



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA

GIOVANA DE OLIVEIRA ALVES

**DEGRADAÇÃO DO SOLO EM ÁREA DE DISPOSIÇÃO IRREGULAR
DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO SEMIÁRIDO TROPICAL**

Natal/RN

2016

GIOVANA DE OLIVEIRA ALVES

**DEGRADAÇÃO DO SOLO EM ÁREA DE DISPOSIÇÃO IRREGULAR
DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO SEMIÁRIDO TROPICAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Karina Patrícia Vieira da Cunha.

Natal/RN

2016

Catálogo da Publicação na Fonte
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Sistema de Bibliotecas
Biblioteca Central Zila Mamede / Setor de Informação e Referência

Alves, Giovana de Oliveira.

Degradação do solo em área de disposição irregular de resíduos sólidos no semiárido tropical / Giovana de Oliveira Alves. - Natal, RN, 2016.

84 f. : il.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Karina Patrícia Vieira da Cunha.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Fabíola Gomes de Carvalho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

1. Degradação ambiental - Dissertação. 2. Solo – Contaminação - Dissertação. 3. Solo – Recuperação - Dissertação 4. Lixão - Dissertação. 5. Metais pesados - Dissertação. I. Cunha, Karina Patrícia Vieira da. II. Carvalho, Fabíola Gomes de. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 502.174

GIOVANA DE OLIVEIRA ALVES

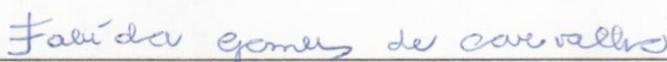
**DEGRADAÇÃO DO SOLO EM ÁREA DE DISPOSIÇÃO IRREGULAR
DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO SEMIÁRIDO TROPICAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

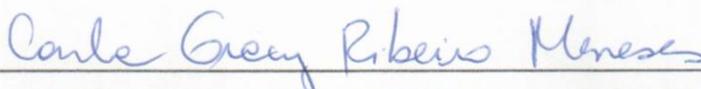
BANCA EXAMINADORA



Dra. Karina Patrícia Vieira da Cunha – Orientadora
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)



Dra. Fabíola Gomes de Carvalho – Co-orientadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN)



Dra. Carla Gracy Ribeiro Meneses – Examinadora externa
Universidade Potiguar (UnP)



Dra. Fabiana Araújo – Examinadora interna
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Natal, julho de 2016.

Aos meus pais, Giovani Alves e Josineide, por me ensinarem que a educação é o melhor caminho a ser seguido, por todo amor, atenção e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ser meu guia nas escolhas da vida e por me proporcionar saúde, força e fé para superar os desafios que surgiram ao longo dessa etapa.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa do mestrado.

À minha orientadora, Professora Dra. Karina Patrícia Vieira da Cunha, por ser exemplo de ser humano e profissional, pela orientação, paciência, dedicação e incentivo.

À minha co-orientadora, Professora Dra. Fabíola Gomes de Carvalho, pelo apoio e pelas contribuições na dissertação.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN) pelo apoio e espaço concedido para a realização das análises, a Maninho, Alfredo, Dutra, Tarcísio, Marcos, Fátima, Ingrid, Miriam, Ernesto, Ronildo, Gerson, Sr. Daniel e toda a equipe pelo apoio na realização das análises, por toda a paciência durante as explicações, pela torcida para que tudo desse certo e pela amizade.

À Gerência de Meteorologia da EMPARN por disponibilizar os dados da série histórica de precipitação de Olho D'água do Borges.

À Josineide de Oliveira Alves pela elaboração do mapa de localização da área do lixão desativado no município de Olho D'água do Borges e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo com curvas de nível.

Ao Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (LARHISA) e à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pelo espaço concedido para a realização da pesquisa.

Aos docentes do Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da UFRN (PPgES/UFRN), Ada Cristina Scudelari, Adelena Gonçalves Maia, André Luis Calado Araújo, Antônio Marozzi Righetto, Arthur Mattos (in memoriam), Cícero Onofre de Andrade Neto, Hélio Rodrigues dos Santos, Joana Darc Freire de Medeiros, João Abner, Karina Patrícia Vieira da Cunha, Lúcio Flávio Ferreira Moreira, Manoel Lucas Filho, Ricardo Farias do Amaral, Ronaldo Angelini, Vanessa Becker e a colaboradora Fabiana Oliveira de Araújo Silva pelos conhecimentos transmitidos e pelo empenho em fortalecer o ensino superior no Brasil.

À Professora Dra. Joana Darc Freire de Medeiros pelas contribuições nos aspectos relacionados à hidrologia e hidrogeologia.

A Sérgio Luiz Macêdo e aos professores André Luis Calado Araújo e Hélio Rodrigues dos Santos por disponibilizarem alguns relatórios do Programa Água Azul para a minha pesquisa.

À banca da qualificação composta pelas professoras Fabíola Carvalho e Zuleide Lima, com as contribuições que enriqueceram o meu trabalho.

A João Manoel e João Vieira, por ajudarem nas coletas das amostras, à Cristiane Souza de Araújo, à Amanda Caú e ao grupo de estudo de solos. Muito obrigada, vocês foram essenciais, sempre prestativos e amigos.

À minha amiga Alana Souza, pela troca de experiências na área de Solos e de Engenharia Sanitária e Ambiental bem como pela ajuda na aplicação da estatística.

Aos meus pais, Giovani Alves e Josineide de Oliveira Alves, meu porto seguro, a quem eu ofereço essa dissertação como retribuição pela educação que me proporcionaram e por toda a confiança depositada em mim. Obrigada por estarem comigo sempre, por serem pais presentes, amorosos, motivadores, enfim, vocês são maravilhosos e eu os amo muito!

À minha irmã, Giordana de Oliveira Alves Paiva, ao meu cunhado Alexandro Paiva, à minha sobrinha Grazielle Alves Paiva e a todos os meus familiares.

A Michelangelo, pelo apoio na preparação das amostras, além de todo incentivo e cooperação, estando comigo desde a preparação para a realização da prova do mestrado. Te amo!

À minha prima Alane Araújo, pelo incentivo e colaboração com o abstract.

Aos meus amigos, em especial a Carlos André, Danielle Alves, Giovana Medeiros, Hélio Alves, Larissa Saraiva e Silvana Santana pela amizade e pelo apoio, e aos amigos de turma que ingressaram no PPgES em 2014.

Aos secretários e técnicos do LARHISA, e à querida Célia pelo apoio.

À equipe da Secretaria de Meio Ambiente e Infraestrutura de Olho D'água do Borges e ao técnico Thiago pelo apoio ao mostrar o local do lixão desativado e acompanhar a coleta, dando algumas informações necessárias.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a construção deste trabalho.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVI
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS	6
CAPÍTULO 1	9
RESUMO	9
ABSTRACT	10
1 INTRODUÇÃO	11
2 MATERIAL E MÉTODOS	12
2.1 Área de estudo	12
2.2 Coleta das amostras de solo	15
2.3 Avaliação dos atributos físicos do solo	16
2.4 Avaliação dos atributos químicos do solo	16
2.5 Cálculo das taxas de aumento e redução dos atributos físicos e químicos do solo	17
2.6 Análises estatísticas dos dados	17
3 RESULTADOS	17
4 DISCUSSÃO	24
5 CONCLUSÕES	28
REFERÊNCIAS	29
CAPÍTULO 2	34
RESUMO	34
ABSTRACT	35
1 INTRODUÇÃO	36
2 MATERIAL E MÉTODOS	37
2.1 Área de estudo	37
2.2 Coleta das amostras de solo	40

2.3 Análise do solo	41
2.4 Análise das taxas de aumento e redução dos teores disponíveis e totais de metais pesados	41
2.5 Análises estatísticas e interpretação dos dados	42
3 RESULTADOS	43
4 DISCUSSÃO	50
5 CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS	54
CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICE	62

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1.** Localização da área do lixão desativado no município de Olho D'água do Borges e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) com curvas de nível. **14**
- Figura 2.** Teores de areia, silte e argila do solo de área degradada pela disposição irregular de resíduos sólidos e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) em comparação a mata nativa no município de Olho D'água do Borges/RN. (As barras equivalem à média de três amostras e o desvio padrão). **18**
- Figura 3.** Atributos físicos do solo de área degradada pela disposição irregular de resíduos sólidos e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) em comparação a mata nativa no município de Olho D'água do Borges/RN. (As barras equivalem à média de três amostras e o desvio padrão). Legenda: densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp) e porosidade total (PT). **18**
- Figura 4.** Complexo sortivo do solo em área degradada pela disposição irregular de resíduos sólidos e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) em comparação a mata nativa no município de Olho D'água do Borges/RN. (As barras equivalem a média de três amostras e o desvio padrão). Legenda: condutividade elétrica (CE) e capacidade de troca catiônica potencial (CTCp). **21**
- Figura 5.** Atributos químicos do solo de área degradada pela disposição irregular de resíduos sólidos e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) em comparação a mata nativa no município de Olho D'água do Borges/RN. (As barras equivalem a média de três amostras e o desvio padrão). Legenda: saturação por bases (V%), matéria orgânica (MO), fósforo disponível (P) e nitrogênio total (N). **22**
- Figura 6.** Análise de Componentes Principais dos atributos físicos e químicos dos solos das áreas estudadas sob mata nativa, lixão e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) localizados no município de Olho D'água do Borges/RN. Legenda: densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp), porosidade total (PT), potencial hidrogeniônico (pH), cálcio trocável Ca^{2+} (Ca), sódio trocável Na^{+} (Na), fósforo disponível (P), condutividade elétrica (CE), potássio trocável K^{+} (K), magnésio trocável Mg^{2+} (Mg), capacidade de troca catiônica potencial (CTCp), matéria orgânica (MO), nitrogênio total (N) e acidez potencial (H+Al). **23**

CAPÍTULO 2

- Figura 1.** Localização da área do lixão desativado no município de Olho D'água do Borges e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) com curvas de nível. **39**
- Figura 2.** Teores disponíveis de metais pesados do solo sob a área de mata nativa e as áreas degradadas lixão e ADE no município de Olho D'água do Borges/RN para as profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm. (As barras equivalem a média de três amostras e o desvio padrão). **46**
- Figura 3.** Teores totais de metais pesados do solo sob a área de mata nativa e as áreas degradadas lixão e ADE no município de Olho D'água do Borges/RN para as profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, VRQ: Valor de Referência de Qualidade (Preston *et al.*, 2014), VP: Valor de Prevenção e VI-A: Valor de investigação para o cenário agrícola (CONAMA, 2009). (As barras equivalem à média de três amostras e o desvio padrão). **47**
- Figura 4.** Análise de Componentes Principais dos teores disponíveis e totais de metais, pH, PT, MO, areia, silte e argila nas áreas estudadas sob mata nativa, lixão e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) localizados no município de Olho D'água do Borges/RN. **49**
Legenda: metal seguido por D representa o teor disponível e seguido por T representa o teor pseudototal.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

- Tabela 1.** Média \pm desvio padrão (mínimo – máximo) dos atributos do solo de área degradada pela disposição irregular de resíduos sólidos, área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) e mata nativa no município de Olho D'água do Borges/RN **45**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

*	Significativo
**	Altamente significativo
ACP	Análise de Componentes Principais
ADE	Área de drenagem efêmera do Açude do Brejo
Al ³⁺	Alumínio trocável
CE	Condutividade elétrica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CTCp	Capacidade de troca catiônica potencial
Dp	Densidade de partículas
Ds	Densidade do solo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
H ⁺ +Al ³⁺	Acidez potencial
hab	Habitantes
m	Saturação por alumínio
MO	Matéria orgânica
N	Nitrogênio total
P	Fósforo disponível
pH	Potencial hidrogeniônico
PLS	Projeto de Lei do Senado
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PST	Porcentagem de saturação por sódio
PT	Porosidade total
RN	Rio Grande do Norte
SB	Soma de bases
V%	Saturação por bases
VI	Valor de investigação
VI-A	Valor de investigação para o cenário agrícola APM _{max}
VLP	Valores Limites Permitidos

VP	Valor de prevenção
VRQ	Valor de referência de qualidade
SAS	Statistical analysis system
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
TFSA	Terra fina seca ao ar
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte

RESUMO

A desativação de lixões sem medidas de engenharia sanitária e ambiental amplia o potencial de degradação da área podendo gerar outros passivos ambientais. Esses lixões devem ser encaminhados a programas de recuperação, baseados em diagnósticos do solo que identifiquem os processos de degradação ambiental para auxiliar a recuperação eficaz da área degradada. Diante da obrigatoriedade de recuperação dessas áreas estabelecida pela legislação brasileira, os municípios necessitam de estudos como este para adequação a legislação brasileira e gestão de seus resíduos sólidos. O objetivo geral desse trabalho foi identificar os processos de degradação ambiental instalados na área de disposição irregular de resíduos sólidos no semiárido tropical, a fim de nortear a implantação de programas de recuperação dessa área pelo município. Para tanto, buscou-se: (1) avaliar os atributos físicos e químicos do solo de cobertura do lixão desativado do município de Olho D'água do Borges, cujo resultados serão apresentados no CAPÍTULO I dessa dissertação; e (2) avaliar se a disposição irregular de resíduos sólidos no lixão promove a contaminação do solo por metais pesados e amplia o potencial de difusão para os demais componentes da bacia hidrográfica, o que será abordado no CAPÍTULO II dessa dissertação. Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm na área do lixão desativado, na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo e em área sob mata nativa utilizada como referência de qualidade no município de Olho D'água do Borges/RN. Foram avaliados nas três áreas os atributos: densidade do solo (D_s) e de partículas (D_p), porosidade total (PT); granulometria, pH, condutividade elétrica (CE), matéria orgânica (MO), fósforo disponível (P), nitrogênio total (N), cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+), acidez trocável e potencial e a partir desses o complexo sortivo do solo, teores de metais disponíveis e totais. Com isso, a erosão hídrica e eólica, revolvimento do substrato de cobertura, sobrecarga de sais, de nutrientes e matéria orgânica, além da contaminação por metais pesados são processos de degradação identificados como consequência da disposição irregular de resíduos sólidos no solo. Esses processos contribuem com o aumento do potencial de difusão dos contaminantes do lixão para a bacia hidrográfica, ampliando a área degradada.

Palavras-chave: áreas degradadas, contaminação, lixão, metais pesados.

ABSTRACT

Disabling dumpsites without sanitary and environmental engineering measures increases potential degradation of the area and may cause other environmental liabilities. These dumpsites should be sent to recovery programs, based on soil diagnostics to identify the environmental degradation processes to assist degraded area effective recovery. Given the obligation to recover these areas established by Brazilian law, municipalities need studies like this to adapt the Brazilian legislation and solid waste management. The general aim of this study was to identify the environmental degradation processes installed in solid waste irregular disposal area in tropical semiarid, in order to guide the implementation of recovery programs in this area by the municipality. Therefore, we sought to: (1) evaluate the physical and chemical attributes of the cover soil from the deactivated dumpsite of the municipality of Olho D'água do Borges/RN, which results will be presented in CHAPTER I of this dissertation; and (2) assess whether the irregular disposal of solid waste in the dumpsite promotes soil contamination by heavy metals and expands the potential to spread to other parts of the watershed, which will be addressed in CHAPTER II of this dissertation. Soil samples were collected at depths of 0-20 cm and 20-40 cm on the deactivated dumpsite area, in ephemeral drainage area of Brejo dam and area under native forest used as quality reference in Olho D'água do Borges/RN. Therefore, the evaluated attributes in three areas were: bulk density (BD) and particles density (PD), total porosity (TP), particle size, pH, electrical conductivity (EC), organic matter (OM), available phosphorus (P), total nitrogen (N), exchangeable cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+), exchangeable and potential acidity, and from these the sorption complex soil, available and total metals contents. Thus, the water and wind erosion, substrate cover disturbance, overload salts, available phosphorus, nitrogen, organic matter and heavy metal contamination are degradation processes identified as result of irregular disposal of solid waste in the soil. These processes contribute to increase the potential diffusion of dumpsite contaminants to the watershed, expanding the degraded area.

Key words: degraded areas, contamination, dumpsite, heavy metals.

INTRODUÇÃO GERAL

A disposição irregular de resíduos sólidos no solo compromete a qualidade ambiental da bacia hidrográfica, e a recuperação eficaz desse passivo requer a realização de um diagnóstico que respalde a identificação dos processos de degradação.

Entende-se por resíduos sólidos o material, substância, objeto ou bem descartado proveniente de atividades antrópicas cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades inviabilizem o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (Brasil, 2010). Com isso, quando as possibilidades de tratamento e recuperação dos resíduos são cessadas, então tem-se o rejeito, que deverá ser encaminhado para disposição final ambientalmente adequada (Brasil, 2010).

No Brasil, a disposição de resíduos sólidos em lixões a céu aberto é uma atividade irregular desde a publicação da Política Nacional de Meio Ambiente - PNMA (Lei N° 6.938 de 1981), anterior à Constituição Federal, a qual proibia a existência de lixões (Brasil, 1981) e seu caráter ilegal foi reforçado pela Lei 9.605/98 em seu Artigo 54, no qual destinar inadequadamente os resíduos é tratado como crime ambiental (Brasil, 1998). Porém, a obrigatoriedade da extinção e recuperação ambiental dos lixões e aterros controlados foi estabelecida somente com a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS através da Lei N° 12.305/2010 (Brasil, 2010).

Além das questões ambientais, econômicas e sociais, a tomada de decisões é condicionada a questões políticas. O prazo estabelecido na PNRS para desativação e recuperação dos lixões foi prorrogado através do projeto PLS N° 425/2014 no qual foram estabelecidos prazos escalonados de acordo com o porte dos municípios para a adequação à Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) (Brasil, 2015).

As atividades antrópicas são desenvolvidas com base nas transformações energéticas e dos materiais. Como não é realizada a aniquilação completa da matéria, a geração de resíduos é inevitável. Contudo, na natureza os resíduos são reincorporados ao meio através dos ciclos biogeoquímicos e com isso possibilitam a

reutilização. Em contraste, a realidade dos lixões é o aporte excessivo no solo de resíduos domésticos municipais misturados aos resíduos de outras fontes, dentre eles resíduos industriais, o que pode provocar alterações desfavoráveis nas características físicas e químicas do solo (Remon *et al.*, 2005). Estas mudanças podem modificar as inter-relações entre as funções biofísicas e químicas do solo, bem como favorecer o aporte de nitrato e metais pesados no solo e na água subterrânea (Anikwe e Nwobodo, 2002).

Os resíduos sólidos após depositados em aterros e lixões sofrem modificações por processos físicos, químicos e biológicos (Bozkurt *et al.*, 2001), que realizam a degradação do material, mas que também tende a gerar subprodutos tais como gases e lixiviados que podem ser tóxicos ao meio ambiente e à saúde humana (Lopes *et al.*, 2012).

O lixiviado de aterros e lixões é um líquido escuro, com turbidez e odor característicos, produto da decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos (Oygard *et al.*, 2004), podendo apresentar como características: altas concentrações de nitrogênio amoniacal, cloretos, matéria orgânica, compostos orgânicos de difícil degradação, por exemplo, as substâncias húmicas e, em alguns casos, metais pesados, dentre eles Al, Ni, Cd, Pb, Cr, Cu, Zn, Mn e Fe (Oygard *et al.*, 2004; Korf *et al.*, 2008; Kawahigashi *et al.*, 2014).

Dentre os fatores que influenciam a composição química do lixiviado estão a composição inicial dos resíduos sólidos, o tamanho das partículas, o grau de compactação, a hidrologia do local, o clima, e, finalmente, a idade (Al-Yaqout e Hamoda, 2003). Quando não tratado, o lixiviado pode causar efeitos prejudiciais sobre as águas superficiais e subterrâneas próximas à aterros de resíduos sólidos (Salem *et al.*, 2008).

Além dos problemas de poluição do ar e o risco à saúde da população, a queima dos resíduos nos lixões pode provocar alterações nos atributos físicos e químicos do solo, conseqüentemente da qualidade ambiental (Forbid *et al.*, 2011; Redin *et al.*, 2011). A alteração da qualidade do solo e os impactos negativos causados pela disposição inadequada de resíduos sólidos cria a necessidade de recuperação e monitoramento da área (Ali *et al.*, 2014).

Diante da degradação ambiental de áreas de disposição irregular de resíduos sólidos, ao serem considerados critérios técnicos e financeiros, a remoção dos resíduos aterrados por muitos anos para a deposição em aterros sanitários não

condiz com a realidade encontrada na maior parte dos municípios brasileiros (Remon *et al.*, 2005). Como medida mitigadora dos impactos de lixões e aterros deve-se buscar a estabilização da área (Araújo, 2014). Atualmente, tem sido levado em consideração a importância de se estabelecer além da camada de impermeabilização, acima desta uma camada de solo com o objetivo de suportar o crescimento da vegetação garantindo o sucesso da estabilização dessas áreas através da revegetação (Araújo, 2014). Isso porque a vegetação cumpre um duplo objetivo que é a estabilização da área frente aos processos erosivos e a recuperação estética visual (Remon *et al.*, 2005; Londe e Bittar, 2011).

A camada de impermeabilização deve ser tecnicamente definida conforme às condições ambientais da região, devido a maior facilidade de adaptação e crescimento vegetativo (Corrêa e Bento, 2010). Contudo, a camada de impermeabilização é apenas parte do sistema de cobertura final de aterros ou lixões e deve funcionar como barreira para infiltração de água da chuva e consequente percolação de chorume através do perfil de resíduos, além da difusão de gases de efeito estufa (ABNT, 1997; Bozkurt *et al.*, 2001).

O monitoramento dos solos e águas circunvizinhas a aterros finalizados apenas com implantação da camada de solo revelaram a presença de metais pesados (Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, Cd) em solos, sais (sulfatos, cloretos e nitratos) e altos níveis de poluentes orgânicos em ambos solos e águas (Pastor e Hernández, 2012). Esse cenário prejudica o reestabelecimento da vegetação, a estabilização da área, além de comprometer os serviços ecossistêmicos locais (Araújo, 2014).

Ao estabelecer critérios para uma avaliação precisa dos riscos em aterros contaminados deve ser considerado o risco de transferência vertical de metais tanto para as águas subterrâneas como para a vegetação rasteira (Remon *et al.*, 2005). Um estudo realizado em solo construído após o encerramento do lixão do município de São João do Sabugi/RN revelou que houve incremento nos teores totais e solúveis de metais pesados em relação aos encontrados na mata nativa (Araújo, 2014).

A cobertura vegetal como medida mitigadora dos impactos ambientais para compor as camadas de cobertura final de aterros de resíduos sólidos urbanos é uma opção coerente, prática e economicamente viável, embora possam ocorrer dificuldades de adaptação em função das características geométricas da área (declividade do terreno) e da composição física e química do substrato (Londe e

Bittar, 2011). Além de aglomeração, isolamento contra a alta variabilidade de temperatura, estabilização mecânica e proteção contra a erosão, a vegetação tem efeitos positivos sobre a oxidação do metano em coberturas de aterros (Abichou *et al.*, 2015). As raízes das plantas aumentam a aeração do solo, criando macroporos secundários que melhoram a difusão de oxigênio no solo (Abichou *et al.*, 2015).

No Brasil, estudos indicam que a vegetação que se estabelece espontaneamente sofre problemas e que raramente são observadas as espécies vegetais implantadas pelo poder público, destacando a falta de manutenção da área em recuperação (Beli *et al.*, 2005). Ainda que algumas espécies arbóreas se desenvolvam em áreas anteriormente utilizadas para disposição de resíduos sólidos (Beli *et al.*, 2005), as gramíneas predominam, assim como a vegetação herbácea e arbustiva, e limitam o processo de sucessão ecológica que contribui para a resiliência do ambiente (Volpe-Filik *et al.*, 2007). Com isso, reforça-se a necessidade de estudos que avaliem o grau de degradação do solo de lixões para que se possam estabelecer técnicas de manejo que facilitem o desenvolvimento da vegetação e a pedogênese do solo de maneira autossustentável (Bozkurt *et al.*, 2001).

Estudo relativo à alteração nos atributos químicos de um solo sob substrato de composto de lixo orgânico formulado com Neossolo Regolítico mostra a elevação nos teores de MO, Ca, Mg, Na, K e conseqüentemente elevação de SB e CTC, apenas o valor do pH se manteve ligeiramente constante (Lima *et al.*, 2011). Isso mostra que os resíduos orgânicos, quando devidamente tratados e sob dosagens adequadas, tem grande potencial de utilização na agricultura, entretanto, para áreas degradadas em processo de recuperação a elevação destes teores pode provocar o escoamento superficial e a lixiviação dos nutrientes excedentes para os demais componentes da bacia hidrográfica (Oliveira e Jucá, 2004).

O solo é utilizado como ferramenta de identificação da degradação por ser primordial no sistema Terra com influência sobre a hidrologia, erosão e ciclos biogeoquímicos (Adamcová *et al.*, 2016). Nesse contexto, vale destacar que a perda de solo por erosão e a eutrofização são dois processos inerentes à dinâmica da natureza, entretanto, a deposição de resíduos sólidos em locais inadequados e sem critérios ou medidas sanitárias e ambientais podem acelerar esses processos de modo que se tornem danosos ao ambiente e à saúde humana (Ekholm *et al.*, 2012).

A avaliação dos atributos físicos, químicos e dos teores de metais pesados no solo em lixões desativados permite a identificação de processos de degradação

atuantes na área, os quais concorrem para ampliação da área degradada para além da área utilizada para o aterro irregular de resíduos. Essa ampliação dificulta o estabelecimento de programa de recuperação por tornar o processo de recuperação mais oneroso em termos econômicos e ambientais. Além disso, a caracterização da área degradada é uma etapa fundamental embasando o planejamento e seleção de técnicas apropriadas a recuperação ambiental, a qual permite o melhor aproveitamento dos recursos ambientais e financeiros, o cumprimento da legislação e a melhoria da qualidade ambiental e conseqüente qualidade de vida da população envolvida.

Este estudo foi motivado pela necessidade de eliminação e recuperação dos lixões criada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010). A área foi escolhida devido a vulnerabilidade da região tropical semiárida, com baixos índices pluviométricos e concentrados em curto período de tempo, solos com elevada suscetibilidade à erosão, assoreamento e eutrofização de corpos hídricos e necessidade de manutenção da qualidade da água existente para os usos a que se destina (Barbosa *et al.*, 2012). O lixão desativado além de estar localizado em área caracterizada pelo Neossolo Regolítico (EMBRAPA 1971; EMBRAPA, 2013), solo típico da região semiárida, com baixo poder de retenção de água e de armazenamento de matéria orgânica (EMBRAPA, 2014), também está situado a montante do principal corpo d'água do município, o Açude do Brejo. Dessa forma, destaca-se a importância de se estudar a degradação do solo da área de disposição irregular de resíduos sólidos para verificar se o solo está pronto para receber a revegetação, técnica escolhida pelo município para a recuperação da área, e o potencial deste solo atuar como fonte difusa de contaminação da bacia hidrográfica.

Diante do exposto, o objetivo geral desse trabalho é identificar os processos de degradação ambiental instalados na área de disposição irregular de resíduos sólidos no semiárido tropical, a fim de nortear a implantação de programas de recuperação dessa área pelo município. Para tanto, buscou-se: (1) avaliar os atributos físicos e químicos do solo de cobertura do lixão desativado do município de Olho D'água do Borges, cujo resultados serão apresentados no CAPÍTULO I dessa dissertação; e (2) avaliar se a disposição irregular de resíduos sólidos no lixão promove a contaminação do solo por metais pesados e amplia o potencial de difusão para os demais componentes da bacia hidrográfica, o que será abordado no CAPÍTULO II dessa dissertação.

REFERÊNCIAS

ABICHOU, T.; KORMI, T.; YUAN, L.; JOHNSON, T.; FRANCISCO, E. Modeling the effects of vegetation on methane oxidation and emissions through soil landfill final covers across different climates. *Waste Management*, v. 36, p. 230–240, 2015.

ADAMCOVÁ, D.; VAVERKOVÁ, M. D.; BARTON, S.; HAVLICEK, Z.; BROUSKOVÁ, E. Soil contamination in landfills: a case study of a landfill in Czech Republic. *Solid Earth*, v.7, p. 239-247, 2016.

ALI, S. M.; PERVAIZ, A.; AFZAL, B.; HAMID, N.; YASMIN, A. Open dumping of municipal solid waste and its hazardous impacts on soil and vegetation diversity at waste dumping sites of Islamabad city. *Journal of King Saud University – Science*, v. 26, p. 59–65, 2014.

AL-YAQOUT, A. F.; HAMODA, M. F. Evaluation of landfill leachate in arid climate - a case study. *Environment International*, v. 29, p. 593-600, 2003.

ANIKWE, M. A. N.; NWOBODO, K. C. A. Long term effect of municipal waste disposal on soil properties and productivity of sites used for urban agriculture in Abakaliki, Nigeria. *Bioresource Technology*, v. 83, p. 241–250, 2002.

ARAÚJO, C. S. Qualidade do solo da camada de cobertura final em área de disposição de resíduos no semiárido tropical. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária – PPgES, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13896: aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação - procedimentos. Rio de Janeiro, 1997.

BARBOSA, J. E. de L.; MEDEIROS, E. S. F.; BRASIL, J.; CORDEIRO, R. da S.; CRISPIM, M. C. B.; SILVA, G. H. G. da. Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 24, n. 1, p. 103-118, 2012.

BELI, E.; NALDONI, C. E. P.; OLIVEIRA, A. C.; SALES, M. R.; SIQUEIRA, M. S. M. de; MEDEIROS, G. A. de; HUSSAR, G. J.; REIS, F. A. G. V. Recuperação da área degradada pelo lixão Areia branca de Espírito Santo do Pinhal – SP. *Eng. ambient. - Espírito Santo do Pinhal*, v. 2, n. 1, p. 135-148, jan/dez 2005.

BOZKURT, S.; SIFVERT, M.; MORENO, L. NERETNIEKS, I. The long-term evolution of and transport processes in a self-sustained final cover on waste deposits. *The Science of the Total Environment*, v. 271, p 145-168, 2001.

BRASIL. Lei 6.938 de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm> Acesso em: 25 mar. 2016.

BRASIL. Lei 9.605 de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm> Acesso em: 25 mar. 2016.

BRASIL. Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 25 mar. 2016.

BRASIL. Senado Federal. PARECER Nº 385, DE 2015. Redação final do Projeto de Lei do Senado nº 425 de 2014. Disponível em: <<http://legis.senado.leg.br/mateweb/arquivos/mate-pdf/170495.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2016.

CORRÊA, R. S.; BENTO, M. A. B. Qualidade do substrato minerado de uma área de empréstimo revegetada no Distrito Federal. Revista Brasileira Ciência do Solo, v. 34, p.1435-1443, 2010.

EKHOLM, P.; LEHTORANTA, J. Does control of soil erosion inhibit aquatic eutrophication? Journal of Environmental Management, v. 93, p. 140 – 146, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2013. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Embrapa Solos. Solos do Nordeste. Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento de Recife, 2014. 14p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Levantamento Exploratório-Reconhecimento de solos do Rio Grande do Norte, 1971. Escala: 1:500.000. Disponível em <<http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/rn/olhodaguadoborges.pdf>> Acesso em: 19 abr. 2016.

FORBID, G. T.; BUSCH, G.; GHOGOMU, J. N.; FREY, R. Open waste burning in Cameroon cities: An environmental impact analysis. Environmentalist, v.31, n. 3, p. 254–262, sept, 2011.

KAWAHIGASHI, F.; MENDES, M. B.; ASSUNÇÃO JUNIOR, V. G. da; GOMES, V. H.; FERNANDES, F.; HIROOKA, E. Y.; KURODA, E. K. Pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário com carvão ativado. Artigo técnico. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 19, n. 3, p. 235-244, 2014.

KORF, E.P.; MELO, E.F.R.Q.; THOMÉ, A.; ESCOSTEGUY, P.A.V. Retenção de metais em solo da antiga área de disposição de resíduos sólidos urbanos de Passo Fundo- RS. Revista de Ciências Ambientais, v. 2, n. 2, p. 43-60, 2008.

LIMA, R. L. S.; SEVERINO, L. S.; SOFIATTI, V.; GHEYI, H. R.; ARRIEL, N. H. C. Atributos químicos de substrato de composto de lixo orgânico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n.2, p. 185-192, 2011.

LONDE, P.R; BITAR, N.A.B. Importância do uso de vegetação para contenção e combate à erosão em taludes do lixão desativado no município de Patos de Minas (MG). *Perquirere, Patos de Minas*, v. 8, n. 2, p.224-249, 2011.

LOPES, R.L.; MACIEL, F.J.; JUCÁ J.F.T. Avaliação da emissão de metano em aterro experimental de resíduos sólidos na Muribeca/PE-Brasil. *Revista Aids de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, v.5, n.1, p. 107-116, 2012.

OLIVEIRA, F. J. S.; JUCÁ, J. F. T. Acúmulo de metais pesados e capacidade de impermeabilização do solo imediatamente abaixo de uma célula de um aterro de resíduos sólidos. *Eng. Sanit. Ambiental, Rio de Janeiro*, v. 9, n. 3, p. 211-217, jul./set., 2004.

OYGARD, J. K.; MAGE, A.; GJENGEDAL, E. Estimation of the mass-balance of selected metals in four sanitary landfills in Western Norway, with emphasis on the heavy metal content of the deposited waste and the leachate. *Water Research*, v. 38, p. 2851-2858, 2004.

PASTOR, J.; HERNÁNDEZ, A.J. Heavy metals, salts and organic residues in old solid urban waste landfills and surface waters in their discharge areas: Determinants for restoring their impact. *Journal Environmental Management*, v. 95, p. 542-549, 2012.

REDIN, M.; SANTOS, G. F. dos; MIGUEL, P.; DENEGA, G. L.; LUPATINI, M.; DONEDA, A.; SOUZA, E. L. Impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo. *Ciência Florestal, Santa Maria*, v. 21, n. 2, p. 381-392, abr.-jun., 2011.

REMON, E.; BOUCHARDON, J.-L.; CORNIER, B.; GUY, B.; LECLERC, J.-C.; FAURE, O. Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration. *Environmental Pollution*, v. 137, n. 2, p. 316-323, 2005.

SALEM, Z.; HAMOURI, K.; DJEMAA, R.; ALLIA, K. Evaluation of landfill leachate pollution and treatment. *Desalination*, v. 220, p. 108–114, 2008.

VOLPE-FILIK, A.; AGUIRRE JUNIOR, J. H. de; LIMA, A. M. L. P; FERREIRA, F. B. J.; SALIM, M.; FARIA, O. A.; ALVAREZ, I. A. Criação de parques urbanos em aterros sanitários desativados, estudo do aterro Sapopemba, São Paulo, SP. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, v. 2, n. 3, 2007.

CAPÍTULO I

ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO EM LIXÃO DESATIVADO NO SEMIÁRIDO TROPICAL

RESUMO

A degradação do solo causada pela disposição irregular de resíduos sólidos pode afetar outros componentes da bacia hidrográfica caso não sejam implantadas medidas de proteção e recuperação ambiental dessas áreas. A avaliação da qualidade do solo é uma etapa fundamental para o planejamento da recuperação de áreas degradadas pela disposição irregular de resíduos sólidos municipais. O objetivo deste estudo foi avaliar os atributos físicos e químicos do solo em lixão desativado no semiárido tropical a fim de identificar os processos de degradação do solo que precisam ser sanados para a promoção da recuperação ambiental dessas áreas. Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm na área do lixão desativado, na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo e em área sob mata nativa utilizada como referência de qualidade. Foram avaliados os atributos: densidade do solo (D_s) e de partículas (D_p), porosidade total (PT); granulometria; pH, condutividade elétrica (CE), matéria orgânica (MO), fósforo disponível (P), nitrogênio total (N), cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+), acidez trocável e potencial e a partir desses o complexo sortivo do solo. As alterações nos atributos físicos e químicos do solo evidenciam a degradação do solo pela disposição irregular de resíduos sólidos, reduzem a possibilidade de crescimento da vegetação e de recuperação da área degradada. Além disso, a ocorrência de erosão do solo do lixão auxilia a liberação de nutrientes, matéria orgânica e sais para a bacia hidrográfica.

Palavras-chave: degradação do solo, resíduos sólidos, bacia hidrográfica.

CHAPTER I

PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES OF SOIL IN DEACTIVATED DUMPSITE IN TROPICAL SEMIARID

ABSTRACT

Soil degradation caused by irregular disposal of solid waste can affect other watershed's components if protection measures and environmental recovery will not be implemented in these areas. Soil quality evaluation is a fundamental step to planning of degraded areas recovery by irregular disposal of municipal solid waste. The aim of this study was to evaluate the physical and chemical soil attributes in deactivated dumpsite in tropical semiarid to identify soil degradation processes that need to be solved to promote environmental recovery of these areas. Soil samples were collected at depths of 0-20 cm and 20-40 cm on the deactivated dumpsite area, in ephemeral drainage area of Brejo dam and area under native forest used as quality reference. The evaluated attributes were: bulk density (BD) and particles density (PD), total porosity (TP), particle size, pH, electrical conductivity (EC), organic matter (OM), available phosphorus (P), total nitrogen (N), exchangeable cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} and K^{+}), exchangeable and potential acidity and from these the sorption complex soil. Modifications in the physical and chemical soil attributes evidence the soil degradation by irregular disposal of solid waste, reduce the possibility of vegetation's growth and degraded areas recovery. Besides that, the occurrence of dumpsite soil erosion assists the release of nutrients, organic matter and salts to the watershed.

Key words: soil degradation, solid waste, watershed.

1. INTRODUÇÃO

As atividades antrópicas geram grandes volumes de resíduos sólidos. A disposição de resíduos em aterros é a principal forma de destinação nos países desenvolvidos (Xiaoli *et al.*, 2007; Tanthachoon *et al.*, 2008), enquanto que em países em desenvolvimento a deposição em lixões a céu aberto é quase a única forma de eliminação de resíduos sólidos (Regadío *et al.*, 2015).

Os lixões emitem lixiviados e gases de efeito estufa tornando-se um importante passivo ambiental a ser considerado prioridade em programas de recuperação ambiental (Tanthachoon *et al.*, 2008; Lopes *et al.*, 2012). A recuperação de lixões é uma problemática que se encontra em crescente discussão (Araújo, 2014; Sudha *et al.*, 2015). No Brasil, a maior dificuldade na recuperação dessas áreas é imposta no momento da desativação, que envolve apenas a implantação de um substrato mineral sobre o maciço de resíduos e seu simples abandono, sem qualquer planejamento ou medida de controle de erosão e da geração de lixiviados e gases de efeito estufa (Sisinno e Moreira, 1996; Alberte *et al.*, 2005; Lanza, 2009; Araújo, 2014). Dessa prática, resulta a formação de solos de reduzida qualidade que amplia o potencial deste atuar como fonte difusa de contaminação da bacia hidrográfica (Oliveira, 2012; Araújo, 2014). Esse fato se torna ainda mais preocupante ao se considerar a região semiárida tropical, onde os eventos chuvosos são intensos e concentrados em curto período de tempo e os solos se caracterizam por sua baixa profundidade e grande susceptibilidade à erosão, aumentando o risco de assoreamento, eutrofização e contaminação dos corpos aquáticos, sobretudo os superficiais, que constitui um recurso tão escasso na região (Barbosa *et al.*, 2012).

No processo de recuperação de lixões, a constituição do solo de cobertura cumpre um papel decisivo, pois deve favorecer os processos pedogenéticos aproximando as características dessa área ao ambiente natural, buscando a obtenção de um sistema autossustentável (Bozkurt *et al.*, 2001). De fato, a existência de intensas diferenças entre a área dos aterros e os ecossistemas adjacentes tem sido apontada como maior dificuldade a ser solucionada na recuperação nessas áreas (Pastor e Hernández, 2012). Ao longo de vários anos, diversos estudos vêm mostrando as condições de degradação física e química presentes tanto no solo de cobertura dos aterros como nas áreas circunvizinhas (Hernández *et al.*, 1998; Pastor *et al.*, 1993; Pastor e Hernández, 2002; Pastor e

Hernández, 2012). A avaliação dos atributos químicos do solo de lixões desativados revela a presença de contaminantes e sais no solo e nos corpos d'água adjacentes, mesmo naqueles desativados há mais de 20 anos (Pastor e Hernández, 2012). Desse modo, a permanência dessa condição de degradação representa o principal impedimento tanto para a revegetação como para remediação desses solos, medidas indispensáveis a recuperação ambiental dessas áreas. Os autores alertam ainda para os riscos impostos por esses lixões ao ecossistema circundante, o que justifica os esforços crescentes em busca de soluções sustentáveis para a recuperação dessas áreas (Pastor e Hernández, 2012).

Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar os atributos físicos e químicos do solo em lixão desativado no semiárido tropical a fim de identificar os processos de degradação do solo que precisam ser sanados para a promoção da recuperação ambiental dessas áreas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O lixão desativado do município de Olho D'água do Borges está localizado na mesorregião Oeste Potiguar do Estado do Rio Grande do Norte, situado nas coordenadas geográficas 5°57'32.13" de latitude sul e 37°43'47.19" de longitude oeste (Figura 1). O município possui área de 141,17 km² e densidade demográfica de 30,42 hab/km², com população estimada em 2015 de 4.370 habitantes (IBGE, 2016).

A área de estudo está inserida na bacia hidrográfica Apodi/Mossoró (14.276,00 km²) (SEMARH, 2016a) e subbacia do Açude do Brejo (102 km²) (SEMARH, 2016b) (Figura 1).

O clima da região é do tipo BSh (estepe) (Kottek *et al.*, 2006), quente e seco, com período chuvoso entre fevereiro e abril, e precipitação pluviométrica anual média de 754,6 mm. Dados da série histórica (1991 – 2015) de precipitação no município foram fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN).

O solo da área de estudo é classificado como Neossolo Regolítico (EMBRAPA, 1971; EMBRAPA, 2013). A formação vegetal é a caatinga hiperxerófila.

O lixão possui uma área de 1,69 ha e limita-se ao norte com a Rodovia RN 117, ao leste com o Açude do Brejo, ao sul e oeste com áreas de vegetação nativa de propriedades particulares. Distancia-se do Açude do Brejo cerca de 302 m (Figura 1) e 1835,5 m do início da zona urbana do município. O lixão de Olho D'água do Borges esteve em atividade durante nove anos, de 2005 a 2014, e está desativado há aproximadamente dois anos, ocasião em que foi iniciada a cobertura final do maciço de resíduos. O substrato mineral usado para cobrir o maciço de resíduos foi retirado de áreas de passagem molhado (zonas onde são feitas passagens ou barramentos provisórios que permitam a passagem dos veículos em épocas de chuva) e outras áreas de empréstimo dentro do município (dados da Secretaria Municipal de Meio Ambiente). Destaca-se a heterogeneidade da cobertura utilizada no recobrimento e a ação do revolvimento do material depositado devido a diferenças na coloração do substrato (Apêndice – Fotografia 1).

O lixão está localizado na área de drenagem a montante do Açude do Brejo, que é utilizado para dessedentação animal, irrigação, pesca e uso na indústria cerâmica (Figura 1). O Açude do Brejo está situado na cota 141 m enquanto que o lixão está na cota 150 m de altitude (Figura 1). Dessa forma, o açude recebe a água de escoamento superficial do lixão a partir da área de drenagem efêmera e pode receber o lixiviado a partir do escoamento subsuperficial, principalmente na ocorrência de chuvas intensas características da região semiárida tropical.

O Açude do Brejo foi construído em 1976 pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Norte (DER), pertence à bacia hidrográfica Apodi/Mossoró, possui capacidade para armazenar 6,45 milhões de metros cúbicos de água, com profundidade máxima de 13,4 m, portanto atinge 180,67 hectares de área de bacia hidráulica (SEMARH, 2016b).

A qualidade da água do Açude do Brejo é monitorada periodicamente pelo Programa Água Azul (Programa Água Azul, 2009a, 2009b, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015), sendo enquadrado como água doce classe 2 da Resolução CONAMA nº 357 de 2005 (CONAMA, 2005). Os usos que podem ser adotados para águas doce classe 2 vão de abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; proteção das comunidades aquáticas; recreação de contato primário; irrigação; a aquicultura e a atividade de pesca (CONAMA, 2005).

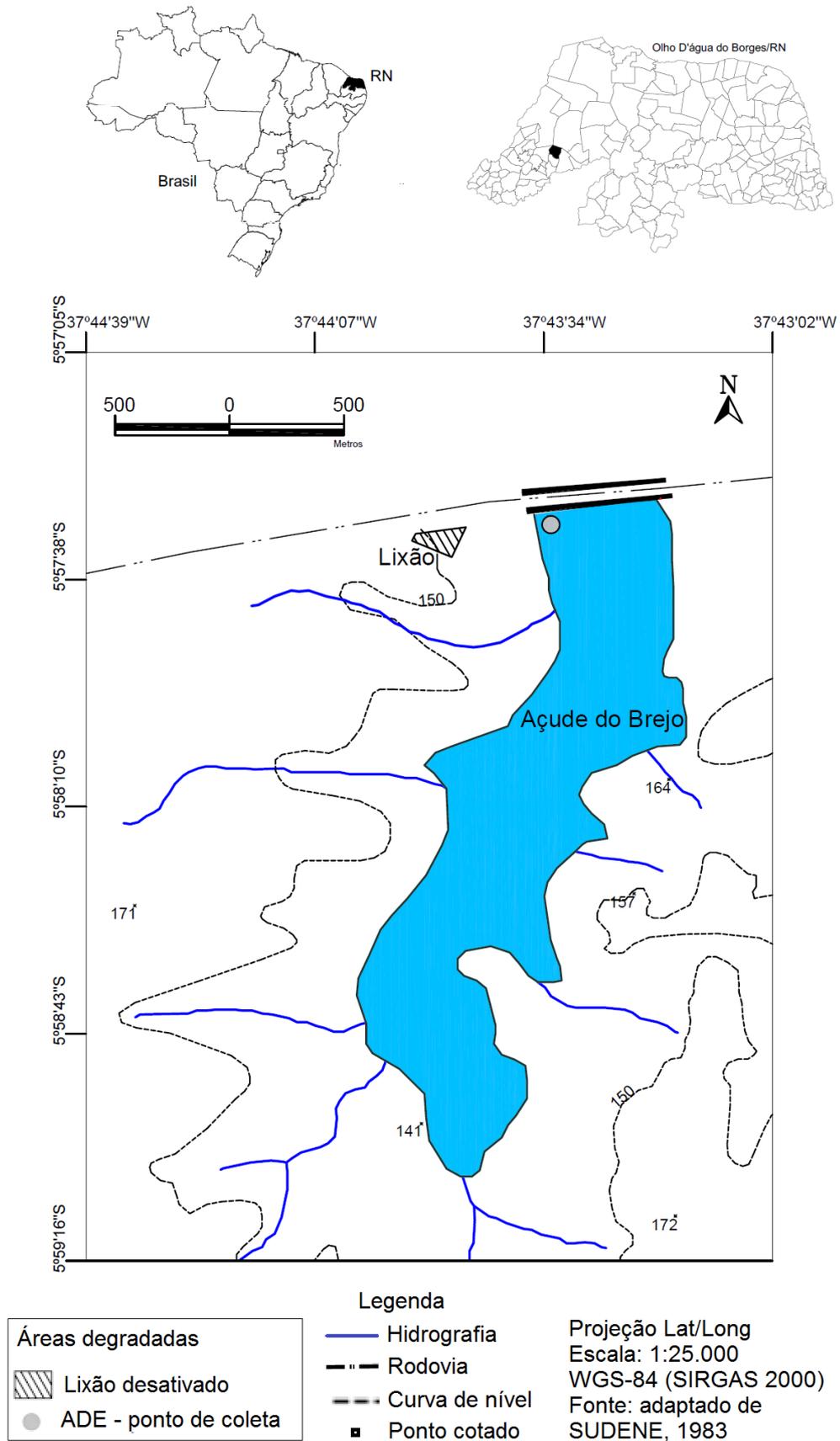


Figura 1. Localização da área do lixão desativado no município de Olho D'água do Borges e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) com curvas de nível.

2.2 Coleta das amostras de solo

A coleta das amostras de solo foi realizada em um caminho no formato de zig-zag e com pontos de coleta demarcados aleatoriamente (EMBRAPA, 1999). Este procedimento foi repetido três vezes formando caminhos diferentes visando à coleta de três repetições representativas de cada ambiente estudado.

Como no lixão desativado o substrato de recobrimento do maciço de resíduos era heterogêneo, a área foi dividida em três glebas de colorações de solo distintas e de cada gleba foram coletadas seis amostras simples na profundidade de 0-20 cm para cada repetição, ao final as 18 amostras simples de cada repetição formaram uma amostra composta de aproximadamente 500 g cada. Em cada escavação simples foram coletadas amostras também na profundidade de 20-40 cm, entretanto, devido à proximidade dos resíduos com a superfície, apenas 15 pontos foram coletados para cada repetição nessa profundidade. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente etiquetados, lacrados, embalados e armazenados em temperatura ambiente, transportados para UFRN e encaminhadas para a realização das análises físicas e químicas. Na fase de preparação para análise, o solo foi seco ao ar, posteriormente destorroado e passado em peneira de 2 mm de abertura de malha para a retirada da terra fina seca ao ar (TFSA), a qual foi submetida a análises laboratoriais (EMBRAPA, 2009).

Foi selecionada uma área com vegetação nativa com pouca ou nenhuma interferência antrópica e mesma classe do solo do lixão desativado a fim de servir como referência de qualidade ambiental do solo. Esta área está situada a 4 km da área do lixão, nas coordenadas geográficas 5°58'20.10" de latitude sul e 37°41'45.16" de longitude oeste. Foram coletadas cinco amostras simples para compor cada amostra composta de 0-20 cm e de 20-40 cm, foram formadas assim três repetições para cada profundidade.

A fim de verificar a possibilidade de influência do lixão na qualidade do solo da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo, diante da proximidade do lixão ao Açude do Brejo, foram coletadas também amostras de solo da área de drenagem efêmera do açude a fim de caracterizar o potencial do solo de atuar como fonte difusa de contaminação hídrica. Amostras simples de solo foram coletadas de cinco pontos nas duas profundidades, de 0-20 cm e de 20-40 cm, para formar a amostra composta. A partir desse procedimento foram retiradas três repetições.

2.3 Avaliação dos atributos físicos do solo

Com as amostras de solo foram determinadas a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico; densidade do solo pelo método da proveta; granulometria pelo método do densímetro e diagrama triangular simplificado (EMBRAPA, 1997). A porosidade total do solo foi estimada pela relação entre densidade do solo e de partículas (EMBRAPA, 1997).

2.4 Avaliação dos atributos químicos do solo

Os atributos químicos analisados foram: pH em água na relação 1:2,5 (solo:solução); condutividade elétrica; K^+ e Na^+ trocáveis por fotometria de emissão de chama após extração com acetato de amônio (1 M); Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis por espectrofotometria de absorção atômica após extração com acetato de amônio (1 M); e Al^{3+} trocável por titulação após extração com solução de KCl 1 mol L⁻¹; acidez potencial/ H^+ + Al^{3+} por titulação após extração com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0; fósforo disponível por colorimetria após extração com extrator Mehlich-1 (EMBRAPA, 1997; EMBRAPA, 2009). A partir dos resultados obtidos do complexo sortivo foram calculados os valores de soma de bases, capacidade de troca de cátions potencial, saturação por bases, saturação por Al^{3+} e saturação por Na^+ .

O C orgânico foi determinado pelo método colorimétrico e pelo Walkley-Black modificado (EMBRAPA, 2009). A matéria orgânica foi estimada através do produto do valor de carbono orgânico por 17,24, a partir da curva de calibração, considerando que o húmus contém aproximadamente 58% de carbono (EMBRAPA, 2009).

Para determinação de nitrogênio total, amostras de solo foram submetidas à digestão sulfúrica (Malavolta *et al.*, 1989) e o nitrogênio posteriormente foi dosado no extrato por meio de destilação Kjeldahl (EMBRAPA, 1999).

2.5 Cálculo das taxas de aumento e redução dos atributos físicos e químicos do solo

As taxas de aumento e redução dos atributos físicos e químicos das áreas degradadas, de lixão e de drenagem efêmera do Açude do Brejo, com relação a mata nativa, foram estimadas obedecendo a relação: taxa (%) = ((teor da área degradada – teor da mata nativa) / teor da mata nativa) * 100.

2.6 Análises estatísticas dos dados

A estatística descritiva dos atributos físicos e químicos dos solos foi realizada para aprimorar a compreensão quanto à variabilidade dos dados gerados do lixão desativado de Olho D'água do Borges/RN, da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo sob influência direta do lixão e respectiva área de referência sob mata nativa (SAS v.8, 1999; GraphPad Prism v.6.01, 2012).

Os atributos físicos e químicos foram utilizados para análise de componentes principais (ACP), utilizando o PC-ORD[®] v.6 (McCune e Mefford, 2011) e também para a correlação de Pearson, a fim de identificar as relações entre as variáveis dependentes (SAS v.8, 1999).

3. RESULTADOS

Os solos das áreas estudadas apresentaram predominância da fração granulométrica areia (Figura 2). Os teores de silte e argila foram superiores na camada subsuperficial de todos os ambientes. A classe textural variou apenas entre a superfície do solo do lixão e da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo, classificados como areia franca, com relação ao solo da mata nativa de classe franco arenosa. O maior teor da fração argila foi encontrado na subsuperfície na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo enquanto que no lixão, o teor de argila foi menor tanto em superfície quanto em subsuperfície (Figura 2).

Os solos do lixão e da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo apresentaram menores Ds e maior PT, tanto na superfície como em subsuperfície (Figura 3a, 3c).

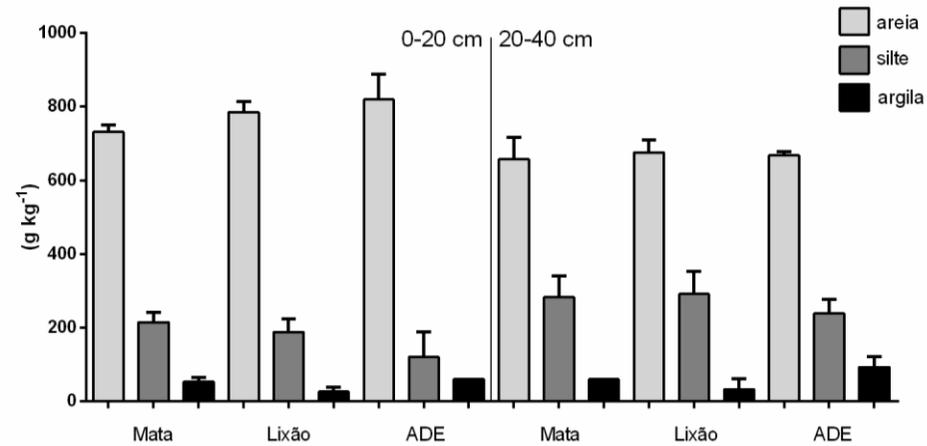


Figura 2. Teores de areia, silte e argila do solo de área degradada pela disposição irregular de resíduos sólidos e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) em comparação a mata nativa no município de Olho D'água do Borges/RN. (As barras equivalem à média de três amostras e o desvio padrão).

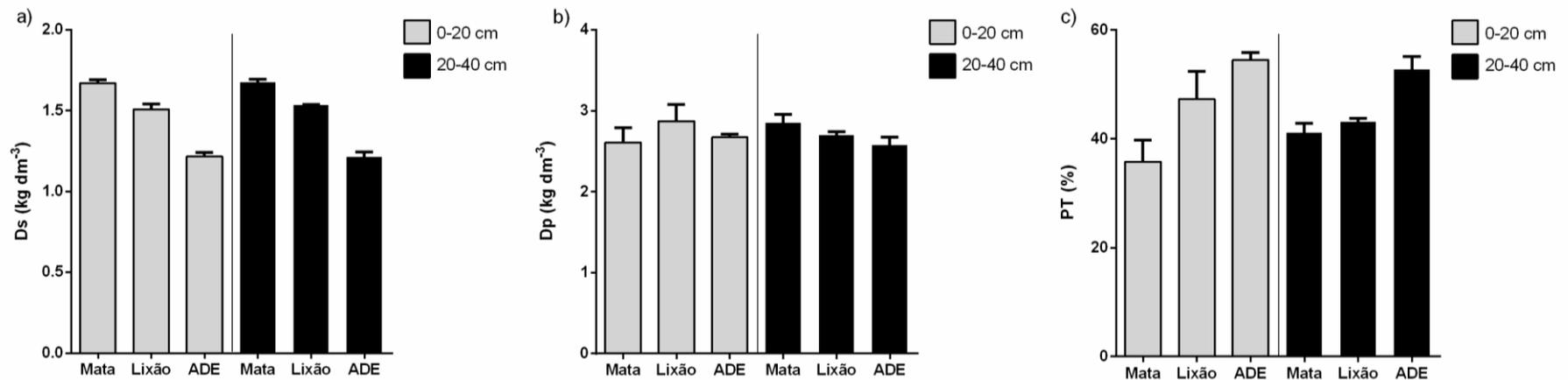


Figura 3. Atributos físicos do solo de área degradada pela disposição irregular de resíduos sólidos e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) em comparação a mata nativa no município de Olho D'água do Borges/RN. (As barras equivalem à média de três amostras e o desvio padrão). Legenda: densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp) e porosidade total (PT).

Apesar da maior concentração de argila na subsuperfície do solo da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (Figura 2), a Dp dessa camada foi reduzida (Figura 3b).

O solo do lixão apresentou reação alcalina e CE mais elevada (Figura 4). O maior incremento da condutividade elétrica (CE) do solo do lixão ocorreu em subsuperfície, atingindo cerca de 875%. Foi observada a elevação dos teores dos cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+) de 38 – 1071% com relação à mata nativa, e redução da acidez potencial (H^+ + Al^{3+}) do solo do lixão (Figura 4). O aumento do pH do solo do lixão foi correlacionado positivamente com CE ($r=0,97^{**}$), K^+ ($r=0,78^*$), e PST ($r=0,90^{**}$).

No solo do lixão houve elevação na soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica potencial (CTCp) (Figura 4h) e saturação por bases (V%) (Figura 5a) em relação à mata nas duas profundidades estudadas.

O solo do lixão apresentou redução de 42% no teor de matéria orgânica na superfície e elevação de 122% em subsuperfície com relação à mata nativa. Na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo, o teor de matéria orgânica é maior que na mata nativa e mais uniforme entre superfície e subsuperfície. Houve correlação positiva entre o teor de matéria orgânica e fósforo do lixão ($r = 0,96^{**}$).

Maiores médias de fósforo foram encontradas no solo do lixão em comparação à mata nativa nas duas profundidades, com elevação de 924% em superfície e 3192% em subsuperfície, representando o maior percentual de elevação entre os atributos. O teor de N no lixão foi menor na superfície 36%, porém 91% maior na subsuperfície em comparação ao solo da mata, o que mais uma vez indica o revolvimento dos resíduos junto a essa camada, uma vez que a fonte de nitrogênio do solo é orgânica.

Na camada superficial do solo do lixão, os atributos pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ trocáveis, CTCp (Figura 4), V% (Figura 5a), e P disponível (Figura 5c) apresentaram incrementos, enquanto a acidez potencial, teor de MO e N foram reduzidos. Na camada subsuperficial, os atributos químicos analisados foram incrementados, com exceção da acidez potencial.

Embora possua maiores teores dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ trocáveis e CE quando comparado ao solo da mata nativa, o solo da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo apresentou pH ácido, inferior ao da mata nativa (Figura 4). O aumento na acidez potencial (H^+ + Al^{3+}) do solo da área de drenagem efêmera do

Açude do Brejo aliado a detecção de $0,05 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} trocável pode explicar a maior acidez do solo da área de drenagem efêmera do açude. A maior concentração de cátions e maior acidez potencial do solo da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo resultou numa maior capacidade de troca catiônica potencial (CTCp) quando comparado as duas profundidades do solo da mata nativa. Esse resultado justifica a menor saturação por bases (V%) desses solos (Figura 5a).

O teor de fósforo disponível na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo aumentou apenas em superfície, enquanto o teor de nitrogênio foi superior nas duas profundidades. Foi encontrada correlação positiva e altamente significativa entre os teores disponíveis de fósforo e a MO no solo na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo ($r=0,85^{**}$), o que indica que o fósforo está sendo disponibilizado no solo a partir da decomposição dos resíduos orgânicos.

Ao analisar as taxas de aumento e redução dos atributos do solo da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo com relação à mata nativa observa-se que o teor de fósforo apresentou 259% de elevação em superfície. Os teores de bases trocáveis Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ aumentaram de 41% a 144%. A CE e acidez potencial aumentaram 100% e 213% em superfície, respectivamente. Para a MO e N foram encontradas taxas de aumento de 28% e 31% em superfície, respectivamente.

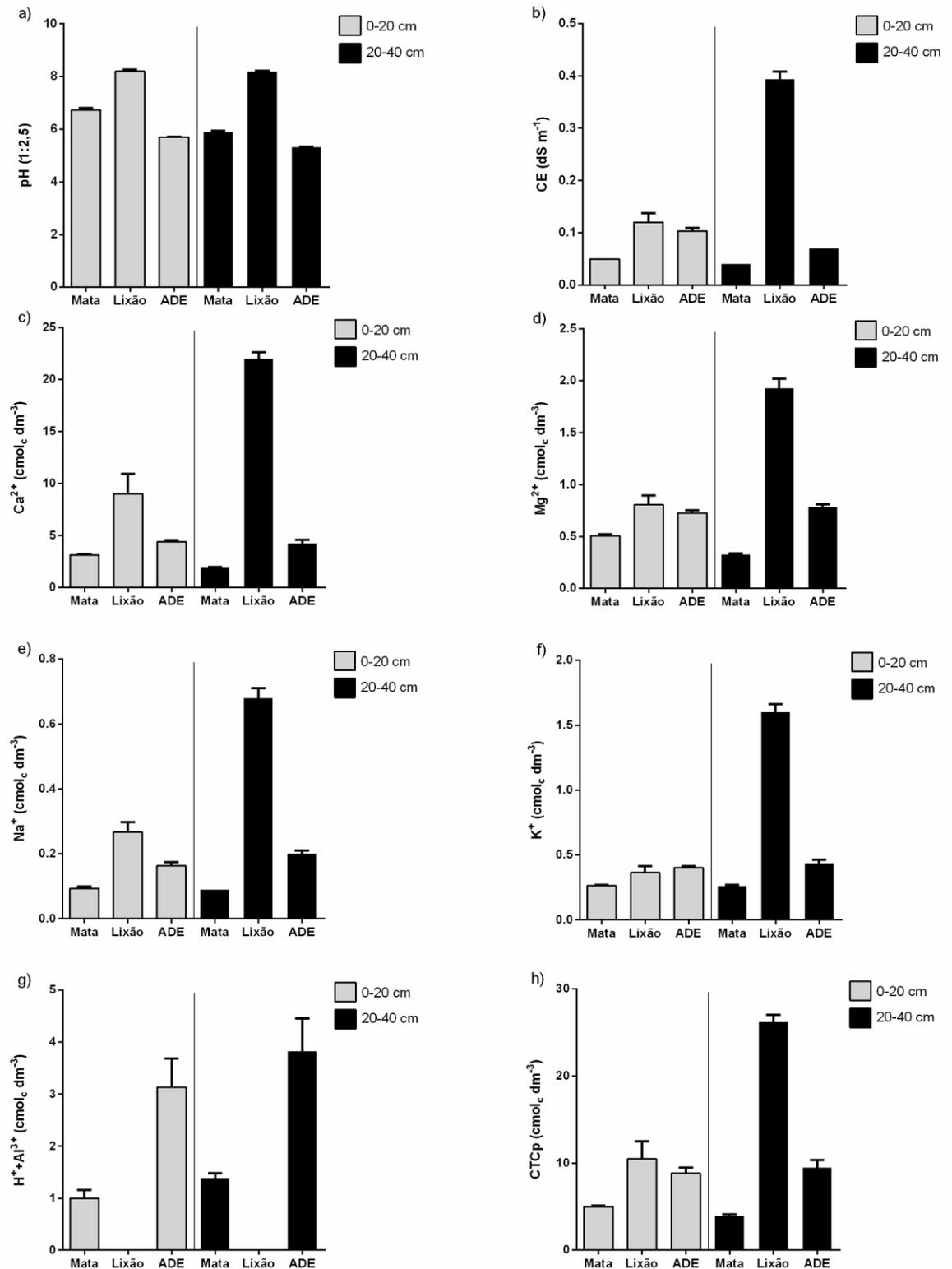


Figura 4. Complexo sortivo do solo em área degradada pela disposição irregular de resíduos sólidos e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) em comparação a mata nativa no município de Olho D'água do Borges/RN. (As barras equivalem a média de três amostras e o desvio padrão). Legenda: condutividade elétrica (CE) e capacidade de troca catiônica potencial (CTCp).

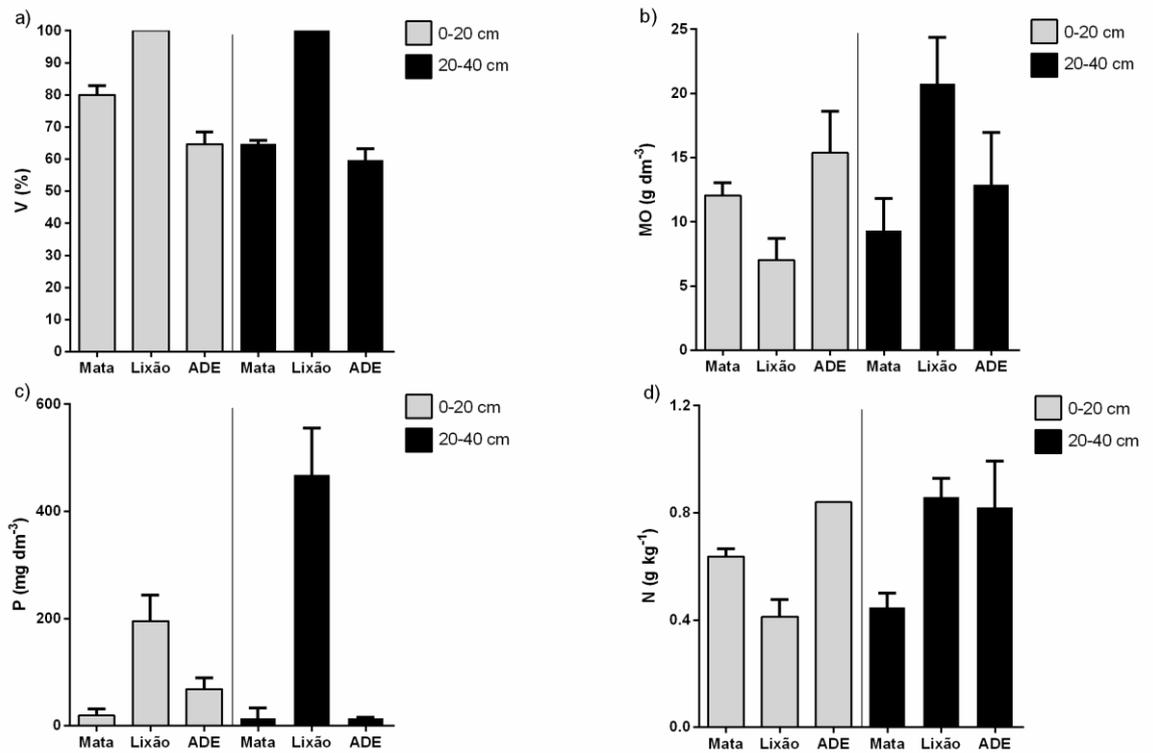


Figura 5. Atributos químicos do solo de área degradada pela disposição irregular de resíduos sólidos e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) em comparação a mata nativa no município de Olho D'água do Borges/RN. (As barras equivalem a média de três amostras e o desvio padrão). Legenda: saturação por bases (V%), matéria orgânica (MO), fósforo disponível (P) e nitrogênio total (N).

A Análise de Componentes Principais dos atributos físicos e químicos do solo do lixão desativado, da mata nativa e da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo de Olho D'água do Borges/RN utilizando 17 atributos do solo explicou 71,70% da variabilidade dos dados nos dois eixos analisados (eixo 1: 48,15%, $p=0,001$ e eixo 2: 23,55%, $p=0,001$). As variáveis mais importantes para a ordenação do primeiro eixo foram Ca (-0,982), Na (-0,976), CE (-0,974), Mg (-0,960), CTCp (-0,943), K (-0,934), P (-0,872), pH (-0,768) e argila (0,636). E para o segundo eixo as variáveis mais importantes foram Ds (0,878), N (-0,841), H + Al (-0,725), PT (-0,65), MO (-0,590) e Dp (0,530) (Figura 6).

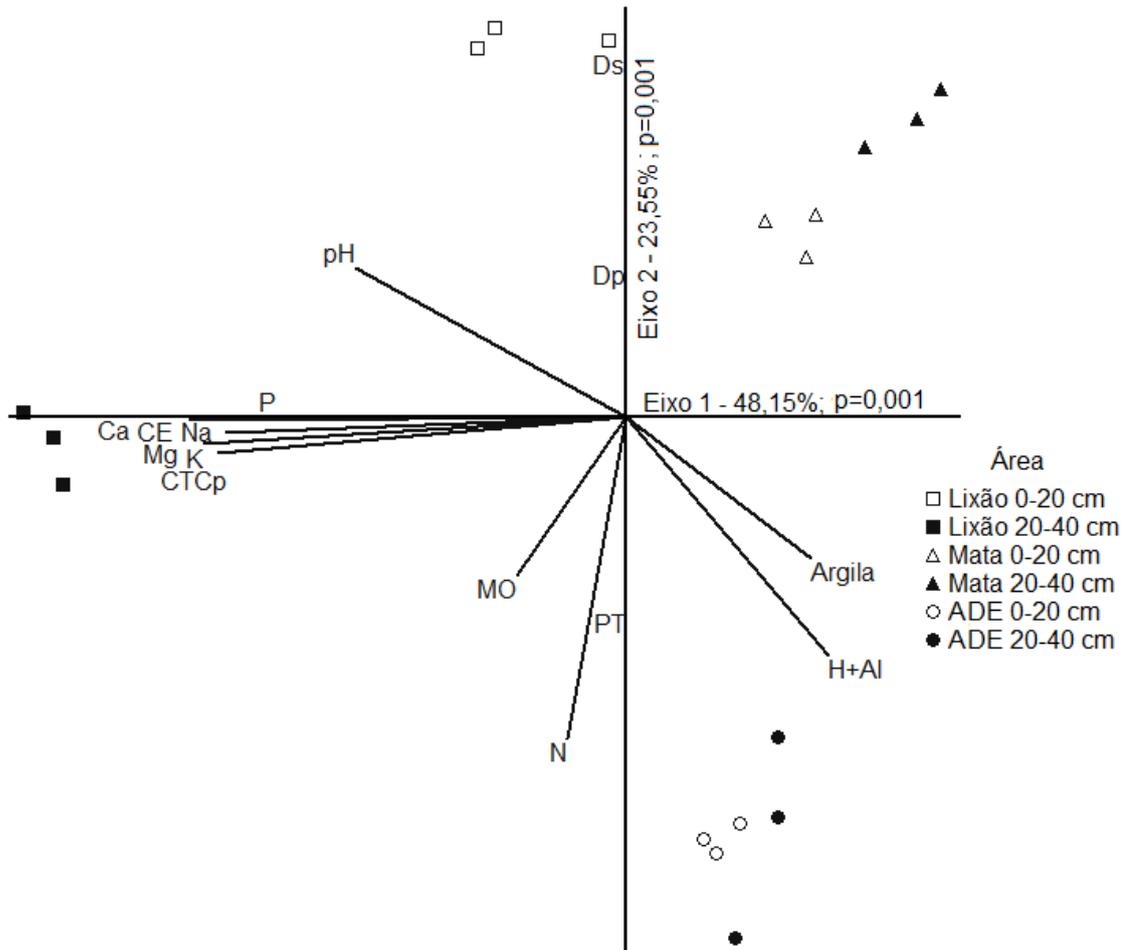


Figura 6. Análise de Componentes Principais dos atributos físicos e químicos dos solos das áreas estudadas sob mata nativa, lixão e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) localizados no município de Olho D'água do Borges/RN. Legenda: densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp), porosidade total (PT), potencial hidrogeniônico (pH), cálcio trocável Ca^{2+} (Ca), sódio trocável Na^+ (Na), fósforo disponível (P), condutividade elétrica (CE), potássio trocável K^+ (K), magnésio trocável Mg^{2+} (Mg), capacidade de troca catiônica potencial (CTCp), matéria orgânica (MO), nitrogênio total (N) e acidez potencial (H+Al).

A ACP do eixo 2 associa o teor de acidez potencial ao ambiente da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo. Foi possível verificar a heterogeneidade entre as camadas superficial e subsuperficial do solo no lixão. Na profundidade de 20-40 cm o lixão está associado positivamente com os cátions Ca, Mg, Na e K e também com P, CE e CTCp. A superfície do lixão está associado positivamente com a densidade do solo e de partículas e negativamente com PT, MO e N.

A Análise dos Componentes Principais do eixo 2 mostra a relação positiva entre matéria orgânica, nitrogênio e porosidade total (PT), associados positivamente com a área de drenagem efêmera do Açude do Brejo e com a subsuperfície do lixão

e negativamente associados com a mata nativa e com a superfície do lixão (Figura 6).

4. DISCUSSÃO

O uso da área em estudo para a disposição irregular de resíduos sólidos urbanos no solo por nove anos resultou na alteração de atributos físicos e químicos dos solos da região. Ao considerar o mais abrangente conceito de degradação ambiental que equivale a qualquer alteração adversa do meio ambiente (Brasil, 1981), é possível concluir que as alterações dos atributos do solo promovem perda de qualidade e geram processo de degradação ambiental, que podem ser responsáveis por danos muitas vezes irreversíveis ao ecossistema. Mesmo após dois anos de desativação não houve aproximação desse solo ao solo natural, o que mostra a necessidade de intervenção de técnicas que promovam a recuperação ambiental desse solo.

A partir da avaliação dos atributos físicos e químicos do solo da área, pode-se dizer que os processos de degradação do solo mais evidentes na área do lixão são a erosão e a sobrecarga do solo por nutrientes e matéria orgânica, ampliando o potencial do solo atuar como fonte difusa de contaminação dos demais componentes da bacia hidrográfica. Essa difusão é ainda mais reforçada pelo fato de solos arenosos degradados serem considerados solos drenos com baixo poder de tamponamento (Sheoran *et al.*, 2010).

A modificação da textura de franco arenosa presente na área de referência para areia franca na superfície do solo das áreas degradadas pode ter ocorrido devido a: (1) depósito de sedimento arenoso na superfície no solo; (2) perda erosiva de partículas finas; ou (3) translocação dessas frações mais finas para subsuperfície.

Possivelmente, o mecanismo que provocou a modificação de textura foi diferente entre as duas áreas de estudos. O aporte de sedimentos arenosos durante o recobrimento do maciço de resíduos aliado ao carreamento das partículas mais finas (silte e argila) a partir de eventos erosivos parece predominar na área do lixão, enquanto que a área de drenagem efêmera do Açude do Brejo recebe as partículas finas trazidas pelo escoamento superficial no lixão e acumula a argila em

subsuperfície através da translocação que parece ser o mecanismo dominante nessa área.

No solo do lixão, Ds e teor de argila são reduzidos nas duas profundidades, Dp aumenta em superfície enquanto diminui em subsuperfície, o teor de areia e a PT aumentam nas duas profundidades. A associação entre maior porosidade total e menor Ds permite maior fluxo de solução e de gases no solo, o que amplia o risco de disseminação de contaminantes a partir da área degradada pelo lixão.

Na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo, o solo apresenta aumento no teor de argila, porém, redução da densidade de partículas em subsuperfície, o que pode indicar que além da translocação de argila, esteja ocorrendo a translocação de colóides orgânicos trazidos na água de escoamento superficial do lixão em direção a área de drenagem efêmera do Açude do Brejo. Vale salientar que associado aos maiores teores de argila na camada subsuperficial desse solo, que pode indicar a translocação da argila aportada na superfície desse solo pela erosão do solo no lixão, estão menores densidades de partículas, que indica incremento de sólidos leves como a matéria orgânica, o que pode ser resultante da mistura desse solo aos resíduos orgânicos ali depositados.

De fato, a declividade entre a área do lixão com relação ao Açude do Brejo permite a constatação de que a elevação dos teores de areia na superfície da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo está relacionada à deposição de material decorrente de erosão hídrica e eólica. A proporção de material grosseiro em área de lixão é maior que em áreas não afetadas e está relacionada ao material utilizado na cobertura e às áreas íngremes que favorecem o escoamento superficial (Hernández *et al.*, 1998; Pastor e Hernández, 2012).

Semelhante ao observado em Anikwe e Nwobodo (2002), as densidades do solo do lixão nas profundidades analisadas foram de 9 - 10% menores do que na área de mata nativa. Essa diferença pode estar relacionada aos componentes orgânicos e inorgânicos presentes nos resíduos depositados (Anikwe e Nwobodo, 2002). Em adição aos sedimentos carregados através da erosão, tem-se o aporte de solução do escoamento que chegando ao solo da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo eleva o teor de fósforo, matéria orgânica e nitrogênio na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo com relação à mata nativa.

Os menores teores de argila e matéria orgânica na superfície do solo do lixão refletem indícios de erosão e a elevação do teor de MO na subsuperfície indica

mistura com resíduos orgânicos em decomposição no maciço de resíduos. A elevação de MO pode também estar relacionada à ocorrência de revolvimento do maciço de resíduo com a camada de cobertura durante a desativação do lixão.

A presença de maiores teores de argila e matéria orgânica pode estar relacionada a maior presença de vegetação na área de referência de qualidade (Ali *et al.*, 2014). Portanto, a ausência da vegetação no lixão provoca redução no teor de matéria orgânica, e facilita as perdas erosivas de argila.

Na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo, o solo apresentou teores de nutrientes mais elevados em superfície, evidenciando o aporte de nutrientes a partir da área do lixão. O aumento nos teores de areia e PT na superfície pode explicar a translocação de argila para subsuperfície. A uniformidade entre o teor de MO na área de drenagem efêmera do Açude do brejo nas duas camadas parece indicar que o solo dessa área recebe matéria orgânica a partir do escoamento superficial do lixão e transloca parte dela para a subsuperfície favorecendo a homogeneização do perfil. Essas alterações físicas também estão relacionadas ao aporte de sedimentos a partir da erosão do solo do lixão.

A espessura do solo que recobre o maciço de resíduos na área do lixão não ultrapassa 40 cm. As informações ecológicas que respaldam o crescimento da vegetação estão em torno dos quinze centímetros de solo (Hernández *et al.*, 1998). Porém, as espécies vegetais nativas da região ocupam um volume de solo além dessa espessura o que também torna inviável a revegetação da área. Isso por que, caso as espécies vegetais venham a ocupar espontaneamente a área do lixão essas acessariam com facilidade a camada de resíduos, podendo absorver e translocar para a parte aérea contaminantes, o que permitiria a entrada na cadeia trófica (Remon *et al.*, 2005).

As frações granulométricas do solo do lixão com elevados teores de areia não são adequadas para áreas degradadas pela disposição de resíduos sólidos. Solos com mais de 70% de areia são altamente inadequados para áreas de eliminação de resíduos devido à elevada permeabilidade e possibilidade de lixiviação (Anikwe e Nwobodo, 2002).

Os valores das densidades de partículas dos solos estudados com variação de 2,40 a 3,05 kg dm⁻³ são coerentes com solos de textura arenosa (Figura 3b). A caracterização de Neossolos Regolíticos no semiárido pernambucano apresentou densidade de partículas (Dp) com variação de 2,61 a 2,93 kg dm⁻³ (Santos *et al.*,

2012). Relacionada às densidades obtidas, a porosidade total da mata nativa foi menor do que nas áreas degradadas. Esse resultado é bastante significativo principalmente na área do lixão, uma vez que a maior porosidade promove aumento da percolação de água que, alcançando o maciço de resíduo, provoca a produção de chorume. Devido a característica do solo da região, em adição a topografia da área, esses percolados produzidos após os eventos chuvosos, podem escoar subsuperficialmente em direção ao Açude do Brejo. Nesse caso, além de ser necessário o aumento da espessura da camada de recobrimento dos resíduos como discutido anteriormente, se faz necessário também a implantação de uma camada intermediária com o objetivo de isolamento e impermeabilização do maciço de resíduo, afim de evitar a produção de percolados e gases de efeito estufa e facilitar o processo de revegetação e estabilização da área degradada (ABNT, 1997; Araújo, 2014; Lopes *et al.*, 2012).

O teor de matéria orgânica do solo do lixão aumentou com o aumento da profundidade, percebe-se assim a relação entre o contato do solo com os resíduos aterrados (Anikwe, 2000). Apesar do aumento no teor da matéria orgânica, a porosidade em subsuperfície foi menor que a da superfície, o que mostra que o aporte da matéria orgânica não está promovendo a estruturação do solo, o que mais uma vez evidencia que seu aporte ocorre a partir da decomposição dos resíduos aterrados.

A saturação de bases, capacidade de troca catiônica potencial e teor de matéria orgânica no solo do lixão foram maiores que no solo da área de referência de qualidade, o que é resultado comumente encontrado em área de disposição irregular de resíduos (Anikwe e Nwobodo, 2002; Araújo, 2014).

A área do lixão apresentou elevado pH e condutividade elétrica (CE) em comparação com a área de referência, condição semelhante à observada em Ali *et al.*, (2014). Esses autores também apontam essas alterações químicas no solo como importantes fatores limitantes a revegetação e estabilização da área degradada.

O decréscimo de nitrogênio em profundidade é típico de situação sob vegetação nativa, pois o aporte de resíduos vegetais na superfície do solo promove a decomposição lenta e gradual, a qual garante a constante incorporação de material orgânico no solo (Fracetto *et al.*, 2012).

A presença de N em maior concentração na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo eleva a necessidade de proteção dos mananciais de abastecimento

e na gestão de recursos hídricos com fins de se garantir a qualidade dos recursos hídricos de acordo com os usos propostos.

Investigar a influência da disposição de resíduos sólidos sob a bacia hidrográfica é primordial na gestão de resíduos sólidos e recuperação de áreas degradadas, visto que os diversos componentes do ecossistema podem ser afetados por tal prática que não considera as medidas de engenharia sanitária e ambiental. A proximidade do lixão com o Açude do Brejo, principal corpo d'água do município, utilizado para agricultura, pequenas indústrias e dessedentação animal, dentre outros, pode acarretar danos de difícil recuperação, por exemplo, a adição de metais pesados ao corpo aquático, fósforo, ferro, matéria orgânica e outros componentes que não estão naturalmente presentes nestes ambientes em elevadas quantidades. A área do lixão de Olho D'água do Borges também localiza-se próximo ao perímetro urbano e residências, o que eleva o risco de danos à saúde humana e à qualidade ambiental.

5. CONCLUSÕES

- 1) A disposição irregular de resíduos sólidos degrada a qualidade do solo, acentua a ocorrência de erosão, e provoca a sobrecarga de sais, nutrientes e matéria orgânica no solo.
- 2) Os processos de degradação atuantes no solo do lixão reduzem as chances de desenvolvimento sadio da vegetação e dificulta a recuperação dessas áreas.
- 3) O enriquecimento do solo do lixão por sais, nutrientes e matéria orgânica pode alcançar outros componentes da bacia hidrográfica através da erosão do solo, concorrendo para a redução da qualidade ambiental do ecossistema.

REFERÊNCIAS

ALBERTE, E. P. V.; CARNEIRO, A. P.; KAN, L. Recuperação de áreas degradadas por disposição de resíduos sólidos urbanos. *Diálogos & Ciência – Revista Eletrônica da Faculdade de Tecnologia e Ciências de Feira de Santana*. Ano III, n. 5, jun. 2005. Disponível em: <http://www.ftc.br/revistafsa/upload/15-12-2005_09-24-52_20-06-2005_11-50-14_linkan.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2016.

ALI, S. M.; PERVAIZ, A.; AFZAL, B.; HAMID, N.; YASMIN, A. Open dumping of municipal solid waste and its hazardous impacts on soil and vegetation diversity at waste dumping sites of Islamabad city. *Journal of King Saud University – Science*, v. 26, p. 59–65, 2014.

ANIKWE, M. A. N. Amelioration of a heavy clay loam soil with rice husk dust and its effect on soil physical properties and maize yield. *Bioresource Technology*, v. 74, p. 169-173, 2000.

ANIKWE, M. A. N.; NWOBODO, K. C. A. Long term effect of municipal waste disposal on soil properties and productivity of sites used for urban agriculture in Abakaliki, Nigeria. *Bioresource Technology*, v. 83, p. 241–250, 2002.

ARAÚJO, C. S. Qualidade do solo da camada de cobertura final em área de disposição de resíduos no semiárido tropical. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária – PPGES, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13896: aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação - procedimentos. Rio de Janeiro, 1997.

BARBOSA, J. E. de L.; MEDEIROS, E. S. F.; BRASIL, J.; CORDEIRO, R. da S.; CRISPIM, M. C. B.; SILVA, G. H. G. da. Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 24, n. 1, p. 103-118, 2012.

BOZKURT, S.; SIFVERT, M.; MORENO, L. NERETNIEKS, I. The long-term evolution of and transport processes in a self-sustained final cover on waste deposits. *The Science of the Total Environment*, v. 271, p 145-168, 2001.

BRASIL. Lei 6.938 de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm> Acesso em: 25 mar. 2016.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, p. 58-63.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2013. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2ª ed. rev. ampl. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Levantamento Exploratório-Reconhecimento de solos do Rio Grande do Norte, 1971. Escala: 1:500.000. Disponível em <<http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/rn/olhodaguadoborges.pdf>> Acesso em: 19 abr. 2016.

FRACETTO, F. J. C.; FRACETTO, G. G. M.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J.; SIQUEIRA NETO, M. Estoques de carbono e nitrogênio no solo cultivado com mamona na caatinga. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, p. 1545-1552, 2012.

GraphPad Prism. GraphPad Software, Inc. Version 6.01. La Jolla, CA, USA, 2012.

HERNÁNDEZ, A. J.; ALCAZAR, M. J. A.; PASTOR, J. Some impacts of urban waste landfills on Mediterranean soils. Land Degradation & Development, v. 9, p. 21-33, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades. Olho D'água do Borges. 2016. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=240840&search=rio-grande-do-norte|olho-d`%C3%81gua-do-borges>> Acesso em: 19 abr. 2016.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, v. 15, n.3, p. 259-263, 2006.

LANZA, V. C. V. Caderno Técnico de reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente - Fundação Israel Pinheiro, 2009.

LOPES, R.L.; MACIEL, F.J.; JUCÁ J.F.T. Avaliação da emissão de metano em aterro experimental de resíduos sólidos na Muribeca/PE-Brasil. Revista Aids de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, v.5, n.1, p. 107-116, 2012.

MALAVOLTA, E. *et al.* Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo. Piracicaba - São Paulo, 1989. 201p.: il.

MCCUNE, B.; MEFFORD, M. J. PC-ORD: Multivariate analysis of ecological data, version 6.0. MjM Software Design, Oregon, 2011.

OLIVEIRA, J. N. P. A influência da poluição difusa e do regime hidrológico peculiar do semiárido na qualidade da água de um reservatório tropical. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária – PPgES, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2012.

PASTOR, J.; HERNÁNDEZ, A.J. Heavy metals, salts and organic residues in old solid urban waste landfills and surface waters in their discharge areas: Determinants for restoring their impact. *Journal Environmental Management*, v. 95, p. 542-549, 2012.

PASTOR, J.; HERNÁNDEZ, A. J. Study of sealed landfill soils and their native plant species for the phytoremediation of degraded and polluted soils of central Spain. *Anal. Biol.*, v. 24, p. 159-167, 2002.

PASTOR, J.; URCELAY, A.; OLIVER, S.; HERNÁNDEZ, A. J. Impact of municipal waste on Mediterranean dry environments. *Geomicrobiology Journal*, v. 11, p. 247-260, 1993.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: I Relatório: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de agosto a novembro de 2008, 2009a.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 3º Relatório trimestral: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de abril a julho de 2009, 2009b.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 5º Relatório trimestral: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de outubro de 2009 a março de 2010, 2010.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 7º Relatório trimestral: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de junho a setembro de 2010, 2011.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 9º Relatório trimestral: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de fevereiro a julho de 2011, 2012.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 11º Relatório trimestral: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de setembro a dezembro de 2011, 2013.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 14º Relatório: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais de abril a setembro de 2012, 2014.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 15º Relatório trimestral: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de julho a agosto de 2014, 2015.

REGADÍO, M.; RUIZ, A. I.; RODRÍGUEZ-RASTRERO, M.; CUEVAS, J. Containment and attenuating layers: An affordable strategy that preserves soil and water from landfill pollution. *Waste Management*, v. 46, p.408-419, 2015.

REMON, E.; BOUCHARDON, J.-L.; CORNIER, B.; GUY, B.; LECLERC, J.-C.; FAURE, O. Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration. *Environmental Pollution*, v. 137, n. 2, p. 316-323, 2005.

SANTOS, J. C. B. dos; SOUZA JÚNIOR, V. S. de; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R.; ALMEIDA, M. da C. de; BORGES, L. E. P. Caracterização de neossolos regolíticos da região semiárida do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n.3, p. 683-695, mai-jun, 2012.

SAS Institute. Statistical analysis system: Procedure guide for personal computer. Version 8. Cary, 1999.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (SEMARH/RN). Bacia hidrográfica Apodi/Mossoró. 2016a. Disponível em: <<http://servicos.semarh.rn.gov.br/semarh/sistemadeinformacoes/consulta/cBaciaDetalle.asp?CodigoEstadual=01>> Acesso em: 20 abr. 2016.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (SEMARH/RN). Bacia hidrográfica do Açude do Brejo. 2016b. Disponível em: <<http://servicos.semarh.rn.gov.br/semarh/sistemadeinformacoes/consulta/cResFichaTecnica.asp?IdReservatorio=15>> Acesso em: 20 abr. 2016.

SHEORAN, V.; SHEORAN, A. S.; POONIA, P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, v. 3, n.2, p. 1-20, 2010.

SISINNO, C. L. S.; MOREIRA, J. C. Avaliação da contaminação e poluição ambiental na área de influência do aterro controlado do Morro do Céu, Niterói, Brasil. *Caderno de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v. 12, n.4, p. 515-523, 1996.

SUDENE/CPRM. Carta Topográfica Folha Apodi (SB.24-X-C-VI). 1:25.000. 1983.

SUDHA, R. P.; UMA, R. N.; MEIARAJ, C. Adverse Impact on Soil and Groundwater due to Solid Waste Opendump in Coimbatore Town Panchayats. *International Journal of Chemical Sciences*, v. 13, n. 1, p. 376-388, 2015.

TANTHACHOON N.; CHIEMCHAI SRI, C.; CHIEMCHAI SRI, W.; TUDSRI, S.; KUMAR, S. Methane Oxidation in Compost-Based Landfill Cover with Vegetation during Wet and Dry Conditions in the Tropics. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 58, p. 603–612, 2008.

XIAOLI, C.; SHIMAOKA, T.; XIANYAN, C.; QIANG, G.; YOUCAI, Z. Characteristics and mobility of heavy metals in an MSW landfill: Implications in risk assessment and reclamation. *Journal of Hazardous Materials*, v. 144, p. 485–491, 2007.

CAPITULO II

METAIS PESADOS NO SOLO DE LIXÃO DESATIVADO NO SEMIÁRIDO TROPICAL

RESUMO

O gerenciamento dos resíduos sólidos está entre os maiores problemas enfrentados pelas cidades na atualidade, principalmente quanto à disposição final. A disposição inadequada dos resíduos sólidos urbanos podem provocar inúmeros impactos ao ambiente, dentre eles a contaminação do solo e dos corpos hídricos por metais pesados e a transferência de metais através da cadeia trófica. O objetivo deste estudo foi avaliar os teores de metais pesados no solo de cobertura de lixão após a sua desativação, a fim de verificar a possível ocorrência de contaminação do solo e o potencial de difusão para os demais componentes da bacia hidrográfica. Amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm na área do lixão desativado, na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo e em área sob mata nativa utilizada como referência de qualidade. Foram realizadas análises de pH, porosidade total (PT), matéria orgânica (MO), granulometria e metais disponíveis e totais no solo. O solo do lixão apresentou teores de metais superiores aos do solo da mata nativa. Nas áreas do lixão e de drenagem efêmera do Açude do Brejo, os teores totais de Cu, Zn, Pb e Cd ultrapassaram o VRQ, porém, o valor de investigação preconizados pela legislação brasileira não foi ultrapassado. O resultado da disposição de resíduos sólidos em lixões é um solo multicontaminado. Com o passar do tempo a mobilidade de metais pesados em solos degradados pela disposição irregular de resíduos sólidos eleva o potencial do solo atuar como fonte difusa de contaminação da bacia hidrográfica, principalmente quando há ausência de medida de controle de erosão do solo na área degradada.

Palavras-chave: contaminação do solo, áreas degradadas, resíduos sólidos.

CHAPTER II

HEAVY METALS IN DEACTIVATED DUMPSITE SOIL IN TROPICAL SEMIARID

ABSTRACT

The solid waste management is one of the biggest problems facing cities today, especially regarding the final disposal. The municipal irregular disposal of solid waste can cause numerous impacts on the environment, including soil and water bodies contamination by heavy metals and metal transfer through the food chain. The aim of this study was to evaluate the heavy metals contents in dumpsite cover soil after its deactivation, in order to verify the possible occurrence of soil contamination and the potential to spread to other watershed components. Soil samples were collected at depths of 0-20 cm and 20-40 cm on the deactivated dumpsite area, in ephemeral drainage area of Brejo dam and area under native forest used as quality reference. In soil samples were analyzed pH, total porosity (TP), organic matter (OM), particle size and available and total metals contents in soil. The dumpsite soil showed higher metal content than the native forest soil. In dumpsite and dam's ephemeral drainage area the total contents of Cu, Zn, Pb and Cd exceeded the quality benchmark, however, the investigation value recommended by Brazilian law was not exceeded. The result of the disposal of solid waste in dumpsite is a multicontaminated soil. Over time, the heavy metals mobility in degraded soil by irregular disposal of solid waste raises the soil's potential to act as diffuse source of watershed's contamination, especially when there is no measure of soil erosion control in degraded area.

Key words: soil contamination, degraded areas, solid waste.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os maiores problemas enfrentados pelas cidades na atualidade está o gerenciamento dos resíduos sólidos produzidos, principalmente, no que se refere à sua destinação e disposição final. Condições inadequadas de disposição desses resíduos podem provocar inúmeros impactos ao ambiente, dentre eles a contaminação do solo e dos corpos hídricos por metais pesados.

Em adição a problemática do gerenciamento dos resíduos sólidos produzidos nas cidades é válido ressaltar a questão da desativação inadequada ou abandono de áreas de disposição irregular de resíduos, denominadas de lixão. Essa prática, comum nos municípios brasileiros (Alcântara *et al.*, 2011), culmina na geração de passivos ambientais duradouros, responsáveis pela poluição do ar, do solo e dos recursos hídricos, resultando em riscos à saúde humana (Alcântara *et al.*, 2011).

Mesmo os metais pesados sendo naturalmente onipresentes no solo (Hu e Cheng, 2013), provenientes de fontes naturais como as erupções vulcânicas e o intemperismo do material de origem (Singh e Steinnes, 1994), as atividades antrópicas podem provocar o aumento da concentração e/ou acumulação desses elementos. De fato, a disposição irregular de resíduos causa a elevação dos teores de metais no solo, tais como arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercúrio (Hg), chumbo (Pb), selênio (Se) e zinco (Zn) (Bolan *et al.*, 2014). Isso explica o fato de que em estudos de áreas degradadas pela disposição final de resíduos sólidos, atenção especial está voltada ao risco da contaminação e disseminação de metais pesados no ambiente (Bozkurt *et al.*, 2001; Al-Yaqout e Hamoda, 2003; Remon *et al.*, 2005; Pastor e Hernández, 2012).

Os metais pesados incorporados aos solos por atividades antrópicas podem ser transportados ou seguirem vias de retenção (Alcântara *et al.*, 2011). Dentre as possibilidades estão: ficar retidos no solo; dissolvidos na solução do solo; ou fixados por processos de adsorção, complexação e precipitação (Kabata-Pendias e Pendias, 2001). Além disso, os metais pesados podem ser absorvidos pelas plantas e, assim, serem incorporados a cadeia trófica; ou ainda podem passar para o ar por volatilização ou mover-se para águas superficiais ou subterrâneas (Accioly e Siqueira, 2000; Oliveira e Jucá, 2004; Korf *et al.*, 2008; Cavallet *et al.*, 2013), e consequentemente provocar danos aos organismos vivos (Campos, 2010). Em

áreas de lixão, a migração de metais pesados pode ocorrer através da lixiviação e da água de escoamento superficial para as áreas adjacentes (Cavallet *et al.*, 2013).

Para o semiárido tropical, com precipitações concentradas em curto período do ano, isso é ainda ampliado, pois nessa região predominam solos de textura arenosa e de baixa profundidade como os Neossolos, com elevada susceptibilidade à erosão, ampliando o risco de assoreamento, eutrofização e contaminação de recursos hídricos (Barbosa *et al.*, 2012).

O objetivo deste estudo foi avaliar os teores de metais pesados no solo de cobertura de lixão após a sua desativação, a fim de verificar a possível ocorrência de contaminação do solo e o potencial de difusão para os demais componentes da bacia hidrográfica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O lixão desativado do município de Olho D'água do Borges está localizado na mesorregião Oeste Potiguar do Estado do Rio Grande do Norte, situado nas coordenadas geográficas 5°57'32.13" de latitude sul e 37°43'47.19" de longitude oeste (Figura 1). O município possui área de 141,17 km² e densidade demográfica de 30,42 hab/km², com população estimada em 2015 de 4.370 habitantes (IBGE, 2016).

A área de estudo está inserida na bacia hidrográfica Apodi/Mossoró (14.276,00 km²) (SEMARH, 2016a) e subbacia do Açude do Brejo (102 km²) (SEMARH, 2016b) (Figura 1).

O clima da região é do tipo BSh (estepe) (Kottek *et al.*, 2006), quente e seco, com período chuvoso entre fevereiro e abril, e precipitação pluviométrica anual média de 754,6 mm. Dados da série histórica (1991 – 2015) de precipitação no município foram fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN).

O solo da área de estudo é classificado como Neossolo Regolítico (EMBRAPA, 1971; EMBRAPA, 2013). A formação vegetal é a caatinga hiperxerófila.

O lixão possui uma área de 1,69 ha e limita-se ao norte com a Rodovia RN 117, ao leste com o Açude do Brejo, ao sul e oeste com áreas de vegetação nativa de propriedades particulares. Distancia-se do Açude do Brejo cerca de 302 m (Figura 1) e 1835,5 m do início da zona urbana do município. O lixão de Olho D'água do Borges esteve em atividade durante nove anos, de 2005 a 2014, e está desativado há aproximadamente dois anos, ocasião em que foi iniciada a cobertura final do maciço de resíduos. O substrato mineral usado para cobrir o maciço de resíduos foi retirado de áreas de passagem molhado (zonas onde são feitas passagens ou barramentos provisórios que permitam a passagem dos veículos em épocas de chuva) e outras áreas de empréstimo dentro do município (dados da Secretaria Municipal de Meio Ambiente). Destaca-se a heterogeneidade da cobertura utilizada no recobrimento e a ação do revolvimento do material depositado devido a diferenças na coloração do substrato (Apêndice – Fotografia 1).

O lixão está localizado na área de drenagem a montante do Açude do Brejo, que é utilizado para dessedentação animal, irrigação, pesca e uso na indústria cerâmica (Figura 1). O Açude do Brejo está situado na cota 141 m enquanto que o lixão está na cota 150 m de altitude (Figura 1). Dessa forma, o açude recebe a água de escoamento superficial do lixão a partir da área de drenagem efêmera e pode receber o lixiviado a partir do escoamento subsuperficial, principalmente na ocorrência de chuvas intensas características da região semiárida tropical.

O Açude do Brejo foi construído em 1976 pelo Departamento de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Norte (DER), pertence à bacia hidrográfica Apodi/Mossoró, possui capacidade para armazenar 6,45 milhões de metros cúbicos de água, com profundidade máxima de 13,4 m, portanto atinge 180,67 hectares de área de bacia hidráulica (SEMARH, 2016b).

A qualidade da água do Açude do Brejo é monitorada periodicamente pelo Programa Água Azul (Programa Água Azul, 2009a, 2009b, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015), sendo enquadrado como água doce classe 2 da Resolução CONAMA nº 357 de 2005 (CONAMA, 2005). Os usos que podem ser adotados para águas doce classe 2 vão de abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; proteção das comunidades aquáticas; recreação de contato primário; irrigação; a aquicultura e a atividade de pesca (CONAMA, 2005).

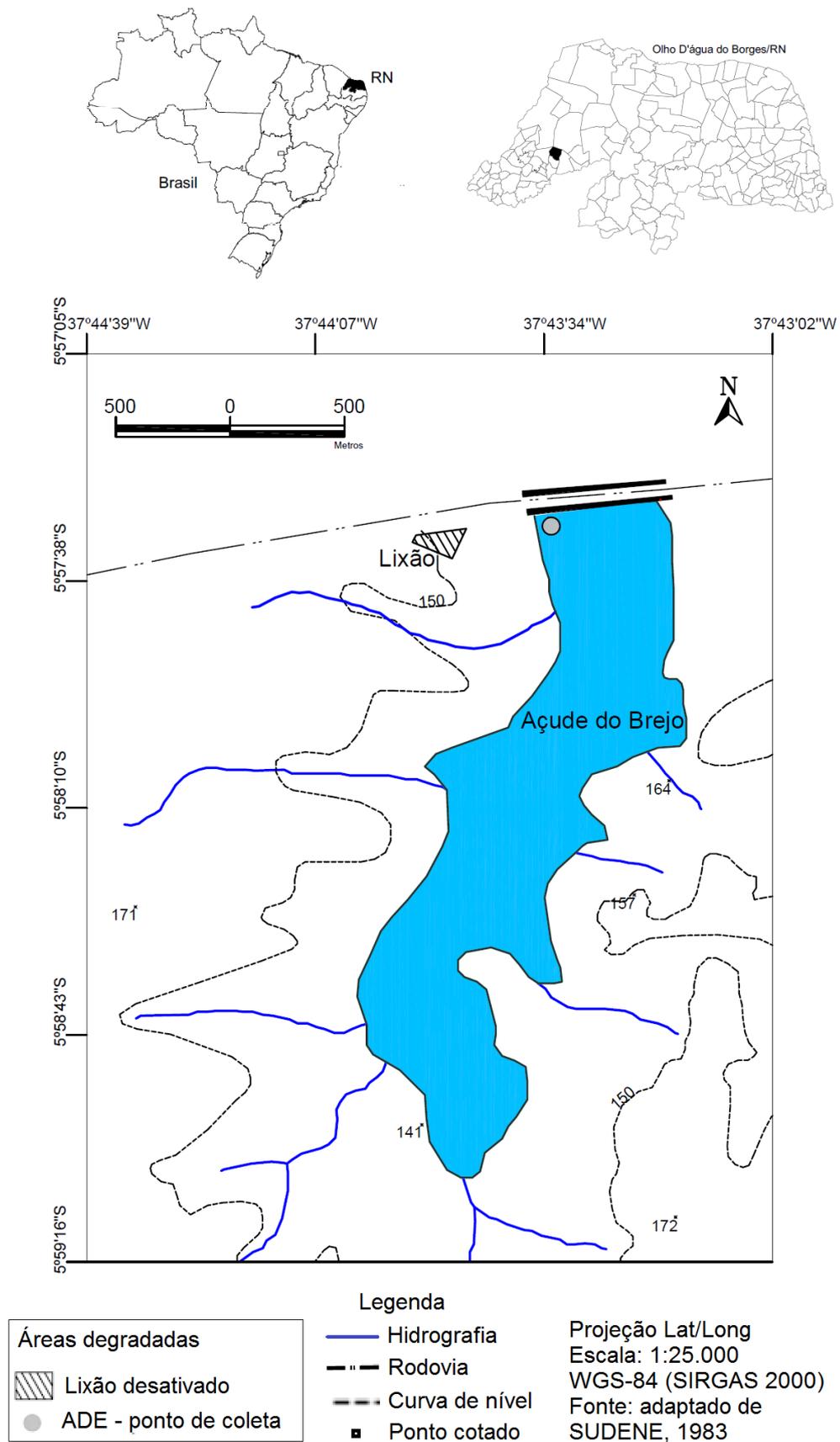


Figura 1. Localização da área do lixão desativado no município de Olho D'água do Borges e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) com curvas de nível.

2.2 Coleta das amostras de solo

A coleta das amostras de solo foi realizada em um caminho no formato de zig-zag e com pontos de coleta demarcados aleatoriamente (EMBRAPA, 1999). Este procedimento foi repetido três vezes formando caminhos diferentes visando à coleta de três repetições representativas de cada ambiente estudado.

Como no lixão desativado o substrato de recobrimento do maciço de resíduos era heterogêneo, a área foi dividida em três glebas de colorações de solo distintas e de cada gleba foram coletadas seis amostras simples na profundidade de 0-20 cm para cada repetição, ao final as 18 amostras simples de cada repetição formaram uma amostra composta de aproximadamente 500 g cada. Em cada escavação simples foram coletadas amostras também na profundidade de 20-40 cm, entretanto, devido à proximidade dos resíduos com a superfície, apenas 15 pontos foram coletados para cada repetição nessa profundidade. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente etiquetados, lacrados, embalados e armazenados em temperatura ambiente, transportados para UFRN e encaminhadas para a realização das análises físicas e químicas. Na fase de preparação para análise, o solo foi seco ao ar, posteriormente destorroado e passado em peneira de 2 mm de abertura de malha para a retirada da terra fina seca ao ar (TFSA), a qual foi submetida a análises laboratoriais (EMBRAPA, 2009).

Foi selecionada uma área com vegetação nativa com pouca ou nenhuma interferência antrópica e mesma classe do solo do lixão desativado a fim de servir como referência de qualidade ambiental do solo. Esta área está situada a 4 km da área do lixão, nas coordenadas geográficas 5°58'20.10" de latitude sul e 37°41'45.16" de longitude oeste. Foram coletadas cinco amostras simples para compor cada amostra composta de 0-20 cm e de 20-40 cm, foram formadas assim três repetições para cada profundidade.

A fim de verificar a possibilidade de influência do lixão na qualidade do solo da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo, diante da proximidade do lixão ao Açude do Brejo, foram coletadas também amostras de solo da área de drenagem efêmera do açude a fim de caracterizar o potencial do solo de atuar como fonte difusa de contaminação hídrica. Amostras simples de solo foram coletadas de cinco pontos nas duas profundidades, de 0-20 cm e de 20-40 cm, para formar a amostra composta. A partir desse procedimento foram retiradas três repetições.

2.3 Análise do solo

As amostras de solo foram submetidas às análises de granulometria pelo método do densímetro e diagrama triangular simplificado (EMBRAPA, 1997), de pH em água (1:2,5) (EMBRAPA, 1999) e dos teores totais e disponíveis dos metais pesados Fe, Mn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn.

Com as amostras de solo foram determinadas a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico; densidade do solo pelo método da proveta e a porosidade total do solo foi estimada pela relação entre densidade do solo e de partículas (EMBRAPA, 1997).

O C orgânico foi determinado pelo método colorimétrico e pelo Walkley-Black modificado (EMBRAPA, 2009). A matéria orgânica foi estimada através do produto do valor de carbono orgânico por 17,24, a partir da curva de calibração, considerando que o húmus contém aproximadamente 58% de carbono (EMBRAPA, 2009).

Os teores disponíveis dos metais pesados foram extraídos do solo com uso do extrator químico Mehlich-1 (De Filippo e Ribeiro, 1997).

Subamostras de solo foram passadas em peneira de 100 mesh de abertura com malha inoxidável. As digestões das amostras foram realizadas pelo método 3051A (USEPA, 1998). Nesse procedimento, a abertura das amostras foi realizada em sistema fechado por 12 minutos na rampa de temperatura, tempo necessário para atingir 180 °C, mantendo-se essa temperatura por mais dez minutos. Em seguida, após resfriamento, as amostras foram vertidas para balões de 50 ml, sendo o volume dos balões preenchidos com água destilada. A leitura dos metais pesados foi realizada no espectrofotômetro de absorção atômica (USEPA, 1998).

2.4 Análise das taxas de aumento e redução dos teores disponíveis e totais de metais pesados

As taxas de aumento e redução dos teores disponíveis e totais de metais pesados das áreas degradadas, lixão e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo, com relação a mata nativa, foram estimadas obedecendo a relação: taxa (%) = ((teor da área degradada – teor da mata nativa) / teor da mata nativa)* 100.

2.5 Análises estatísticas e interpretação dos dados

Análises estatísticas foram realizadas para o aprofundamento científicos dos dados. Para explicar esses dados foi utilizada a estatística descritiva, com análises de média, desvio padrão, valores de mínimo e máximo (SAS v.8, 1999; GraphPad Prism v.6.01, 2012).

A correlação linear de Pearson foi realizada para identificar e discutir as proporções entre os metais pesados e os atributos físicos e químicos do solo (SAS v.8, 1999).

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi realizada com os resultados dos teores disponíveis e totais de metais, pH, MO, PT, areia, silte e argila, totalizando 22 variáveis, nos três ambientes, lixão desativado, área de drenagem efêmera do Açude do Brejo e mata nativa, utilizando o PC-ORD® v.6 (Mccune e Mefford, 2011).

Além do uso da mata nativa como referência de qualidade, os valores de prevenção (VP) (CONAMA, 2009), valores de investigação (VI) (CONAMA, 2009) e os valores de referência de qualidade (VRQs) para o Estado do Rio Grande do Norte (Preston *et al.*, 2014), foram utilizados a fim de verificar alteração na qualidade ambiental decorrente do uso do solo pela disposição de resíduos sólidos.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 420 de 2009 o valor de referência de qualidade (VRQ) trata-se da concentração de determinada substância que define a qualidade natural do solo; valor de prevenção (VP) refere-se a concentração de valor limite de determinada substância no solo, de modo que ele seja capaz de sustentar as suas funções; enquanto que valor de investigação (VI) é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana (CONAMA, 2009). Nesse contexto, são definidas as seguintes classes de qualidade dos solos conforme a presença de substâncias químicas: Classe 1 – concentrações de substâncias químicas menores ou iguais ao VRQ; Classe 2 – concentrações de pelo menos uma substância química maior que o VRQ e menor ou igual ao VP; Classe 3 – concentrações de pelo menos uma substância química maior que o VP e menor ou igual ao VI; e Classe 4 – concentrações de pelo menos uma substância química maior que o VI (CONAMA, 2009).

3. RESULTADOS

A substituição da mata nativa para a disposição irregular de resíduos provocou a alcalinização do solo na área do lixão (Tabela 1). Porém, na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo, o solo apresenta reação ácida. O pH não apresentou diferença entre profundidades de amostragem. Os maiores teores de matéria orgânica foram encontrados na subsuperfície do solo do lixão (Tabela 1). Os solos das áreas de estudo apresentaram predominância da fração areia (Tabela 1), evidenciando o caráter arenoso dos solos do semiárido tropical. O solo da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo apresentou os maiores teores de areia e porosidade total na superfície (Tabela 1), e maiores teores de argila em subsuperfície.

A disposição irregular de resíduos no solo provocou incrementos nos teores de metais pesados no solo do lixão e da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (Figura 2, 3). Mesmo após o aumento do pH e a alcalinização do solo na área de lixão, os metais Mn, Ni, Zn, Cr, Cd e Pb estiveram mais disponíveis no solo do lixão do que na mata nativa, em ambas as profundidades, com exceção para Fe e Cu, cujas disponibilidades foram maiores no solo do lixão que da mata, mas apenas para a camada superficial (Figura 2a, 2c). A disposição irregular de resíduos resulta na maior biodisponibilidade de metais pesados até os 40 cm do solo. Nas áreas de lixão e de drenagem efêmera do Açude do Brejo, os teores disponíveis de metais pesados apresentaram elevada variabilidade espacial nesses ambientes, o que não foi comum no solo com vegetação nativa, que representa o ambiente natural sem intervenção antrópica. A disponibilidade dos metais no solo do lixão seguiu a ordem decrescente $Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > Ni > Cd > Cr$ na superfície e $Mn > Zn > Fe > Pb > Ni > Cu > Cr = Cd$ na subsuperfície. Na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo, os teores disponíveis de metais nas duas profundidades analisadas decresceram de forma semelhante a superfície do lixão na ordem $Fe > Mn > Zn > Pb > Cu > Ni > Cr = Cd$. Na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo não foram detectados teores disponíveis de Cr e Cd, e baixas concentrações de Ni foram disponibilizadas (Figura 2). Porém, foram detectados maiores teores disponíveis dos metais Fe, Mn, Zn em superfície e subsuperfície e de Pb e Cu em subsuperfície quando comparados ao solo do lixão. Vale salientar que nessa área, o solo apresentou redução do pH e aumento do teor de argila em subsuperfície. As

taxas de aumento dos teores de metais disponíveis das áreas degradadas em relação a mata nativa foram de 38% a 2557% em superfície, o maior valor para Fe na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo. Em subsuperfície, as taxas variaram de 5% a 1400%, com o maior valor para Cr no solo do lixão e os menores percentuais de aumento de manganês nas duas profundidades.

Levando em consideração os teores totais, todos os metais foram detectados no solo do lixão em concentrações superiores ao do solo da mata nativa, com exceção de Mn na superfície do solo (Figura 3b). Todos os metais totais estiveram em concentrações superiores no solo da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo quando comparados ao solo da mata nativa. Os metais totais no solo do lixão apresentaram a ordem decrescente Fe>Mn>Zn>Cu>Pb>Ni>Cr>Cd em superfície e Fe>Mn>Pb>Cu>Cr>Zn>Ni>Cd em subsuperfície. Para a área de drenagem efêmera do Açude do Brejo, os teores totais de metais em superfície em ordem decrescente foram Fe>Mn>Zn>Cu>Pb>Ni>Cr>Cd e em subsuperfície Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>Cr>Ni>Cd. Entre os teores totais de metais pesados das áreas degradadas apenas Mn apresentou redução de 36% entre a superfície do lixão e a mata nativa, os demais apresentaram aumento de 14% a 896% na superfície e de 12 a 956% em subsuperfície entre o lixão e a mata nativa. Na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo nas duas profundidades os aumentos foram de 31% a 911% em relação a mata nativa.

Com exceção de Fe e Mn, encontrado naturalmente em teores elevados no solo, Zn foi o elemento com as maiores médias dos teores totais observadas em todas as áreas, com exceção da subsuperfície do lixão. As taxas de aumento das médias dos teores totais de zinco das áreas degradadas com relação à mata nativa foram de 12 a 468% para o lixão e de 386 a 466% para a área de drenagem efêmera do Açude do Brejo.

O pH do solo do lixão apresentou correlação positiva e significativa com os metais totais FeT ($r=0,77^*$), CuT ($r=0,85^{**}$), ZnT ($r=0,95^{**}$), CrT ($r=0,94^{**}$) e PbT ($r=0,85^{**}$).

Tabela 1. Média \pm desvio padrão (mínimo – máximo) dos atributos do solo de área degradada pela disposição irregular de resíduos sólidos, área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) e mata nativa no município de Olho D'água do Borges/RN

Área	pH	MO g dm ⁻³	PT %	Areia g kg ⁻¹	Silte g kg ⁻¹	Argila g kg ⁻¹	Classe textural
Profundidade de 0-20 cm							
Mata nativa	6,73 \pm 0,08 (6,63-6,78)	12,05 \pm 1,00 (11,23-13,16)	35,83 \pm 3,92 (31,30–38,14)	731 \pm 19,66 (719–754)	215 \pm 26,95 (186–239)	53 \pm 11,55 (40–60)	Franco arenosa
Lixão	8,20 \pm 0,06 (8,14-8,26)	7,02 \pm 1,70 (5,63-8,92)	47,32 \pm 5,07 (41,84–51,85)	785 \pm 28,58 (752–802)	188 \pm 35,92 (158–228)	27 \pm 11,55 (20–40)	Areia franca
ADE	5,70 \pm 0,01 (5,69-5,71)	15,38 \pm 3,22 (11,80-18,05)	54,48 \pm 1,38 (53,63–56,07)	819 \pm 27,51 (792–847)	121 \pm 27,51 (93–148)	60 \pm 0,00 (60–60)	Areia franca
Profundidade de 20-40 cm							
Mata nativa	5,90 \pm 0,04 (5,86-5,94)	9,33 \pm 2,50 (7,11-12,03)	41,11 \pm 1,76 (39,20–42,66)	658 \pm 23,59 (633–680)	282 \pm 23,59 (260–307)	60 \pm 0,00 (60–60)	Franco arenosa
Lixão	8,19 \pm 0,03 (8,17-8,22)	20,75 \pm 3,63 (16,95-24,17)	43,13 \pm 0,69 (42,70–43,92)	675 \pm 13,58 (661–688)	291 \pm 24,58 (272–319)	33 \pm 11,55 (20–40)	Franco arenosa
ADE	5,32 \pm 0,01 (5,31-5,33)	12,92 \pm 4,06 (9,55-17,42)	52,77 \pm 2,35 (50,41–55,11)	668 \pm 4,16 (663–671)	239 \pm 15,62 (229–257)	93 \pm 11,55 (80–100)	Franco arenosa

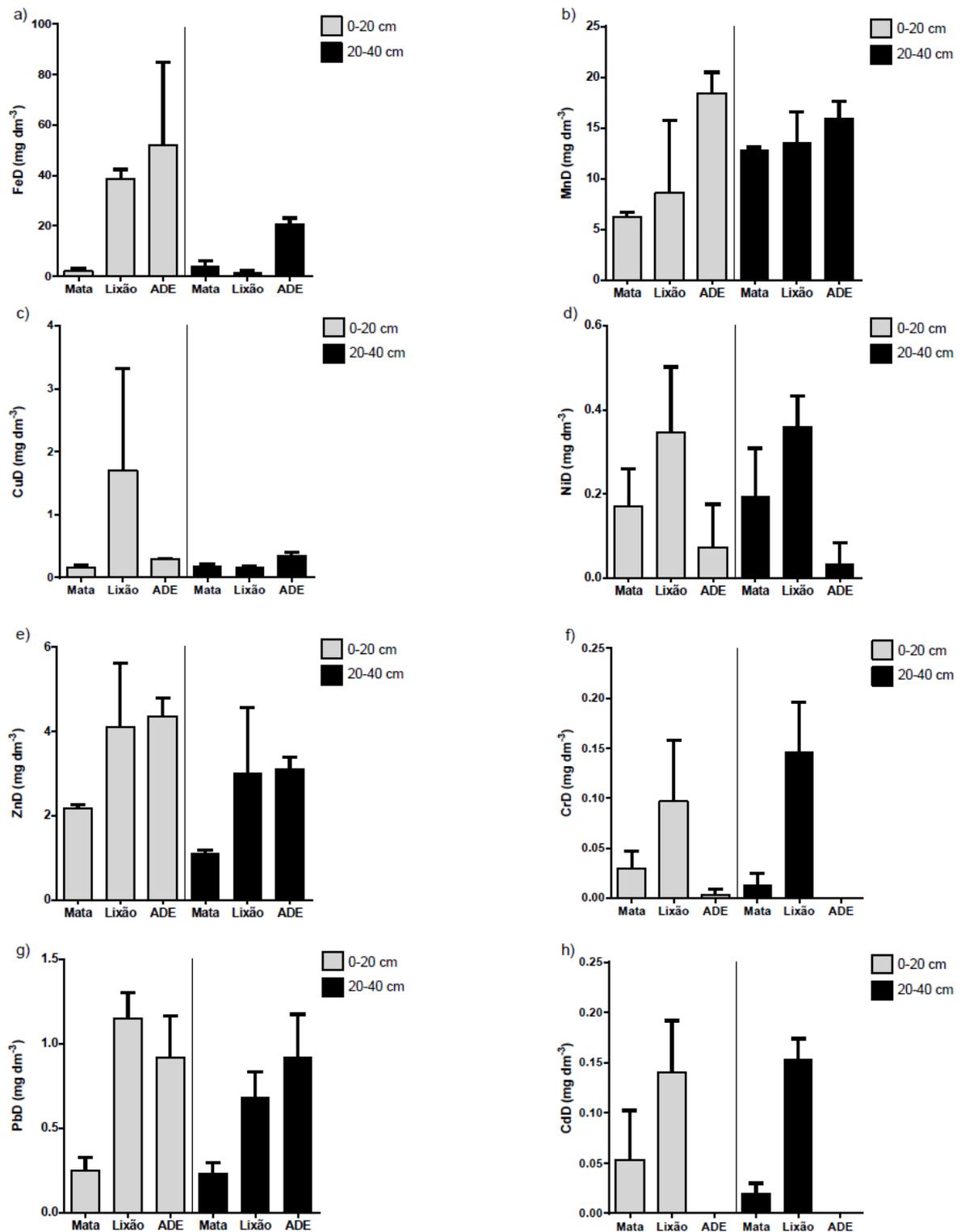


Figura 2. Teores disponíveis de metais pesados do solo sob a área de mata nativa e as áreas degradadas lixão e ADE no município de Olho D'água do Borges/RN para as profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm. (As barras equivalem a média de três amostras e o desvio padrão).

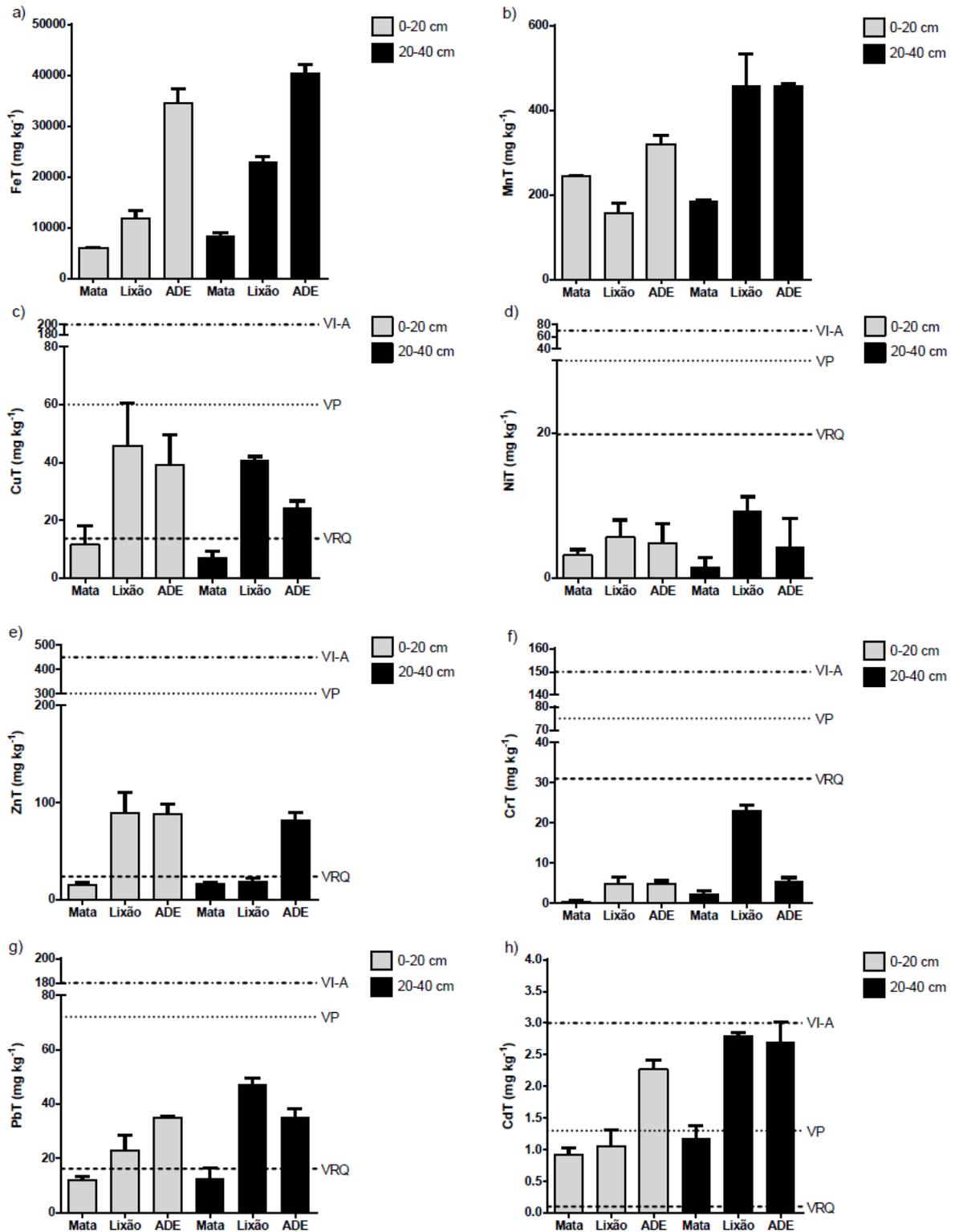


Figura 3. Teores totais de metais pesados do solo sob a área de mata nativa e as áreas degradadas lixão e ADE no município de Olho D'água do Borges/RN para as profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, VRQ: Valor de Referência de Qualidade (Preston *et al.*, 2014), VP: Valor de Prevenção e VI-A: Valor de investigação para o cenário agrícola (CONAMA, 2009). (As barras equivalem à média de três amostras e o desvio padrão).

Nas áreas do lixão e de drenagem efêmera do Açude do Brejo, os teores totais dos metais Cu, Zn, Pb e Cd ultrapassaram o VRQ, com exceção de Zn em subsuperfície e Cd na superfície do lixão, o que indica que esses solos estão contaminados (Figura 3). Apesar de multicontaminados, nenhuma área apresentou teores de metais que ultrapassem os valores de investigação (VI-A). As médias dos teores totais de Cd no solo da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo e na subsuperfície do solo do lixão ultrapassaram o VP (Figura 3h). De acordo com a Resolução CONAMA n° 420 de 2009 (CONAMA, 2009), esses solos são enquadrados na Classe 3 e necessitam de identificação da fonte potencial de contaminação, avaliação da ocorrência natural do elemento, controle das fontes de contaminação e monitoramento da qualidade do solo e da água subterrânea (CONAMA, 2009).

Na área da mata nativa, os teores dos metais CuT, PbT e CdT também foram elevados. O valor máximo de CuT de 0-20 cm na área da mata nativa foi maior que o VRQ (Figura 3c), o valor máximo de PbT em subsuperfície foi maior que o VRQ (Figura 3g) e a média de CdT foi maior que o VRQ nas duas profundidades e o valor máximo de CdT foi maior que o VP em subsuperfície (Figura 3h). O VI não foi ultrapassado por nenhum metal analisado, porém vale ressaltar a proximidade dos teores de Cd encontrados no solo das áreas de lixão e de drenagem efêmera do Açude do Brejo com o VI para o cenário agrícola. Para todos os demais metais, os teores totais estiveram distantes do VI preconizado pela legislação (CONAMA, 2009).

A Análise de Componentes Principais dos teores disponíveis e totais de metais e pH, PT, MO, areia, silte e argila no solo do lixão, da mata nativa e da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo de Olho D'água do Borges/RN explicou 62,10% da variabilidade dos dados nos dois eixos analisados (eixo 1: 35,12, $p=0,001$ e eixo 2: 26,98, $p=0,001$). As variáveis mais importantes para a ordenação do primeiro eixo foram PbT (0,908), FeT (0,881), CuT (0,881), PbD (0,856), PT (0,818), ZnD (0,795), ZnT (0,755), CdT (0,730), CrT (0,719), NiT (0,555). E para o segundo eixo as variáveis mais importantes foram pH (-0,948), CdD (-0,948), argila (0,904), CrD (-0,885), NiD (-0,878) e MnD (0,638) (Figura 4).

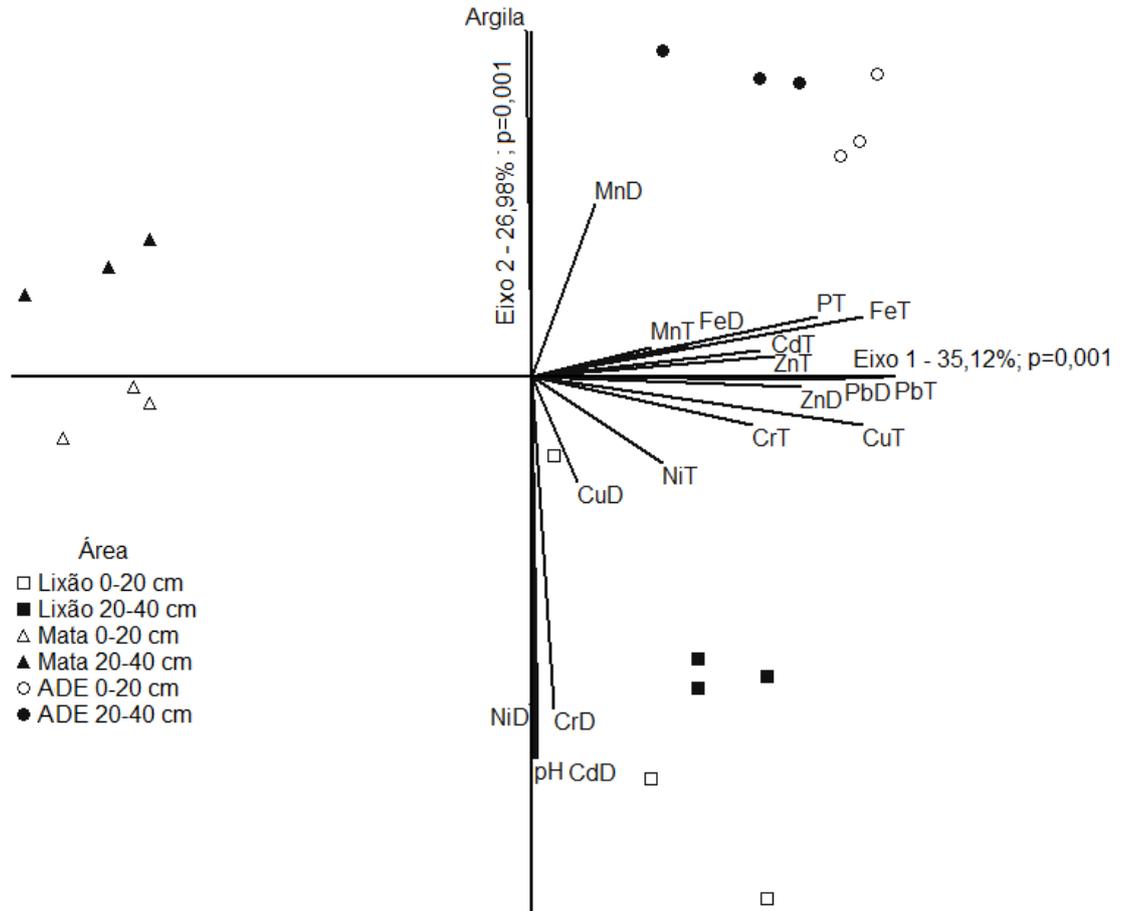


Figura 4. Análise de Componentes Principais dos teores disponíveis e totais de metais, pH, PT, MO, areia, silte e argila nas áreas estudadas sob mata nativa, lixão e área de drenagem efêmera do Açude do Brejo (ADE) localizados no município de Olho D'água do Borges/RN.

Legenda: metal seguido por D representa o teor disponível e seguido por T representa o teor pseudototal.

Ao comparar os atributos físicos, químicos e os metais das áreas do lixão desativado e da área de drenagem efêmera do Açude do Brejo com a mata nativa (Figura 4), as três áreas foram dissociadas, formando grupos distintos. O lixão foi associado com os teores de CdD, CrD e NiD e pH no eixo 2 e aos teores de CuD, NiT, CrT, CuT, ZnD, PbD e PbT no eixo 1. Enquanto que a área de drenagem efêmera foi associada no eixo 2 com os teores de argila e MnD, e para o eixo 1 houve associação com PT e com os teores de MnT, FeT, FeD, CdT e ZnT. O ambiente de mata nativa, assim como esperado para área de referência de qualidade com pouca ou nenhuma interferência antrópica, não possui associação positiva com os teores de metais disponíveis ou totais. A ACP mostra ainda a homogeneização entre as camadas de solo nas áreas degradadas, enquanto o ambiente natural tende a apresentar a distinção entre horizontes.

4. DISCUSSÃO

As alterações nos atributos físicos e químicos do solo decorrentes da disposição irregular de resíduos e desativação inadequada da área do lixão evidenciam aumento da suscetibilidade a erosão e também a lixiviação de contaminantes. Essa constatação advém de processos de degradação que promoveram: (1) a alcalinização do solo; (2) a redução do teor de argila; (3) o aumento do teor de areia e da porosidade total; (4) aporte de matéria orgânica humificada e de metais pesados; e (5) aumento da mobilidade dos metais pesados nesse solo.

O aumento da biodisponibilidade de metais pesados no solo do lixão mesmo após a elevação do pH e alcalinização do solo evidencia que além do pH há no solo outros mecanismos responsáveis pelo controle da mobilidade dos metais catiônicos (Cunha *et al.*, 2008). A esse respeito cabe ressaltar a redução no teor de minerais de tamanho argila que apresentam a capacidade de adsorção de metais em solo (Mimides e Perraki, 2000). Essa perda de argila, decorrente da erosão do solo, em adição ao aumento do teor de areia e dos espaços porosos na área pode explicar a maior mobilidade dos metais no solo do lixão, o que representa sério risco de disseminação de contaminantes em direção a outros componentes da bacia hidrográfica (Augustin e Viero, 2012).

Dentre os atributos do solo, o pH do solo é um dos principais fatores que afeta a disponibilidade dos metais pesados às plantas, apresentando, em geral, relação inversa com a disponibilidade desses elementos (Wu *et al.*, 2006; Ali *et al.*, 2014). No presente estudo, além da perda erosiva de argila contribuir para reduzir sítios de adsorção de metais no solo do lixão, a presença de ácidos orgânicos de alta solubilidade, como os ácidos fúlvicos (Canellas *et al.*, 2001), resultante da decomposição dos resíduos orgânicos aterrados na área, pode contribuir para a mobilização de metais pela formação de quelatos solúveis. Esse é mais um fator que impede esse solo de funcionar como tampão de contaminantes, mostrando um maior potencial de atuação com fonte difusa para os demais componentes da bacia hidrográfica.

As frações humificadas da matéria orgânica do solo ocupam três categorias: (1) as huminas que representam a matéria orgânica ligada à fração mineral do solo, e por isso insolúvel; (2) os ácidos fúlvicos, que apresentam grande quantidade de

grupamentos funcionais oxigenados e são solúveis tanto em meio ácido como básico; e (3) os ácidos húmicos, insolúveis em meio fortemente ácido quando ocorre a precipitação como macromoléculas (Canellas *et al.*, 2001). O húmus formado a partir da decomposição dos resíduos orgânicos de origem urbana apresentam caráter fúlvico, caracterizando uma matéria orgânica de menor estabilidade e maior solubilidade (Canellas *et al.*, 2001). A presença de ácidos fúlvicos derivados da decomposição dos resíduos em solos contaminados com metais pesados resulta em maior risco de ampliação da degradação dessa área (Canellas *et al.*, 2001). Vale salientar que ocorreu o aumento no teor de matéria orgânica no solo do lixão.

A maior biodisponibilidade de Fe, Mn e Zn na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo indica que esses metais foram mobilizados a partir do lixão e carregados em solução pelo escoamento superficial e subsuperficial nessa área que está localizada a montante do Açude do Brejo. Esse resultado é relevante no tocante ao risco advindo da ocorrência de aporte desses contaminantes ao Açude do Brejo.

Uma área de Cerrado brasileiro, ocupada por Latossolo Vermelho, verifica-se teores de nutrientes e metais pesados superiores à área controle tanto no solo como nos tecidos vegetais em pelo menos um raio de 15 m de distância a partir do limite de área destinada à disposição irregular de resíduos (Santana *et al.*, 2008), o que pode ser ampliado na região semiárida tropical pela predominância da textura arenosa e baixa profundidade (Barbosa *et al.*, 2012).

Nesse contexto, no período de abrangência de atividade e desativação do lixão, de agosto de 2008 a dezembro de 2011, houve o monitoramento da qualidade da água pelo Programa Água Azul do Estado do Rio Grande do Norte que mostrou que cobre, chumbo, níquel e cádmio ultrapassaram o VLP para água doce classe 2 (CONAMA, 2005; Programa Água Azul, 2009a, 2009b, 2010, 2012, 2013).

Os níveis elevados de zinco no solo podem ser resultantes da presença de sucata de metal galvanizado, cosméticos e medicamentos fora da validade (Waheed *et al.*, 2010). Elevados teores de Cu, Zn e Pb no solo de áreas de deposição de resíduos podem ser provenientes de restos de alimentos, materiais de limpeza, materiais de oficinas de automóvel e resíduos de construção e demolição (Rizo *et al.*, 2012).

As maiores médias dos teores totais dos metais Cu e Ni ocorreram no lixão. Isso confirma que não houve deposição apenas de resíduos municipais domésticos no lixão, como pode ser visto no apêndice (Apêndice - Fotografias 2, 3 e 4) a

presença de pneus, vidros e outros componentes perigosos compostos de elementos tóxicos.

As médias dos teores totais de metais pesados no lixão e na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo ultrapassaram os valores de VRQ para Cu, Zn, Pb e Cd, com exceção do Zn em subsuperfície e Cd em superfície no lixão. E as médias dos teores totais de Cd ultrapassaram o VP na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo e na subsuperfície do lixão. Em relação à mata para as duas áreas, apenas Mn na superfície do lixão foi menor, o que confirma a importância desse estudo regional para conhecer a presença natural do elemento e a partir disso realizar o controle e monitoramento da qualidade do solo e da água subterrânea (CONAMA, 2009).

A homogeneização das camadas de solo nas áreas degradadas deve-se a dois processos distintos: o revolvimento do solo de cobertura com os resíduos no lixão e ao processo de translocação na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo. No caso do ambiente natural, a distinção entre os horizontes é consequência da pedogênese, que se torna mais evidente com a evolução dos Neossolos, que de início apresentam uma sequência de horizontes do tipo A-C ou A-C-R (EMBRAPA, 2014).

A geração de resíduos sólidos pelas atividades antrópicas dissociada das ações de sustentabilidade leva a contaminação por metais pesados de áreas através da disposição de resíduos sólidos no solo. Uma vez contaminadas, o planejamento para recuperação de áreas degradadas através da revegetação requer disponibilidade sustentável de nutrientes e redução de íons com potencial fitotóxico (Kuka *et al.*, 2013; Araújo, 2014).

Vale salientar que no semiárido tropical a associação entre chuvas concentradas e solos rasos e com elevada susceptibilidade a erosão (Barbosa *et al.*, 2012) evidencia a necessidade da implantação de sistemas de cobertura formados por camada de impermeabilização antes da camada de solo a ser revegetado (ABNT, 1997; Bozkurt *et al.*, 2001).

5. CONCLUSÕES

- 1) A disposição de resíduos sólidos em lixões a céu aberto resulta em solos multicontaminados.
- 2) A mobilização de metais pesados em solos degradados pela disposição de resíduos sólidos aumenta o potencial do solo atuar como fonte difusa de contaminação da bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, A.M.A; SIQUEIRA, J.O. Contaminação Química e Biorremediação do Solo. Tópicos em Ciência do Solo, Viçosa, p. 300-3007, 2000.
- ALCÂNTARA, A. J. de O.; PIERANGELI, M. A. P.; SOUZA, C. A. de; SOUZA, J. B. de. Teores de As, Cd, Pb, Cr e Ni e atributos de fertilidade de Argissolo Amarelo distrófico usado como lixão no município de Cáceres, estado de Mato Grosso. Revista Brasileira de Geociências, v. 41, n.3, p. 539-548, set. 2011.
- ALI, S. M.; PERVAIZ, A.; AFZAL, B.; HAMID, N.; YASMIN, A. Open dumping of municipal solid waste and its hazardous impacts on soil and vegetation diversity at waste dumping sites of Islamabad city. Journal of King Saud University – Science, v. 26, p. 59–65, 2014.
- AL-YAQOUT, A. F.; HAMODA, M. F. Evaluation of landfill leachate in arid climate - a case study. Environment International, v. 29, p. 593-600, 2003.
- ARAÚJO, C. S. Qualidade do solo da camada de cobertura final em área de disposição de resíduos no semiárido tropical. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária – PPgES, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13896: aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação - procedimentos. Rio de Janeiro, 1997.
- AUGUSTIN, P. V.; VIERO, A. P. Environmental impact and geochemical behavior of soil contaminants from an industrial waste landfill in Southern Brazil. Environmental Earth Sciences, v.67, n.5, p. 1521 – 1530, 2012.
- BARBOSA, J. E. de L.; MEDEIROS, E. S. F.; BRASIL, J.; CORDEIRO, R. da S.; CRISPIM, M. C. B.; SILVA, G. H. G. da. Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. Acta Limnologica Brasiliensia, v. 24, n. 1, p. 103-118, 2012.
- BOLAN, N.; KUNHIKRISHNAN, A.; THANGARAJAN, R.; KUMPIENE, J.; PARK, J.; MAKINO, T.; KIRKHAM, M. B.; SCHECKEL, K. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils – To mobilize or to immobilize? Journal of Hazardous Materials, v. 266, p. 141-166, 2014.
- BOZKURT, S.; SIFVERT, M.; MORENO, L. NERETNIEKS, I. The long-term evolution of and transport processes in a self-sustained final cover on waste deposits. The Science of the Total Environment, v. 271, p. 145-168, 2001.
- CAMPOS, M. C. C. Atributos dos solos e riscos de lixiviação de metais pesados em solos tropicais. Ambiência. Guarapuava (PR), v.6, n.3, p. 547-565. Set/Dez, 2010.
- CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. de A.; RUMJANEK, V. M.; MORAES, A. A.; GURIDI, F. Distribuição da matéria orgânica e características de ácidos húmicos em solos

com adição de resíduos de origem urbana. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 36, n.12, p. 1529-1538, 2001.

CAVALLET, L. E.; CARVALHO, S. G. de; FORTES NETO, P. Heavy metals in the waste and in the water discharge area of municipal solid waste. Rev. Ambient. Água, Taubaté, v. 8, n. 3, Sep./Dec., 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, p. 58-63.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução n. 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Publicado no DOU nº 249, de 30/12/2009, p. 81-84.

CUNHA, K. P. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; PIMENTEL, R. M. M.; ACCIOLY, A. M. A.; SILVA, A. J. Disponibilidade, acúmulo e toxidez de cádmio e zinco em milho cultivado em solo contaminado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 1319-1328, 2008.

DE FILIPPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. Análise Química do solo. Metodologia. 2.ed. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 26p

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2013. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Embrapa Solos. Solos do Nordeste. Unidade de Execução de Pesquisa e Desenvolvimento de Recife, 2014. 14p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2ª ed. rev. ampl. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Levantamento Exploratório-Reconhecimento de solos do Rio Grande do Norte, 1971. Escala: 1:500.000. Disponível em

<<http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/rn/olhodaguadoborges.pdf>> Acesso em: 19 abr. 2016.

GraphPad Prism. GraphPad Software, Inc. Version 6.01. La Jolla, CA, USA, 2012.

HU, Y.; CHENG, H. Application of Stochastic Models in identification and apportionment of heavy metal pollution sources in the surface soils of a large-scale region. *Environmental Science & Technology*, v. 47, p. 3752-3760, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades. Olho D'água do Borges. 2016. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=240840&search=rio-grande-do-norte|olho-d`%C3%81gua-do-borges>> Acesso em: 19 abr. 2016.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. Trace elements in soils and plants. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413p.

KORF, E.P.; MELO, E.F.R.Q.; THOMÉ, A.; ESCOSTEGUY, P.A.V. Retenção de metais em solo da antiga área de disposição de resíduos sólidos urbanos de Passo Fundo- RS. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 2, n.2, p. 43-60, 2008.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 15, n.3, p. 259-263, 2006.

KUKA, K.; FRANKO, U.; HANKE, K.; FINKENBEIN, P. Investigation of different amendments for dump reclamation in Northern Vietnam. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 132, p. 41 – 53, 2013.

MCCUNE, B.; MEFFORD, M. J. PC-ORD: Multivariate analysis of ecological data, version 6.0. MjM Software Design, Oregon, 2011.

MIMIDES, T.; PERRAKI, T. Evaluation of the attenuating properties of selected Greek clays for toxic inorganic elements in landfill sites. *The Science of the Total Environment*, v. 253, p. 1-13, 2000.

OLIVEIRA, F. J. S.; JUCÁ, J. F. T. Acúmulo de metais pesados e capacidade de impermeabilização do solo imediatamente abaixo de uma célula de um aterro de resíduos sólidos. *Eng. Sanit. Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 9, n. 3, p. 211-217, jul./set., 2004.

PASTOR, J.; HERNÁNDEZ, A.J. Heavy metals, salts and organic residues in old solid urban waste landfills and surface waters in their discharge areas: Determinants for restoring their impact. *Journal Environmental Management*, v. 95, p. 542-549, 2012.

PRESTON, W.; NASCIMENTO, C. W. A. do; BIONDI, C. M.; SOUZA JUNIOR, W. S. de; SILVA, W. R. da; FERREIRA, H. A. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 1028-1037, 2014.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: I Relatório: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de agosto a novembro de 2008, 2009a.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 3º Relatório trimestral: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de abril a julho de 2009, 2009b.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 5º Relatório trimestral: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de outubro de 2009 a março de 2010, 2010.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 7º Relatório trimestral: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de junho a setembro de 2010, 2011.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 9º Relatório trimestral: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de fevereiro a julho de 2011, 2012.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 11º Relatório trimestral: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de setembro a dezembro de 2011, 2013.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 14º Relatório: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais de abril a setembro de 2012, 2014.

PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento de qualidade da água: 15º Relatório trimestral: Tomo I – Monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de julho a agosto de 2014, 2015.

REMON, E.; BOUCHARDON, J.-L.; CORNIER, B.; GUY, B.; LECLERC, J.-C; FAURE, O. Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration. *Environmental Pollution*, v. 137, n. 2, p. 316-323, 2005.

RIZO, O. D.; MERLO, M. H.; CASTILLO, F. E.; LÓPEZ, J. O. A. Assessment of Metal Pollution in Soils From a Former Havana (Cuba) Solid Waste Open Dump. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 88, n. 2, p. 182-186, 2012.

SANTANA, O. A.; ENCINAS, J. I.; CORRÊA, R. S.; COUTO JÚNIOR, A. F. Nutrientes e metais no solo e em árvores de cerrado adjacentes a um aterro sanitário. *Revista Cerne, Lavras*, v. 14, n.3, p. 212-219, jul./set., 2008.

SAS Institute. Statistical analysis system: Procedure guide for personal computer. Version 8. Cary, 1999.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (SEMARH/RN). Bacia hidrográfica Apodi/Mossoró. 2016a. Disponível em: <<http://servicos.semarh.rn.gov.br/semarh/sistemadeinformacoes/consulta/cBaciaDetalle.asp?CodigoEstadual=01>> Acesso em: 20 abr. 2016.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS (SEMARH/RN). Bacia hidrográfica do Açude do Brejo. 2016b. Disponível em: <<http://servicos.searh.rn.gov.br/semarh/sistemadeinformacoes/consulta/cResFichaTecnica.asp?ldReservatorio=15>> Acesso em: 20 abr. 2016.

SUDENE/CPRM. Carta Topográfica Folha Apodi (SB.24-X-C-VI). 1:25.000. 1983.

SINGH, B.R.; STEINNES, E. Soil and water contamination by heavy metals. In: LAI, R.; STEWART, B. A. (Eds.) Advances in soil science: soil process and water quality. USA: Lewis, p.233-237, 1994.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Method 3051a - Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. 1998. Revision 1 Fev 2007. 30 p. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3051a.pdf>> Acesso em: 13 mar. 2015.

WAHEED, S.; SIDDIQUE, N.; HAMID, Q.; CHAUDHRY, M. M. Assessing soil pollution from a municipal waste dump in Islamabad, Pakistan: a study by INAA and AAS. Journal of Radio analytical and Nuclear Chemistry, v. 285, n. 3, p. 723-732, 2010.

WU, J.; NORVELL, W.A. & WELCH, R.M. Kriging on highly skewed data for DTPA-extractable soil Zn with auxiliary information for pH and organic carbon. Geoderma, v. 134, p. 187-199, 2006.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A legislação brasileira prorrogou o prazo para a recuperação das áreas de lixões e aterros controlados por períodos de tempo em conformidade com a população do município. Essa medida serve de alerta para que os municípios iniciem e/ou continuem com o processo de recuperação, haja vista que as áreas de disposição irregular de resíduos sólidos, como mostra o presente estudo, são passivos ambientais que requerem medidas rápidas porém com estudos prévios, nos quais a arbitrariedade nas medidas sanitárias e ambientais pode gerar outros passivos.

Os resultados deste trabalho demonstraram que o solo de cobertura do lixão apresenta processos de degradação que aumentam o potencial deste atuar como fonte difusa de contaminação da bacia hidrográfica, e que a recuperação de áreas degradadas pela disposição irregular de resíduos sólidos requer estudo preliminar que vise caracterizar os processos envolvidos na degradação da área, tais como erosão hídrica, erosão eólica, revolvimento do material e sobrecarga de metais pesados.

A disposição inadequada de resíduos sólidos promoveu alteração na estruturação do solo, enriquecimento por sais e nutrientes, modificou o complexo sortivo do solo e incrementou teores de metais pesados. Nesse sentido, o grupo de atributos que contribuíram com essa discussão foram a PT, que auxilia no reconhecimento do solo atuar como tampão ou filtro de contaminantes, teor de areia e teor de argila, por permitirem a adsorção ou escoamento de componentes presentes no lixão, pH, por auxiliar na mobilização ou imobilização de compostos químicos, MO, por atuar na estruturação do solo e na formação de sítios de adsorção, P disponível e N por serem nutrientes que afetam os corpos d'água e o desenvolvimento da vegetação no processo de recuperação da área degradada e os metais disponíveis Fe, Mn, Cu, Ni, Zn, Cr, Pb, Cd e totais Cu, Zn, Pb e Cd pelo risco de transferência para a cadeia trófica e corpos d'água.

Implantar camadas de impermeabilização aliadas a camada de solo natural da região que permita a estabilização e revegetação da área é adequado e visa o atendimento ao desenvolvimento sustentável por ser ambientalmente correto, socialmente justo e economicamente viável. Vale salientar que a área já está multicontaminada, portanto, as camadas a serem implementadas devem ser

monitoradas e obedecer medidas de engenharia sanitária e ambiental para não elevar o potencial de contaminação da área, dentre elas evitar o revolvimento das camadas com os resíduos.

Portanto, dentre as diretrizes do Plano Nacional de Resíduos Sólidos para a eliminação de lixões e aterros controlados estão: (1) captação de recursos para implantação de ações de cercamento da área; (2) drenagem pluvial; (3) implantação de cobertura com solo e cobertura vegetal; (4) sistema de vigilância; e (5) realocação de pessoas e edificações que possam estar localizadas no lixão (MMA, 2012). No que diz respeito a recuperação de lixões, o plano exige ações como a queima pontual de gases, coleta e tratamento de chorume, recuperação da área degradada e compactação da massa e o desenvolvimento da cobertura vegetal apropriada (MMA, 2012).

No caso da área de estudo que possui solo arenoso e baixa profundidade com uma vida útil de 9 anos, espera-se que a lixiviação e a liberação de gases provenientes da decomposição dos resíduos aterrados tenha ocorrido com maior intensidade no início, embora se mantenha constante com o passar do tempo de estabilização dos resíduos. Dessa forma, é um passivo ambiental que perdura por longo período de tempo exigindo o monitoramento da área. Vale ressaltar a possibilidade de ampliação da produção de lixiviados e gases durante os eventos chuvosos concentrados na região semiárida tropical, o que justifica a implantação de camada de impermeabilização antes da camada de solos a ser revegetada.

A exigência de implantação de uma camada de impermeabilização acima do maciço de resíduos foi estabelecida desde 1997 com a publicação da NBR 13896/97 (ABNT, 1997). Essa camada impermeabilizante da superfície inferior deve ser construída com materiais de propriedades químicas compatíveis com o resíduo, com suficiente espessura e resistência, de modo a evitar rupturas; deve cobrir toda a área, de forma que o resíduo ou o percolado não entre em contato com o solo natural que receberá vegetação, uma vez que os resultados dessa pesquisa mostram a redução da qualidade do solo em contato direto com os resíduos e o que impede o desenvolvimento adequado da vegetação (ABNT, 1997).

Devido a abrangência do estudo, recomenda-se a realização de estudos para a determinação da perda de solo por erosão para confirmar os resultados obtidos, principalmente para os nutrientes fósforo e nitrogênio, por estarem relacionados à ocorrência de eutrofização, e para os teores de metais, por afetar os usos do corpo

d'água e do solo da região, assim modificando as relações ecossistêmicas. Esta análise também é sugerida para verificar a amplitude do assoreamento no Açude do Brejo, reforçado pela área de estudo estar localizada no semiárido tropical e as chuvas ocorrem em períodos curtos de tempo no ano, mais precisamente de fevereiro a abril, e por isso o volume de água armazenado tende a ser menor com o corpo d'água assoreado.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13896: aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação - procedimentos. Rio de Janeiro, 1997.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasil, 2012. Disponível em: <http://www.sinir.gov.br/documents/10180/12308/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf/e183f0e7-5255-4544-b9fd-15fc779a3657>. Acesso em: 06 ago. 2016.

APÊNDICE

Fotografia 1. Lixão desativado de Olho D'água do Borges. Data: 15/11/2014.



Fotografia 2. Cerca de delimitação do lixão desativado de Olho D'água do Borges. Data: 15/11/2014.



Fotografia 3. Queima de resíduos no lixão desativado de Olho D'água do Borges.
Data: 05/02/2015



Fotografia 4. Resíduos expostos no lixão desativado de Olho D'água do Borges.
Data: 05/02/2015.



Fotografia 5. Diferentes colorações no solo de cobertura do lixão desativado de Olho D'água do Borges/RN. Data 05/02/2015.



Fotografia 6. Área de referência de qualidade do município de Olho D'água do Borges/RN. Data: 05/02/2015.



Fotografia 7. Ponto de coleta na área de drenagem efêmera do Açude do Brejo.
Data: 05/02/2015.