709	4519	4289	mg de Cl / L
Cor aparente	201	194	145	Units Pt / Co
Cor Real	181	159	121	Units Pt / Co
Turbidez	182	142	121	NTU
Fóforo Total	9,7	14,9	5,6	mg de P / L
SDT	13136	12362	12552	mg / L
SST	234	222	192	mg / L
Condutividade a 25°C	20,7	21,0	20,6	S/cm
Substâncias Húmicas	3054	3343	3243	mg / L

Tabela 2. Caracterização físico químicas das amostras B1 bruta, B1 tratados, B2 bruta, B2 tratados.

Parâmetros físico-químicos	B1 bruta	B1 tratada	B2 bruta	B2 tratada	Unidade
pH	8,10	6,43	8,20	6,97	–
COD	278	42	776	158	mg de C / L
DQO	296	134	1285	1137	mg de O ₂ / L
Alcalinidade Total	2898	152	2833	86	mg de CaCO ₃ / L
Nitrogênio amoniacal	1544	385	953	199	mg N-NH ₃ / L
Nitrito	34,5	0,8	51,1	0	mg N-NO ₂ / L
Nitrato	11,8	64,4	8,9	71,1	mg N-NO ₃ / L
Cloreto	3679	1880	2787	2806	mg de Cl / L
Cor aparente	136	6	143	24	Units Pt / Co
Cor Real	94	4	65	19	Units Pt / Co
Turbidez	115	0	112	0,2	NTU
Fóforo Total	3,4	0,13	2,4	0,03	mg de P / L
SDT	8742	3198	7632	7640	mg / L
SST	244	0	254	126	mg / L
Condutividade a 25°C	21,0	17,7	12,9	10,8	S/cm
Substâncias Húmicas	1424	0	1615	0	mg / L

Tabela 3. Caracterização físico químicas da amostra C.

Parâmetros físico-químicos	C	Unidade
pH	8,30	–
COD	505	mg de C / L
DQO	163	mg de O ₂ / L
Alcalinidade Total	2473	mg de CaCO ₃ / L
Nitrogênio amoniacal	575	mg N-NH ₃ / L
Nitrito	2,3	mg N-NO ₂ / L
Nitrato	1,2	mg N-NO ₃ / L
Cloreto	1150	mg de Cl / L
Cor aparente	249	Units Pt / Co
Cor Real	114	Units Pt / Co
Turbidez	236	NTU
Fósforo Total	6,8	mg de P / L
SDT	5020	mg / L
SST	196	mg / L
Condutividade a 25°C	7,8	S/cm
Substâncias Húmicas	1449	mg / L

Os valores de nitrogênio amoniacal nas amostras A1, A2, A3 e B1 estão na mesma faixa de concentração encontrada por Souto & Povinelli (2007). Após o tratamento as concentrações dessa espécie foram reduzidas consideravelmente, porém ainda está muito elevado em relação aos 20 mg/L permitidos pelo CONAMA 357. A faixa de pH de todas as amostras encontra-se dentro do previsto para lixiviados e indicando a predominância de lixiviado de resíduo em estado avançado de decomposição e em aterros na fase metanogênica (MONTEIRO, 2003). As concentrações de CaCO₃ estão abaixo da faixa detectada por Carniato (2007) na qual a alcalinidade variou de 5389 a 9673 mgCaCO₃/L no lixiviado bruto do aterro de Gramacho, ratificando a metanização do lixiviado. Quanto mais alta, maior a transformação da matéria orgânica em CO₂ e, conseqüentemente, em bicarbonatos (GIORDANO, 2003).

Assim como as concentrações de cloretos determinadas, os valores de DQO das amostras estão dentro da faixa determinada por Souto & Povinelli (2007), com exceção da amostra C que apresenta DQO abaixo do valor previsto devido à baixa biodegradabilidade, típica de um aterro antigo. Essa variação que ocorre na relação da DQO com a idade do aterro não é observada para outros parâmetros como cloretos, fósforo e

série de sólidos que estão mais relacionadas com a variação dos índices pluviométricos (SANTOS, 2011).

As concentrações de nitrito e nitrato estão dentro da faixa descrita na literatura, porém observa-se que as concentrações de nitrato nas amostras tratadas aumentaram consideravelmente em relação às amostras brutas do mesmo lixiviado mostrando que houve nitrificação do nitrogênio amoniacal (BIDONE, 2007).

3.2 Caracterização do Solo

A caracterização do solo virgem indicou limite de liquidez de 57,8%, índice de plasticidade de 28,3% e densidade real dos grãos de 2,707. A curva granulométrica indicou 40% de areia, 27% de silte e 33% de argila, observando-se a predominância de material fino. Fazendo uso da carta de plasticidade, a amostra de solo é classificada como CH (argila de alta compressibilidade), porém muito próximo de MH (silte de alta compressibilidade). A atividade da argila (razão do índice de plasticidade e da fração de argila no solo) apresentou o valor de 0,86, classificando-a como uma argila de atividade normal.

3.3 Análise Ecotoxicológica

A tabela 4 apresenta a resposta dos organismos frente às amostras que foram expostos, e os valores foram expressos na forma de CE(L)50, onde CE50 é a concentração do efluente que causa efeito agudo a 50% dos organismos, em um determinado período de tempo em % e CL50 é a concentração do efluente que causa efeito letal a 50% dos organismos em um determinado período de tempo.

Ressalta-se que o solo virgem do lixão da Marambaia foi exposto a dois lixiviados: o lixiviado bruto do aterro de grande porte 2 e o coletado na lagoa do lixão.

Tabela 4. Resultados das análises ecotoxicológicas.

Amostra	<i>Lactuca sativa</i> (Líquido)	<i>Lactuca sativa</i> (solo+lixiviado)	<i>Daphnia similis</i>	<i>Danio rerio</i>	<i>Alivibrio fischeri</i>
A1	5,06	*	*	1,11	3,7
A2	7,11	*	*	1,1	4,76
A3	2,82	*	1,98	1,1	2,24
B1 bruto	7,38	29,57	3,3	1,82	5,3
B1 tratado	18,54	*	12,5	16,49	30,53
B2 bruto	11,57	*	3,96	*	9,91
B2 tratado	15,66	*	15,85	18,95	17,67
C	23,85	35,57	13,87	4,2	10,12

*CE(L)50 não determinadas

3.3.1 *Lactuca sativa* L.

As amostras A1, A2, A3, B1 bruto e B2 bruto apresentaram CE50 igual a 5,06%, 7,11%, 2,83%, 7,38% e 11,57% respectivamente. As amostras mais tóxicas coincidiram com os resultados encontrados no trabalho de Dias (2009), onde a maior toxicidade do efluente estava diretamente ligada às amostras com a maior concentração de nitrogênio amoniacal. Em contrapartida observou-se na amostra C uma CE50 de 23,85%, representando uma toxicidade menor que a encontrada nas duas amostras tratadas B1tratada e B2tratada que obtiveram uma CE50 de 15,66% e 18,54% respectivamente.

A relação com o nitrogênio amoniacal também ficou evidente na diferença de toxicidade entra as duas amostras tratadas, porém não explica a menor toxicidade da amostra C. Durante o processo de tratamento o fósforo foi praticamente removido das amostras B1tratada e B2tratada (0,13 mg de P/L e 0,03 mg de P/L respectivamente), o que não acontece na amostra C que é uma amostra bruta e apresenta 6,8 mg de P/L. Como o fósforo é um macronutriente essencial para o desenvolvimento vegetal, a alta concentração desse elemento na amostra C pode estar mascarando o efeito tóxico do efluente, promovendo o alongamento radicular maior do que em amostras com menor concentração de nitrogênio amoniacal (GARCIA, 1982). A

resposta das sementes no solo mostra uma menor toxicidade em relação aos outros organismos com as mesmas amostras. Isto indica a capacidade do solo em reter contaminantes e assim deixá-los indisponíveis para o organismo vegetal. Ressalta-se que a capacidade de qualquer solo em reter contaminantes é limitada (YONG, 1992). Ensaio para medir a sorção do solo ainda serão realizados.

3.3.2 *Daphnia similis*

As amostras brutas A3, B1 e B2 apresentaram-se mais tóxicas que as amostras B1 e B2 tratadas. As respostas dos organismos aos testes mostram que a alta toxicidade está diretamente ligada às altas concentrações de nitrogênio amoniacal. A amostra C é única amostra onde se observa uma resposta diferente: toxicidade menor em relação a amostra tratada B1. Essa diferença pode estar ligada a baixa DQO da amostra C. Em seu estudo ALVES (2010) observa a redução de 90% da toxicidade em testes com *Daphnia similis* após o tratamento que reduziu 98% do nitrogênio amoniacal, indicando que a toxicidade pode estar fortemente ligada às concentrações de nitrogênio amoniacal.

3.3.3 *Danio rerio*

O *Danio rerio* apresentou a maior toxicidade às amostras de lixiviado bruto e também uma resposta ao tratamento. No geral, ocorreu uma maior toxicidade nos testes com *Danio rerio* e menor toxicidade nos testes com *Lactuca sativa*, porém é possível observar que para as amostras tratadas o CE(L)50 para esses dois organismos foram bem próximos. Isto é um possível indicativo que potencial da *Lactuca sativa* como organismo teste já que os testes com *Danio rerio* atualmente são severamente criticados com base nas questões de bioética.

3.3.4 *Alivibrio fischeri*

Nos testes com *Alivibrio fischeri* os menores valores de CE50 foram observados nos ensaios ecotoxicológicos com amostras brutas

de todos os lixiviados. Foi observado a diferença de toxicidade das amostras brutas B1 e B2, que provavelmente ocorreu devido a diferença na concentração de nitrogênio amoniacal: a amostra bruta B1 apresenta 1544 mg N-NH₃/L e a amostra bruta B2 apresenta uma concentração de 953 mg N-NH₃/L. Nos estudos realizados por Silva et al. (2004) foi detectada uma faixa de CE50 de 11,3 - 15 % no lixiviado bruto do aterro de Gramacho nos testes com *Alivibrio Fischeri*, evidenciando a alta toxicidade dos lixiviados brutos analisados no presente estudo.

4 CONCLUSÕES

Todas as amostras de lixiviado dos aterros de grande porte apresentaram-se tóxicas aos organismos que foram expostas. No entanto, as amostras que passaram por processo de tratamento apresentaram redução de toxicidade.

As altas concentrações de nitrogênio amoniacal contribuíram para a toxicidade das amostras, porém o efeito tóxico dos outros parâmetros analisados e seus efeitos sinérgicos não devem ser excluídos.

O solo argilo-siltoso coletado na área do lixão desativado indicou uma capacidade de reter contaminantes, fato evidenciado na diferença de toxicidade entre os testes ecotoxicológicos da *Lactuca sativa* nos ensaios em meio líquido e no solo.

Os resultados se mostraram promissores para a utilização da *Lactuca sativa* como organismo teste, já que os testes com *Danio rerio* são severamente criticados com base nas questões de bioética.

REFERÊNCIAS

- Alves, S. D. Estudo comparativo da sensibilidade de dois organismos expostos a efluentes líquidos. Dissertação - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- APHA; AWWA; WEF. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 21 st Ed. American Public Health Association, Washington, D. C. 2005.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 15411-3. Determinação do efeito inibitório de amostras de água sobre a emissão de luz de *Aliivibrio fischeri* (ensaio de bactéria luminescente): método com utilização de bactérias liofilizadas. Rio de Janeiro, 2012.
- Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) NBR 12713 Ecotoxicologia aquática – Toxicidade aguda: Método de ensaio com *Daphnia* sp (Cladocera, Crustácea). Rio de Janeiro, 23p., 2009.
- Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) NBR 15088 Ecotoxicologia aquática – Toxicidade aguda: Método de ensaio com peixes. Rio de Janeiro, 19p., 2006.
- Associação Brasileira de Normas Técnica, NBR ISSO 11269-2: qualidade do solo – determinação dos efeitos de poluentes na flora terrestre. Rio de Janeiro. 17p.
- Carniato, J. G. Et al. Avaliação da toxicidade de percolado de resíduos sólidos pós tratamento biológico e fotocatalítico. Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal, v. 4, p. 092 – 101, 2007.
- Conselho Nacional de Meio Ambiente (Brasil). Resolução nº 357, de 17/03/2005. Brasília/DF. Diário Oficial da União, nº53, de 18 de março de 2005. P. 58-63. 2005
- Dias, N. C. Adsorção de Nitrogênio Amoniacal de Lixiviado de aterro sanitário em coluna de leito fixo com vermiculita expandida. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 79 p., 2013.
- Garcia, L. L. C. Mineral nutrition of vegetable crops, concentration and accumulation of macronutrients by lettuce plants. Piracicaba, v. 39, n. 1, p. 455-484, 1982.
- Giordano, G. Análise e formulação de processos para tratamento dos chorumes gerados em aterros de resíduos sólidos urbanos. 257 pg. Tese de Doutorado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC). Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. Rio de Janeiro, 2003
- Giordano, G. Tratamento e controle de efluentes industriais. Apostila de curso. Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- Keddy, C. J.; GREENE, J. C.; BANNELL, M. A. Review of whole-organism bioassays - soil, fresh-water, and fresh water assessment in Canada. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 30, p. 221-251, 1995.
- Lima, S. B.; SOUZA, D. C.; OLIVEIRA, C. C.; LOPES, K. V.; SILVA, M. N.; RAMOS, M. R. Eficiência de macrófitas aquáticas emergentes da região de Campo Mourão-PR no Pós-tratamento de chorume. Anais.. In: 31 Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. Águas de Lindóia-SP, 2008.
- Monteiro, V. E. D., M. C. Melo, and J. F. T. Jucá. "Biological Degradation Analysis in Muribeca Solid Waste Landfill Associated with Local Climate-Recife, Brazil." Proceedings of the Fourth

- International Congress on Environmental Geotechnics. Vol. 2. 2002.
- Rand, G. M.; WELLS, P. G.; MCCARTY, L. S.; Introduction to Aquatic Toxicology. In: RAND, G. M. Fundamentals of Aquatic Toxicology: Effects, Environmental Fate and Risk Assessment. Washington, D. C., Taylor; Francis, 2ªEd, p.3-67, 1995.
- Santos, C. M. D. “Evolução dos compostos nos lixiviados dos Aterros Sanitários do Barlavento e Sotavento Algarvio”. Dissertação – Universidade do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 171 p., 2011.
- Sisinno, C.L.S.; BULUS, M.R.M.; RIZZO, A.C.; MOREIRA, J.C. Ensaio de comportamento com minhocas (*Eisenia fetida*) para avaliação de áreas contaminadas: resultados preliminares para contaminação por hidrocarbonetos. *Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology*, v.1, p.137-140, 2006.
- Souto, G. D. B. Lixiviados de Aterros Sanitários Brasileiros – Estudo de Remoção do Nitrogênio Amônio por Processo de Arraste de Ar (“stripping”). Tese – Universidade de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 371 p., 2009.
- Yong, Raymond N., Abdel-Mohsen Onsy Mohamed, and Benno P. Warkentin. Principles of contaminant transport in soils. Elsevier Science Publishers, 1992.