



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-  
BRASILEIRA**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU EM GESTÃO DE RECURSOS**  
**HÍDRICOS, AMBIENTAIS E ENERGÉTICOS**

**VALQUÍRIA DOS SANTOS LIMA**

**ESTIMATIVA DE PERDAS DE SOLO POR EROSÃO EM**  
**COBERTURAS DE ATERRO SANITÁRIO**

**FORTALEZA**

**2018**

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Lima, Valquíria Dos Santos.

L696e

Estimativa de perdas de solo por erosão em coberturas de aterro sanitário / Valquíria Dos Santos Lima. - Redenção, 2018.  
37f: il.

Monografia - Curso de Especialização em Gestão De Recursos Hídricos, Ambientais E Energéticos, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara.

1. Aterro sanitário. 2. Equação Universal de Perdas de Solo.  
3. Erosão. 4. Resíduos sólidos urbanos. I. Título

CE/UF/BSCL

CDD 628.445

---

VALQUÍRIA DOS SANTOS LIMA

ESTIMATIVA DE PERDAS DE SOLO POR EROSÃO EM  
COBERTURAS DE ATERRO SANITÁRIO

Monografia apresentada ao Curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara

REDENÇÃO  
2018

UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA  
AFRO-BRASILEIRA

VALQUÍRIA DOS SANTOS LIMA

ESTIMATIVA DE PERDAS DE SOLO POR EROSÃO EM  
COBERTURAS DE ATERRO SANITÁRIO

Monografia julgada e aprovada para obtenção do título de Especialista em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira.

Data: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Nota: \_\_\_\_\_

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Profa. Dra. Ada Amélia Sanders Lopes

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

## AGRADECIMENTOS

À Deus, no qual estão ocultos todos os tesouros da sabedoria e do conhecimento. Sem Ele, eu nada poderia fazer.

Aos meus pais, Pedro e Maria Augusta, e à minha irmã Vanessa, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara, pela orientação e pelo incentivo para execução desse trabalho.

Aos membros da Banca Examinadora, Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares e Profa. Dra. Ada Amélia Sanders Lopes, pelas importantes contribuições para finalização deste trabalho.

A toda a equipe técnica da Célula de Resíduos Sólidos – CERES da Secretaria das Cidades/CE, em especial aos servidores Jessé Pimentel, André Sarmanho e Vanessa Lima, que gentilmente disponibilizaram todas as informações solicitadas para a construção deste trabalho.

Aos amigos de longa data, Vinícius e Letícia, que tornam minha vida mais prazerosa e repleta de sorrisos. Vocês fazem parte da minha história e serão levados por toda a vida!

À grande amiga Juliane Batista, por todo apoio concedido e por me ajudar a compreender quem eu sou e onde posso chegar. Sua contribuição foi determinante!

Aos professores do curso de especialização em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos, pela transmissão segura e paciente de conhecimento.

A todos que de alguma forma contribuíram para tornar possível a realização deste trabalho.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Divisão do Brasil em regiões homogêneas, em termos de características de precipitação .....	15
Figura 2 -	Localização do município de Caririaçu-CE.....	20
Figura 3 -	Precipitação média mensal calculada para o município de Caririaçu, em mm.....	21
Figura 4 -	Erosividade mensal, em MJmm/ha/h calculada para o município de Caririaçu .....	24
Figura 5 -	Representação da Seção Transversal 56 .....	27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações propostas por diversos autores para estimar a erosividade para cada mês ( $R_x$ ) a partir das precipitações médias mensais ( $M_x$ ) e da Precipitação média anual ( $P$ ).....	16
Tabela 2 - Classe para interpretação do índice de erosividade anual (Fator R) .....	25
Tabela 3 - Fator K, de erodibilidade, calculado por diversos autores para neossolos litólicos e argissolos vermelho-amarelos, em t.ha.h/ha.MJ.mm.....	26
Tabela 4 - Classe para interpretação do índice de erodibilidade (Fator K, em t.ha.h/ha.MJ.mm).....	27
Tabela 5 - Comprimento e declividade dos perfis para cálculo do Fator LS.....	28
Tabela 6 - Possíveis combinações de R, K, L, S, C e P e aplicação na EUPS.....	29
Tabela 7 - Classificação do grau de erosão hídrica .....	30

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CERES	Célula de Resíduos Sólidos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB
COMARES-UC	Consórcio Intermunicipal de Gestão Integrada para Aterro de Resíduos Sólidos – Unidade Crato
EC	Energia Cinética
EUPS	Equação Universal de Perdas de Solo
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos do Ceará
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente



## SUMÁRIO

RESUMO .....	9
ABSTRACT .....	9
1 INTRODUÇÃO .....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
2.1 Resíduos sólidos: problemática e disposição final adequada.....	12
2.2 Erosão e predição de perdas de solo.....	13
2.2.1 Erosividade das chuvas - Fator R.....	14
2.2.2 Erodibilidade do solo - Fator K.....	16
2.2.3 Comprimento e grau de declive - Fator LS .....	17
2.2.4 Uso e manejo do solo ou cobertura vegetal - Fator C .....	18
2.2.5 Práticas conservacionistas – Fator P.....	19
3 METODOLOGIA.....	20
3.1 Área de estudo.....	20
3.2 Aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo – EUPS.....	21
3.3 Classificação da pesquisa .....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	24
4.1 Erosividade das chuvas - Fator R.....	24
4.2 Erodibilidade do solo - Fator K.....	26
4.3 Comprimento e grau de declive - Fator LS .....	27
4.4 Uso e manejo do solo ou cobertura vegetal - Fator C .....	28
4.5 Práticas conservacionistas – Fator P.....	28
4.6 Estimativa das perdas de solo na cobertura do Aterro Sanitário Regional do Cariri .....	29
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
REFERÊNCIAS.....	34
ANEXO.....	37
ANEXO A - Consórcios para Resíduos Sólidos no Estado do Ceará (2018).....	37

# ESTIMATIVA DE PERDAS DE SOLO POR EROSÃO EM COBERTURAS DE ATERRO SANITÁRIO

Valquíria dos Santos Lima<sup>1</sup>  
Raphael Amaral da Câmara<sup>2</sup>

## RESUMO

A erosão é um processo natural caracterizado pelo desgaste e remoção lenta dos solos de uma superfície. Apesar de ser um processo natural, a ação antrópica e os fatores climáticos e econômicos de uma região podem acelerar o processo de erosão, trazendo grandes prejuízos naturais, sociais e econômicos. Os aterros sanitários são amplamente utilizados para confinar resíduos sólidos no menor espaço praticável, de modo a causar menor dano possível ao meio ambiente e à coletividade. Tendo em vista o crescente uso das técnicas de aterramento para disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU), fazem-se necessários estudos de erosão em coberturas de aterro sanitário que permitam a quantificação das perdas de solo e a compreensão os fatores controladores envolvidos no processo erosivo destas coberturas. O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma estimativa de perdas de solo por erosão na cobertura final que será aplicada sobre os RSU a serem depositados no Aterro Sanitário Regional do Cariri (Caririçu-CE), fornecendo subsídio para tomada de decisão no gerenciamento desta obra de engenharia. Os resultados foram obtidos utilizando a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) e as perdas de solo foram estimadas em 36,930 t/ha/ano. De acordo com os critérios de classificação do grau de erosão hídrica, esta taxa é classificada como de "grau de erosão moderado" e indica a necessidade de revisão do projeto dos perfis de talude analisados, de modo a garantir que medidas sejam tomadas para que não haja o comprometimento da estrutura do aterro sanitário em questão.

**Palavras-chave:** Aterro sanitário. Equação Universal de Perdas de Solo. Erosão. Resíduos sólidos urbanos.

## ABSTRACT

Erosion is a natural process characterized by the wear and slow removal of soils from a surface. Despite being a natural process, the anthropic action and the climatic and economic factors of a region can accelerate the erosion process, bringing great natural, social and economic damages. Sanitary landfills are widely used to confine solid waste in the smallest practicable space, in order to cause less damage to the environment and to the community. Considering the increasing use of grounding techniques for the disposal of urban solid waste (USW), it is necessary to study erosion in landfill coverages that allow the quantification of soil losses and the understanding of the controlling factors involved in the erosive process of these covers. The present work aims to present an estimate of soil losses by erosion in the final coverage that will be applied to the USW to be deposited in the Aterro Sanitário Regional do Cariri (Caririçu-CE), providing subsidy for decision making in the management of this engineering work. The results were obtained using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and soil losses were estimated at 36.930 t/ha/year. According to the criteria for classification of the degree of water erosion, this rate is classified of "moderate erosion degree" and indicates the need to revise the project of the slope profiles analyzed, in order to ensure that measures are taken so that there is no compromise to the structure of the landfill in question.

**Keywords:** Sanitary landfill. Universal Soil Loss Equation. Erosion. Urban solid waste

---

<sup>1</sup> Estudante do Curso de Especialização em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos pela Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira e Universidade Aberta do Brasil, polo Redenção.

<sup>2</sup> Graduado, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Ceará.

# 1 INTRODUÇÃO

Aterro sanitário é uma técnica de disposição de resíduos sólidos no solo sem causar danos à saúde pública e à sua segurança (ABNT, 1992). Trata-se de um método que aplica princípios de engenharia para reduzir os resíduos sólidos ao menor volume permissível e confiná-los à menor área possível, cobrindo-os com uma camada de terra ou outro material inerte.

Nos últimos anos o Brasil experimentou um aumento vertiginoso no número de aterros sanitários em operação. De acordo com o Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos, publicado no ano de 2018 pela Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, o Brasil possui 687 aterros sanitários em operação. Deste total, 366 aterros sanitários estão lotados na região Sudeste (53% do total cadastrado), 212 na região Sul (31%), 57 unidades na região Nordeste (8%), 34 na região Centro-Oeste (5%) e 18 na região Norte (4% do total) (BRASIL, 2018).

O Estado do Ceará possui trinta consórcios formados com a finalidade de construção de aterros sanitários regionais (Anexo A), cujo objetivo é proporcionar uma disposição ambientalmente adequada para os resíduos sólidos urbanos (RSU) dentro dos padrões de desenvolvimento sustentável (CEARÁ, 2015). O Consórcio Intermunicipal de Gestão Integrada para Aterro de Resíduos Sólidos – Unidade Crato (COMARES-UC) prevê a construção do Aterro Sanitário Regional do Cariri, que servirá para a disposição final dos RSU gerados por dez municípios pertencentes ao consórcio.

Um dos desafios associados à manutenção de aterros sanitários é o controle dos processos erosivos em sua cobertura. A erosão em coberturas de aterros sanitários representa uma questão relevante, pois o desprendimento de solos do talude pode colocar em risco a segurança estrutural do empreendimento e comprometer finalidade da obra. Considerando que o aterro sanitário é uma obra de engenharia destinada ao confinamento de resíduos sólidos, a erosão de sua superfície deve ser estudada de modo assegurar que sua cobertura não sofra perdas significativas, garantindo que os resíduos sólidos ali depositados permaneçam confinados, não causando problemas ambientais e/ou sanitários.

A erosão é um processo natural causado por agentes exógenos de transformação do relevo que se caracteriza pelo desgaste e pela remoção lenta dos solos de uma superfície. Com base em estudos anteriores, sabe-se que a erosão hídrica é a que contribui de maneira mais significativa nas perdas de solo por processos erosivos em taludes. Para Pruski (2009) a erosão hídrica provocada pela água de chuva inicia-se com a erosão laminar podendo, na sequência e em ordem cronológica, passar pelas fases de formação de sulcos, ravinas e voçorocas.

Estudos indicam que superfícies inclinadas são bastante suscetíveis à erosão, no entanto, outros fatores também contribuem para que certas áreas sejam mais erodíveis do que outras. De acordo com Guerra e Cunha (2012), as taxas de erosão hídrica são determinadas por fatores controladores, a saber, fatores pluviométricos, tipo de solo, características das encostas, uso e manejo do solo e práticas conservacionistas. Pruski (2009) afirma que a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) está entre os modelos mais utilizados e bem aceitos na predição da erosão, pois incorpora todos os fatores controladores acima citados.

O objetivo geral desta pesquisa é estimar, através do uso da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), as perdas de solo por erosão em cobertura projetadas para o Aterro Sanitário Regional do Cariri-CE. Para atingir este objetivo foram estabelecidos como objetivos específicos: analisar a distribuição das chuvas na região estudada, determinando sua erosividade; identificar os tipos de solos encontrados na região, determinando sua erodibilidade; analisar a topografia final do aterro; avaliar a influência do uso e manejo do solo no processo de erosão, analisando a importância da cobertura vegetal na superfície do terreno; identificar as práticas conservacionistas desenvolvidas na área de estudo; e calcular, a partir da análise de todas as possíveis combinações dos fatores controladores, as perdas de solo mínima, média e máxima.

No contexto desta pesquisa, a EUPS constitui-se uma ferramenta de boa aplicabilidade que permitirá realizar o prognóstico dos processos erosivos na região, dando subsídio para a completa compreensão da erosão na área estudada.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Resíduos sólidos: problemática e disposição final adequada**

O homem exerce pressões no ambiente em que vive, causando modificações nos meios físico, biótico e antrópico. Em suas múltiplas atividades, o homem produz resíduos sólidos e semissólidos, cuja disposição inadequada no ambiente pode resultar em problemas de ordem sanitária e ambiental (MOTA, 2012), dentre os quais cita-se a produção de maus odores, a atração de insetos e outros vetores, a poluição do solo e a poluição hídrica.

Reconhecidos os agravos ao meio ambiente e à saúde humana cujas causas relacionam-se aos resíduos sólidos, foi sancionada no Brasil a Lei Federal nº 12.305 de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e dispõe sobre o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotadas pelo governo com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos no Brasil (BRASIL, 2010).

Brasil (2010) define gerenciamento de resíduos sólidos como o “conjunto de ações exercidas, direta ou indiretamente, nas etapas de coleta, transporte, transbordo, tratamento e destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”. A última etapa do gerenciamento de resíduos sólidos, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, consiste na distribuição ordenada dos rejeitos em aterros, visando reduzir os riscos e agravos à saúde pública e à segurança, bem como minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010).

Conforme disposto na norma técnica NBR 8.419/1992, o aterro sanitário é uma técnica de disposição final de RSU no solo com mínimos impactos ambientais e sanitários.

De acordo com a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (2018), o aterramento é uma das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem para o descarte de seus resíduos. Mota (2012) afirma que, nos aterros sanitários, os resíduos sólidos devem ser dispostos em barrancos ou células, sendo necessário que os mesmos sejam compactados com trator e cobertos diariamente com solo ou material inerte para evitar a presença de vetores.

Mota (2012) afirma ainda que quando uma célula ou parte do aterro é finalizada esta deve ser encerrada com uma cobertura permanente, que pode ser uma camada de solo ou material inerte com cerca de 60 cm de espessura. Assim, as células encerradas e recobertas dão origem aos taludes do aterro sanitário (MONTEIRO *et al.*, 2001).

Quando os taludes são desprovidos de vegetação, estes podem sofrer movimentos de massa ou sofrer processo de erosão, causados principalmente pela ação da água ou dos ventos (MANHAGO, 2008).

## **2.2. Erosão e predição de perdas de solo**

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2012), o processo de erosão pode ser compreendido como o desprendimento e arraste acelerado das partículas de solo causado por agentes hídricos ou eólicos. Magalhães (2001) corrobora que a erosão é um processo mecânico que causa um impacto sobre as propriedades físicas do solo e traduz-se na desagregação, transporte e deposição de partículas de solo, subsolo e rochas pela ação das águas, ventos e geleiras.

Nos estudos de erosão em taludes, costuma-se tratar com maior ênfase a erosão hídrica, pois, de acordo com Guerra e Cunha (2012), esta contribui de maneira mais significativa nas perdas de solo por processos erosivos nas encostas. Estes autores acrescentam que as taxas de erosão são determinadas por fatores controladores, a saber, fatores pluviométricos, tipo de solo, características das encostas, uso e manejo do solo e práticas conservacionistas, que justificam por que certas áreas erodem mais do que outras.

As perdas de solo por erosão de qualquer local podem ser estimadas utilizando a empírica Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), considerada por Bertoni e Lombardi Neto (2012) como uma ferramenta indispensável para o planejador conservacionista, pois exprime a ação dos fatores mais importantes na erosão hídrica. A EUPS, desenvolvida na década de 50 por Wischmeier e Smith, está entre os modelos mais usados na predição da erosão, pois incorpora fatores climáticos, edáficos, topográficos e de uso e manejo do solo (PRUSKI, 2009). A EUPS é expressa conforme a Equação 1.

$$PS = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

onde,

PS= perda de solo média anual, t/ha/ano;

R= fator de erosividade da chuva, MJmm/ha/h;

K= fator de erodibilidade do solo t/ha/(MJmm/ha/h);

L= fator comprimento da encosta, adimensional;

S= fator declividade da encosta, adimensional;

C= fator uso e manejo do solo, adimensional; e

P= fator práticas conservacionistas, adimensional.

Observa-se que os fatores R, K, L e S referem-se às condições naturais da área estudada, enquanto os fatores C e P referem-se à fatores antrópicos, relacionando-se ao uso e ocupação do solo. É comum utilizar a equação considerando conjuntamente o comprimento e a declividade da encosta, para determinar o Fator LS.

### 2.2.1. Erosividade das chuvas- Fator R

O conceito de erosividade pode ser compreendido pela definição simples dada por Hudson (1961, *apud* GUERRA & CUNHA, 2012), que traduz erosividade como a habilidade da chuva em causar erosão. Guerra e Cunha (2012) consideram que esse conceito simples contrasta-se com a complexidade de determinação do potencial erosivo da chuva, que depende das características das gotas de chuva (que variam no espaço e no tempo) e dos parâmetros de erosividade. É comum encontramos na bibliografia a energia cinética, a intensidade, o momento e o total pluviométrico citados como parâmetros utilizados na investigação da erosividade.

As características das chuvas que mais influenciam os processos erosivos são a energia cinética (EC) e a intensidade máxima da chuva em 30 minutos,  $I_{30}$ . Para Bertoni e Lombardi Neto (2012), a análise do parâmetro  $I_{30}$  é extremamente trabalhosa, o que muitas vezes inviabiliza o seu uso na determinação do potencial erosivo da chuva,  $EI_{30}$  (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2012). Este fato, somado à escassez ou inexistência de registros pluviográficos para a

determinação da energia cinética da chuva, levou ao desenvolvimento de equações que correlacionem o índice de erosão com fatores climáticos de fácil medida.

O total pluviométrico é um parâmetro comumente usado em estudos sobre erosão do solo. O uso deste parâmetro está associado à inexistência de séries históricas representativas de intensidade, energia cinética e momento em muitas regiões e à grande disponibilidade de dados referentes à precipitação total (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2012).

Após realizar estudos sobre a erosividade das chuvas no Brasil, Silva (2004, *apud* PRUSKI, 2009) propôs a divisão do país em regiões homogêneas de precipitação. Para cada uma das 8 regiões homogêneas (Figura 1) foram estabelecidas equações que permitem estimar, a partir das precipitações médias mensal e anual, a erosividade das chuvas para cada mês (Tabela 1).



Figura 1 – Divisão do Brasil em regiões homogêneas, em termos de características de precipitação.  
Fonte: Pruski (2009)



Tabela 1 – Equações propostas por diversos autores para estimar a erosividade para cada mês ( $R_x$ ) a partir das precipitações médias mensais ( $M_x$ ) e da Precipitação média anual (P).

Região	Equação	Autor(es)
1	$R_x = 3,76 \left( \frac{M_x^2}{P} \right) + 42,77$	Oliveira Jr. e Medina (1990)
2	$R_x = 36,894 \left( \frac{M_x^2}{P} \right)^{1,0852}$	Morais <i>et al.</i> (1991)
3	$R_x = (0,66M_x) + 8,88$	Oliveira Jr. (1988)
4	$R_x = 42,307 \left( \frac{M_x^2}{P} \right) + 69,76$	Silva (2001)
5	$R_x = 0,13(M_x^{1,24})$	Leprun (1981)
6	$R_x = 12,592 \left( \frac{M_x^2}{P} \right)^{0,6030}$	Val <i>et al.</i> (1986)
7	$R_x = 68,73 \left( \frac{M_x^2}{P} \right)^{0,841}$	Lombardi Neto e Moldenhauer (1992)
8	$R_x = 19,55 + (4,2M_x)$	Rufino <i>et al.</i> (1993)

Fonte: Pruski (2009)

A erosividade das chuvas de um dado local, também denominada Fator R, pode ser determinada pela soma dos valores de erosividade mensal,  $R_x$ . Quando existe uma série histórica de 20 anos ou mais, as equações da Tabela 1 são capazes de estimar com boa precisão a erosividade das chuvas na região.

### 2.2.2. Erodibilidade do solo - Fator K

As propriedades do solo são importantes nos estudos de erosão, pois somadas aos demais fatores controladores, contribuem para aumentar ou diminuir a suscetibilidade dos solos à erosão. Bertoni e Lombardi Neto (2012) conceituaram

erodibilidade como a vulnerabilidade ou suscetibilidade do solo à erosão ou ainda como a resistência do solo à erosão.

Uma série de propriedades físicas do solo afeta a erosão, destacando-se aquelas que interferem na velocidade de infiltração, na permeabilidade e na capacidade de absorção da água no solo, bem como aquelas que resistem aos mecanismos de erosão. Dentre estas propriedades, Guerra e Cunha (2012) citam a textura, a densidade aparente, a porosidade, o teor de matéria orgânica e o pH do solo, destacando que estas propriedades não são estáticas e sim uma função do tempo.

A erodibilidade dos solos (também chamada de Fator K) é determinada empiricamente em parcelas de campo (considerando um período de monitoramento), com a medição das perdas de solo *in situ* e determinação da erosividade da chuva do local. Neste método, utiliza-se a equação empírica de Wischmeier e Smith (1978, *apud* PRUSKI, 2009), fixando dos demais parâmetros para condições unitárias (C=1 sem vegetação, P=1 sem práticas conservacionistas e LS=1, com inclinação padrão das parcelas unitárias).

Vários autores determinaram a erodibilidade de diferentes tipos de solos e os valores podem ser encontrados na literatura. Ressalta-se, porém, que a determinação experimental do Fator K trata-se de um procedimento custoso e requer anos de determinação, além disso, a determinação através da equação empírica não se aplica a solos tropicais devido à heterogeneidade destes solos (PRUSKI, 2009). Assim sendo, a consulta bibliográfica apresenta-se como uma importante ferramenta para determinação do Fator K, através da consulta a pesquisas que analisaram unidades pedológicas semelhantes às da área em estudo.

### **2.2.3. Comprimento e grau de declive - Fator LS**

A topografia do terreno também exerce influência sobre a erosão: a declividade da encosta, bem como seu comprimento e sua forma são fatores de grande importância no estudo dos processos erosivos, atuando entre si e com os outros fatores, favorecendo ou retardando o processo de erosão (GUERRA & CUNHA, 2012).

O grau de declive influencia o volume e a velocidade das enxurradas e, de acordo com (PRUSKI, 2009), quanto maior for a declividade maior será o

escoamento superficial, entretanto este parâmetro deve ser analisado considerando as características da superfície do solo, que também influenciam o processo de erosão.

Brady (1989) afirma que o comprimento da rampa da encosta também possui grande importância, pois o volume das águas e a velocidade do escoamento tendem a aumentar com o aumento do caminho percorrido pela água. Para Bertoni e Lombardi Neto (2012), a forma do relevo também exerce grande influência sobre a erosão do solo, porém não há estudos conclusivos que permitam quantificar a influência do formato da encosta (convexo ou côncavo) na erosão do solo.

A intensidade da erosão do solo é fortemente afetada pelo comprimento do declive (denominado Fator L) e pelo seu gradiente de inclinação (denominado Fator S), de modo que os fatores L e S podem ser analisados individual ou conjuntamente. Quando analisados conjuntamente passam a ser chamados de Fator LS ou fator topográfico.

De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (2012), a determinação do Fator LS pode ser feita através da equação desenvolvida por Bertoni (1958, *apud* BERTONI & LOMBARDI NETO, 2012), conforme a Equação 2.

$$LS = 0,00984C^{0,63}D^{1,18} \quad (2)$$

onde,

LS = fator topográfico;

C = comprimento da rampa, m; e

D= grau do declive, %;

#### **2.2.4. Uso e manejo do solo ou cobertura vegetal - Fator C**

As perdas de solo podem ser estimadas pelos fatores R, K, L e S da Equação Universal de Perdas de Solo. Entretanto, se a área estiver sendo cultivada, as perdas de solo serão reduzidas devido à proteção que o cultivo oferece. Bertoni e Lombardi Neto (2012) afirmam que a erosão do solo pode ser maior ou menor em determinada área dependendo da combinação de cobertura vegetal, sequência e estágio de crescimento de cultura e práticas de manejo. Assim sendo, o uso e

manejo do solo, também denominado Fator C, representa a influência das variações nos sistemas de cultivo e manejo sobre as perdas de solo.

A cobertura vegetal em taludes é um fator de extrema importância no estudo da erosão dos solos. Guerra e Cunha (2012) afirmam que a vegetação influencia os processos erosivos reduzindo a energia cinética das chuvas, modificando as taxas de infiltração e escoamento superficial e formando também um material húmico que favorece a estabilidade dos solos. Estes autores registram que áreas com alta cobertura vegetal apresentam, no geral, baixas taxas de *runoff* e baixa erosão.

De acordo com Brady (1989), boa parte dos valores apresentados na literatura referentes ao fator C foi determinada por pesquisadores experientes e com grande conhecimento de coberturas agrícolas e manejo em áreas experimentais. Hoje sabe-se que áreas com grandes florestas ou com grande quantidade de vegetação tendem a possuir um Fator C reduzido, enquanto solos com pouca cobertura possuem um Fator C elevado, geralmente próximo a 1.

#### **2.2.5. Práticas conservacionistas – Fator P**

Existe uma estreita relação entre a quantidade de perdas de solo e as atividades desenvolvidas na área de estudo. Neste contexto, podem ser adotadas medidas de natureza estrutural-mecânica, hidráulica ou de nivelamento para reduzir a erosão, diminuindo a velocidade do escoamento superficial e minimizando a tendência da água de fluir encosta abaixo (ARAÚJO *et al.*, 2013). Na literatura estas medidas são denominadas práticas conservacionistas ou Fator P.

Nos estudos em áreas onde não há o desenvolvimento de práticas conservacionistas adota-se a medida unitária, 1, como correspondente ao Fator P.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1. Área de estudo

O Aterro Sanitário Regional do Cariri tem por objetivos destinar corretamente os resíduos gerados pelos municípios do consórcio, otimizar os serviços de limpeza urbana, promover juntamente com os municípios alternativas que visem diminuir os resíduos enviados ao aterro sanitário e atender os parâmetros estabelecidos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (CEARÁ, 2012). O empreendimento, que terá vida útil de 20 anos, é de extrema importância para a região, pois evitará que dez municípios, a saber, Crato, Juazeiro do Norte, Barbalha, Altaneira, Caririaçu, Farias Brito, Jardim, Missão Velha, Nova Olinda e Santana do Cariri, destinem seus resíduos em lixões.

Para tanto, o empreendimento será construído na área rural do município de Caririaçu (Figura 2), localizado na porção sul do Estado do Ceará, na Região Metropolitana do Cariri, situando-se a 520 km de Fortaleza-CE.

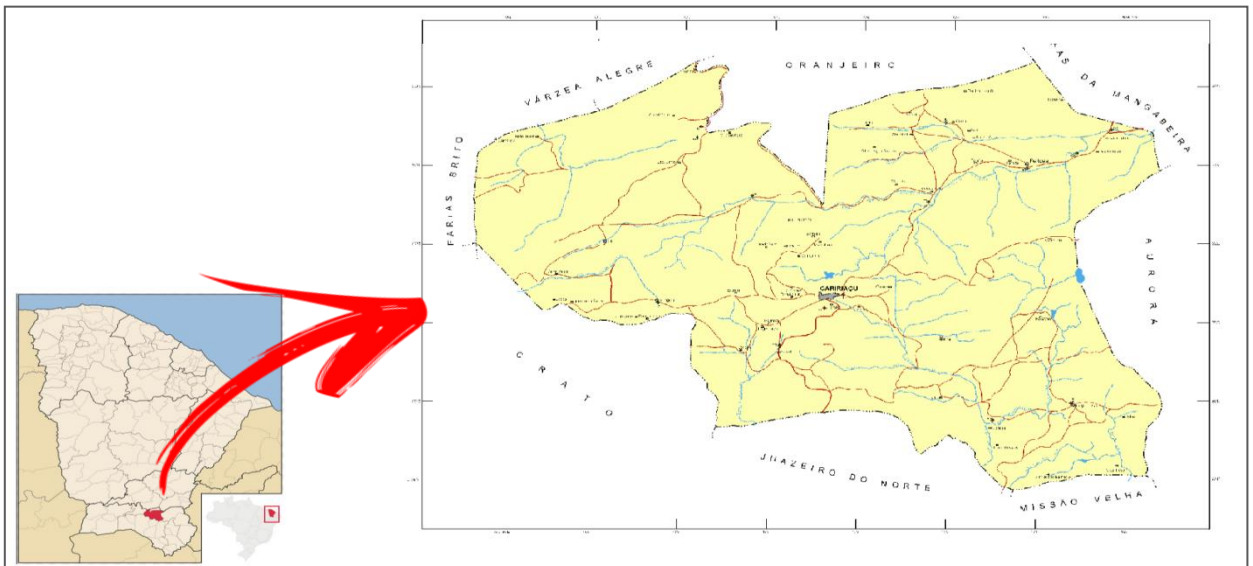


Figura 2 – Localização do município de Caririaçu-CE  
Fonte: Elaborado pela autora a partir de CPRM (2018)

O município de Caririaçu possui clima Tropical Quente Semiárido e Tropical Quente Semiárido Brando e apresenta temperatura média entre 24 e 26 °C (IPECE, 2018). A Figura 3, elaborada a partir de dados pluviométricos (1974-2017) disponíveis no sítio da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos do

Ceará – FUNCEME, apresenta a precipitação média mensal no município de Caririáçu. Através dela conclui-se que o período chuvoso da área de estudo concentra-se entre os meses de janeiro e abril.

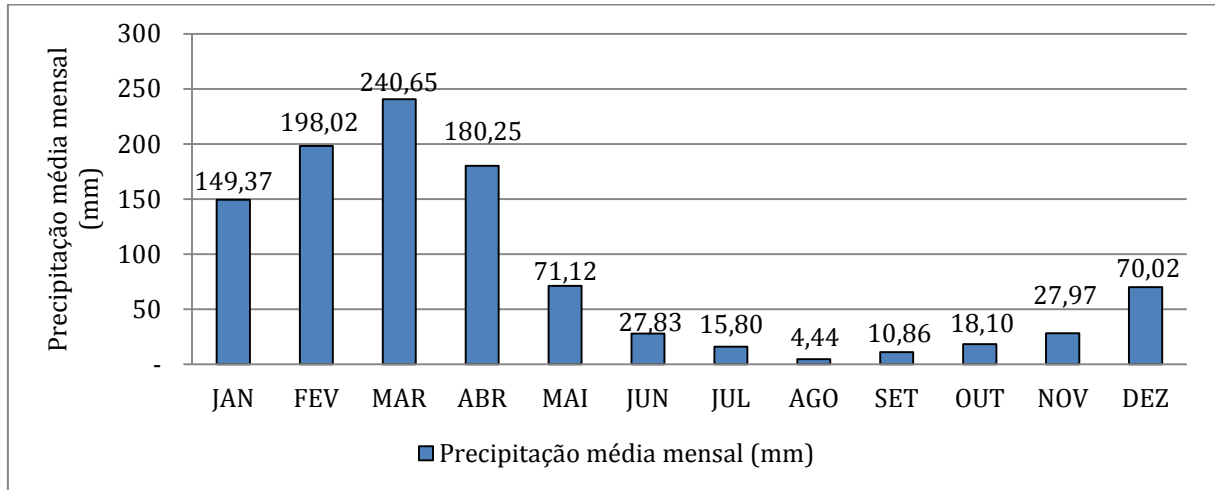


Figura 3 – Precipitação média mensal calculada para o município de Caririáçu, em mm.  
Fonte: A autora

O aterro sanitário será instalado nas proximidades da localidade do sítio Riachão, tendo as seguintes coordenadas: UTM 9.215.778 N e 471.186 E. Conforme Ceará (2012), na área onde será instalado o empreendimento são encontrados dois tipos de solo: Neossolo Litólico e Argissolo Vermelho – Amarelo, classificados de acordo com EMBRAPA (1999).

De acordo com informações obtidas na Célula de Resíduos Sólidos – CERES da Secretaria das Cidades/CE, a licença ambiental que aprova a localização e concepção do Aterro Sanitário Regional do Cariri, atestando sua viabilidade ambiental, já foi concedida pela Superintendência Estadual do Meio Ambiente – SEMACE. A licença de instalação, que autorizará o início das obras de construção do empreendimento, será concedida pelo órgão ambiental após a obtenção de recursos para sua construção.

### 3.2. Aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo – EUPS

Para estimar as perdas de solo por erosão utilizou-se a Equação Universal de Perdas de Solo – EUPS, desenvolvida na década de 50 por Wischmeier e Smith, que considera seis fatores controladores de erosão.

Para quantificar a erosividade das chuvas (Fator R), foi utilizada a série histórica de precipitação do Posto Pluviométrico Caririáçu-CE. O posto pluviométrico

em questão é monitorado e mantido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos do Ceará – FUNCEME, que disponibiliza em seu sítio informações referentes à coleta de dados pluviométricos no posto. O monitoramento no Posto Pluviométrico Caririaçu-CE foi iniciado no ano de 1974 e ocorre até os dias atuais.

Os dados pluviométricos levantados foram aplicados ao método proposto por Silva (2004, *apud* PRUSKI, 2009), que divide o país em regiões homogêneas em termos de características de precipitação. Localizado na porção sul do estado do Ceará, o município de Caririaçu enquadra-se na Região 4, sujeita a equação proposta por Silva (2001, *apud* PRUSKI, 2009), expressa por:

$$R_x = 42,307 \left( \frac{M_x^2}{P} \right) + 69,763 \quad (3)$$

Onde,

$R_x$ = erosividade mensal, MJmm/ha/h;

$M_x$ = precipitação médias mensais , mm; e

$P$ = precipitação média anual, mm.

O Fator R anual das chuvas locais foi calculado pela soma dos valores de erosividade mensal ( $R_x$ ).

A erodibilidade dos solos (Fator K) foi determinada através da consulta a artigos científicos, dissertações e teses onde o fator de erodibilidade fora determinado experimentalmente. Consultaram-se publicações que analisaram unidades pedológicas semelhantes às da área em estudo e os valores encontrados foram tabulados para obtenção da média aritmética. Os valores mínimo, médio e máximo do Fator K de cada tipo de solo foram aplicados na EUPS, de forma a obter todas as possíveis combinações.

Para o cálculo do Fator LS, consultou-se o projeto do aterro sanitário com o objetivo de realizar de identificar a geometria dos taludes. No projeto geométrico do aterro é definida a configuração topográfica dos taludes, cuja representação em feita em plantas e perfis, apresentando medidas de declividade e comprimento de rampa, entre outras. No projeto do Aterro Sanitário Regional do Cariri está prevista a sua divisão em 81 perfis ou seções transversais, dentre os quais foram selecionados os quatro perfis com menor fator de segurança para aplicação na Equação 2, desenvolvida por Bertoni (1958, *apud* BERTONI & LOMBARDI NETO, 2012). Os

resultados obtidos para os quatro perfis selecionados foram aplicados na EUPS, de forma a obter todas as possíveis combinações.

Para a determinação do Fator C, foram consultados artigos científicos, dissertações e teses nos quais o fator uso e manejo do solo foi determinado experimentalmente em solos com coberturas de gramíneas.

Admitindo-se que não serão desenvolvidas práticas conservacionistas para o controle da erosão na cobertura do aterro sanitário em questão, adotou-se o valor unitário, 1, como correspondente ao Fator P.

### **3.3 Classificação da pesquisa**

Do ponto de vista da sua natureza, este trabalho pode ser considerado como pesquisa aplicada, uma vez que envolve verdades e interesses locais relativos à erosão em coberturas de aterro sanitário, objetivando gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos.

Quando analisado sob o ponto de vista de seus objetivos, este trabalho assume a forma de levantamento de dados e pode ser considerado como pesquisa descritiva, uma vez que dados acerca dos fatores controladores das perdas de solo por erosão são registrados, analisados, classificados e interpretados, sem que o pesquisador interfira neles. Os dados foram obtidos pelo pesquisador por meio de técnicas padronizadas de coleta de dados.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, o trabalho pode ser considerado como pesquisa bibliográfica e documental. A classificação como pesquisa bibliográfica deve-se ao fato de se basear em materiais bibliográficos como livros, periódicos, teses e dissertações. A classificação como pesquisa documental deve-se ao fato de se basear em materiais que não receberam ainda um tratamento analítico e em materiais que foram reelaborados de acordo com os objetivos da pesquisa. Os documentos consultados foram planilhas com dados pluviométricos extraídas do sítio da FUNCEME e o projeto do aterro sanitário.

Sob o ponto de vista da abordagem do problema, o trabalho pode ser classificado como pesquisa quantitativa, uma vez que considera dados relativos fatores controladores das perdas de solo por erosão que podem ser quantificados, traduzidos em números, classificados e analisados com o uso de recursos e de técnicas estatísticas.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Erosividade das chuvas - Fator R

Para a estimativa das perdas de solo na superfície do Aterro Sanitário Regional do Cariri empregou-se a Equação Universal de Perdas de Solo-EUPS, que permite a previsão das perdas de solo por erosão considerando a ação dos fatores mais importantes na erosão hídrica, a saber, erosividade das chuvas, erodibilidade dos solos, inclinação e comprimento da encosta, uso e manejo do solo e práticas conservacionistas. A análise do fator erosividade das chuvas no empreendimento em questão foi realizada com base no método proposto por Silva (2004, *apud* PRUSKI, 2009), que divide o país em regiões homogêneas em termos de características de precipitação.

A ser futuramente instalado na porção sul do estado do Ceará, o Aterro Sanitário Regional do Cariri enquadra-se na Região 4 do mapa proposto por Silva (2004, *apud* PRUSKI, 2009). Aplicando na equação desenvolvida para esta região os dados referentes ao total de chuvas medido no Posto Pluviométrico Caririaçu-CE (série histórica de 44 anos), foi possível determinar a perfil de erosividade mensal das chuvas da região. Na Figura 4 são apresentadas as erosividades mensais calculadas a partir dos índices pluviométricos medidos no município de Caririaçu, entre os anos de 1974 e 2017.

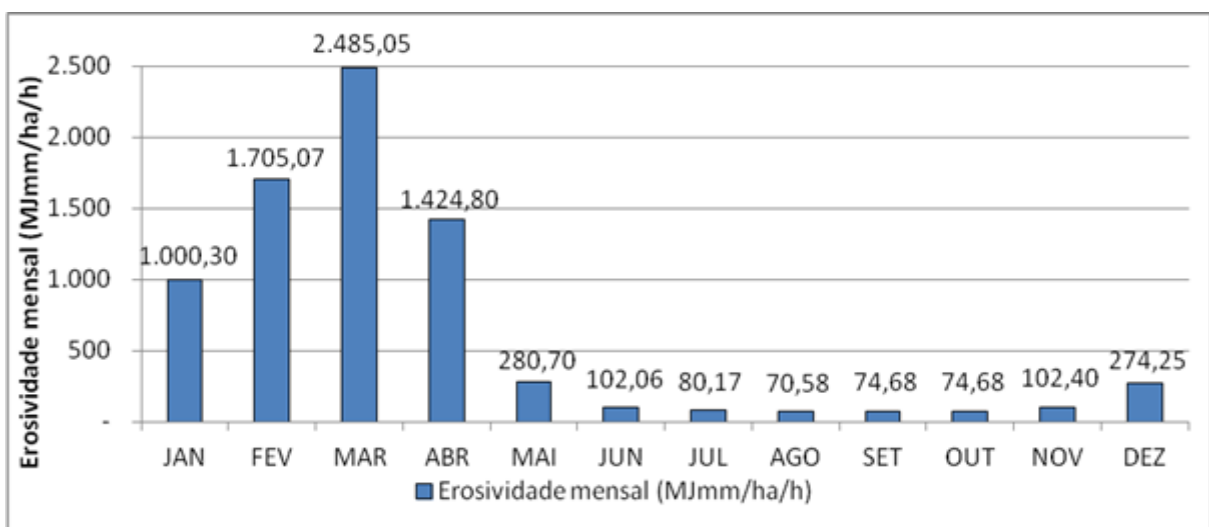


Figura 4 – Erosividade mensal, em MJmm/ha/h calculada para o município de Caririaçu.  
Fonte: A autora

A erosividade mensal variou entre 70,58 MJmm/ha/h, no mês mais seco, e 2.485,05 MJmm/ha/h, no mês mais chuvoso e o Fator R, obtido pela soma das erosividades mensais, foi de 7.683,49 MJmm/ha/h. O Fator R obtido pode ser classificado como de erosividade forte de acordo com a classificação proposta em Carvalho (2008, *apud* SANTOS & MONTENEGRO, 2012), apresentada na Tabela 2.

Tabela 2- Classe para interpretação do índice de erosividade anual (Fator R)

<b>Erosividade (MJmm/ha/h)</b>	<b>Classes de erosividade</b>
R ≤ 2453	Erosividade fraca
2452 < R ≤ 4905	Erosividade moderada
4905 < R ≤ 7357	Erosividade moderada a forte
7357 < R ≤ 9810	Erosividade forte
R > 9810	Erosividade muito forte

Fonte: Carvalho (2008, *apud* SANTOS & MONTENEGRO, 2012).

O Fator R obtido, 7.683,49 MJmm/ha/h, é mais alto do que o encontrado nas pesquisas realizadas por Silva e Dias (2003) em Fortaleza-CE, igual a 6.900,1 MJmm/ha/h, classificado como de erosividade moderada a forte de acordo com a classificação proposta em Carvalho (2008, *apud* SANTOS & MONTENEGRO, 2012).

Os resultados de Silva e Dias (2003) foram obtidos pelo uso do índice  $EI_{30}$ , que analisa a energia cinética e a intensidade das chuvas ( $I_{30}$ ). Acredita-se que a diferença dos resultados seja justificada pela diferença dos métodos empregados, uma vez que o método utilizado por Silva e Dias (2003) fornece resultados mais precisos do que aqueles obtidos a partir do total pluviométrico. No entanto nota-se uma semelhança nos resultados dos dois métodos, mostrando que o uso de equações empíricas que utilizam o total de chuvas pode ser fornecer um dado aproximado sobre a erosividade.

#### **4.2. Erodibilidade do solo - Fator K**

De acordo com Ceará (2012), na área de influência do projeto são encontrados neossolos litólicos e argissolos vermelho-amarelos, solos cujas propriedades lhes conferem considerável suscetibilidade à erosão. Os neossolos litólicos são solos poucos profundos e bastante suscetíveis à erosão (SANTOS *et*

*al.*, 2018a), enquanto os argissolos vermelho – amarelos são solos profundos, bem drenados na superfície e, em alguns casos, suscetíveis à erosão (SANTOS *et al.*, 2018b).

Para a determinação do Fator K, que representa a erodibilidade do solo, foi realizado um levantamento bibliográfico com o intuito de reunir pesquisas já realizadas com solos de mesma classificação que os encontrados na região estudada. A Tabela 3 apresenta os valores referentes ao Fator K obtidos a partir da consulta a dez publicações em que foram analisadas as mesmas tipologias de solo encontradas na área de instalação do aterro.

Tabela 3 – Fator K, de erodibilidade, calculado por diversos autores para neossolos litólicos e argissolos vermelho-amarelos, em t.ha.h/ha.MJ.m

	<b>Neossolo Litólico</b>	<b>Argissolo vermelho-amarelo</b>
Farinasso <i>et al.</i> (2006)	0,036	0,047
Santos (2008)	0,039	0,041
Moretti <i>et al.</i> ( <i>apud</i> SILVA, 2005)	0,035	0,043
Ribeiro e Alves. (2007)	0,040	0,047
Freitas <i>et al.</i> (2007)	0,040	0,040
Chaves (1994)	0,035	0,029
Serio <i>et al.</i> (2008)	0,012	0,026
Bloise <i>et al.</i> (2001)	0,037	-
Correchel (2003)	-	0,043
Miqueloni e Bueno (2011)	-	0,036
Média	0,034	0,039

Fonte: A autora

Os neossolos litólicos apresentaram Fator K variando entre 0,012 e 0,04 t.ha.h/ha.MJ.mm, enquanto os argissolos vermelho-amarelos apresentaram Fator K variando entre 0,026 e 0,047 t.ha.h/ha.MJ.mm. O Fator K médio foi de 0,034 e 0,039 t.ha.h/ha.MJ.mm para neossolos litólicos e argissolos vermelho-amarelos, respectivamente.

De acordo com a Tabela 4, os fatores K médio dos solos em questão podem ser classificados como de erodibilidade média, se enquadrados conforme Foster *et al.* (1981, *apud* MANNIGEL *et. al.*, 2002), ou como de erodibilidade alta, se enquadrados conforme Mannigel *et al.* (2002).

Tabela 4- Classe para interpretação do índice de erodibilidade (Fator K, em t.ha.h/ha.MJ.mm)

	Mannigel <i>et al.</i> (2002)	Foster <i>et al.</i> (1981, <i>apud</i> MANNIGEL <i>et. al.</i> , 2002)
$K < 0,0090$	Muito baixo	-
$0,0090 < K < 0,0150$	Baixo	Baixo
$0,0150 < K < 0,0300$	Médio	
$0,0300 < K < 0,0450$	Alto	Médio
$0,0450 < K < 0,0600$	Muito alto	
$K > 0,0600$	Extremamente alto	Alto

Fonte: A autora

Os valores mínimo, médio e máximo do Fator K de cada tipo de solo foram aplicados na EUPS, de forma a obter todas as possíveis combinações.

#### 4.3. Comprimento e grau de declive - Fator LS

Para o cálculo do Fator LS, que representa a “relação esperada de perdas de solo por unidade de área em um declive qualquer em relação a perdas de solo correspondentes de uma parcela unitária de 25 m de comprimento com 9% de declive”, utilizou-se a equação desenvolvida por Bertoni (1958, *apud* BERTONI & LOMBARDI NETO, 2012).

Na determinação do Fator LS simplificou-se a superfície do talude, desconsiderando a possível ocorrência de bermas, e analisou-se as configurações de comprimento e declive do talude apenas dos perfis com menor fator de segurança, a saber, os perfis 56, 63, 64 e 71, obtidos no projeto do aterro sanitário. A Figura 5 mostra a seção transversal 56 desenhada no *software* GeoSlope.

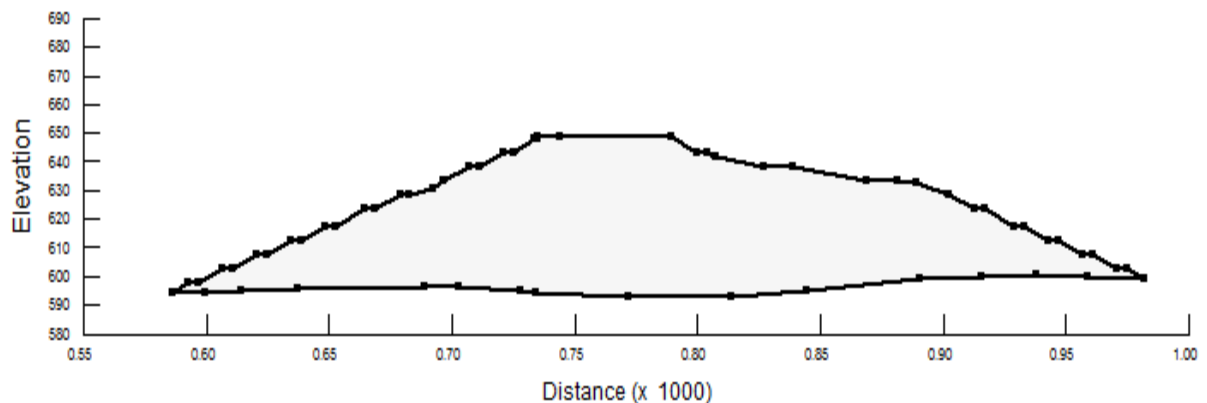


Figura 5 – Representação da Seção Transversal 56.

Fonte: Rodrigues (2014)

A Tabela 5 apresenta o comprimento e a declividade dos perfis, bem como o Fator LS de cada um dos perfis, calculado pela equação de Bertoni (1958, *apud* BERTONI & LOMBARDI NETO, 2012).

Tabela 5- Comprimento e declividade dos perfis para cálculo do Fator LS.

<b>Perfil</b>	<b>L (m)</b>	<b>S (%)</b>	<b>LS</b>
56	199,4	26	12,87
63	183,4	31	15,34
64	200,4	28	14,14
71	163,8	34	15,91

Fonte: A autora

Os resultados de Fator LS dos quatro perfis selecionados foram aplicados na EUPS, de forma a obter todas as possíveis combinações.

#### **4.4. Uso e manejo do solo - Fator C**

A presença de cobertura vegetal na superfície de um terreno pode reduzir consideravelmente as perdas de solo devido à proteção que o cultivo oferece. Salgado (2010) afirma que para cobertura final de aterros sanitários é mais indicado o uso de gramíneas, pois estas apresentam raízes pouco profundas, não atingindo as demais camadas do aterro.

Através da consulta a estudos disponíveis na literatura, constatou-se que boa parte dos estudos realizados para obtenção do Fator C dedica-se à investigação deste fator considerando de uso e manejo de espécimes agrícolas e florestais, havendo escassez de material bibliográfico que considere gramíneas e famílias de plantas semelhantes a estas. Por este motivo, foram utilizadas como referência para este trabalho apenas as publicações de Pereira (2006) e Orozco (2009), que utilizaram em suas pesquisas um Fator C de 0,01 (adimensional).

#### **4.5. Práticas conservacionistas – Fator P**

Admitindo-se que não serão desenvolvidas práticas conservacionistas para o controle da erosão na cobertura do aterro sanitário em questão, adotou-se o valor unitário, 1, como correspondente ao Fator P.

#### 4.6. Estimativa das perdas de solo na cobertura do Aterro Sanitário Regional do Cariri

O produto dos fatores R, K, L, S, C e P representa uma estimativa das perdas de solo por erosão, uma vez que este produto corresponde à própria Equação Universal de Perdas de Solo. Todas as possíveis combinações dos fatores controladores de erosão na cobertura de perfis selecionados do Aterro Sanitário Regional do Cariri estão dispostas na Tabela 6.

Tabela 6 – Possíveis combinações de R, K, L, S, C e P e aplicação na EUPS

<b>R</b> (MJmm/ha/h)	<b>K</b> (t.ha.h/ha.MJ.mm)	<b>LS</b> (adimensional)	<b>C</b> (adimensional)	<b>P</b> (adimensional)	<b>RKLSCP</b> (t/ha/ano)
7.683,49	0,012	12,87	0,01	1,0	11,866
	0,034				33,621
	0,04				39,555
	0,026				25,710
	0,039				38,566
	0,047				46,477
	0,012	15,34			14,144
	0,034				40,074
	0,04				47,146
	0,026				30,645
	0,039				45,967
	0,047				55,396
	0,012	14,14			13,037
	0,034				36,939
	0,04				43,458
	0,026				28,248
	0,039				42,371
	0,047				51,063
	0,012	15,91			14,669
	0,034				41,563
	0,04				48,898
	0,026				31,784
	0,039				47,675
	0,047				57,455
<b>Média</b>					<b>36,930</b>

Fonte: A autora

A partir da combinação dos fatores controladores de erosão verifica-se que as taxas de perdas de solo da cobertura do Aterro Sanitário Regional do Cariri

nos perfis analisados estão situadas no intervalo entre 11,866 e 57,455 t/ha/ano, apresentando uma média de 36,930 t/ha/ano. Ao comparar a taxa média de perda de solo anual por erosão da região com os intervalos propostos por FAO; UNEP; UNESCO (1980, *apud* Galdino *et al.*, 2004), apresentados na Tabela 7, é possível afirmar que o seu grau de erosão hídrica pode ser considerado moderado.

Tabela 7 – Classificação do grau de erosão hídrica

<b>Perda de solo (t/ha/ano)</b>	<b>Grau de erosão</b>
<b>&lt; 10</b>	Nenhuma ou ligeira
<b>10 &lt; PS &lt; 50</b>	Moderada
<b>50 &lt; PS &lt; 200</b>	Alta
<b>&gt; 200</b>	Muito alta

Fonte: FAO; UNEP; UNESCO (1980, *apud* Galdino *et al.*, 2004)

A taxa média de perdas de solo obtida, classificada como com grau de erosão hídrica moderado, pode ser justificada pelos altos valores obtidos no cálculo dos fatores controladores. O cenário da área de estudo compreende chuvas com forte erosividade, solos com erodibilidade média a alta, terrenos com superfícies extensas e de alta declividade e solos cobertos com cultivo de gramíneas sem o desenvolvimento de práticas conservacionistas para o controle da erosão.

As chuvas da região apresentaram uma alta erosividade (Fator R), entretanto, este fator foi calculado a partir do total pluviométrico da região. O método utilizado é o menos preciso para este fim e seu uso é indicado apenas para os casos onde não há disponibilidade de dados que permitam o uso de outros parâmetros. Assim sendo, o Fator R pode estar superestimado, apresentando um valor superior ao real.

Observa-se que o Fator K também apresentou valores elevados, no entanto menores taxas de perdas de solo são obtidas a partir do cálculo utilizando apenas neossolos litólicos. Desse modo, o uso de neossolos litólicos deve ser priorizado para a cobertura final do aterro, em detrimento dos argissolos vermelho-amarelos, que apresentam um Fator K de erodibilidade dos solos maior.

É interessante observar que apesar dos quatro perfis analisados apresentarem pouca variação de declividade e comprimento de rampa entre si, o Fator LS, quando inserido na EUPS, varia consideravelmente a taxa de erosão.

É importante ressaltar também que a adoção de práticas conservacionistas de combate à erosão poderia reduzir consideravelmente as taxas observadas. Observa-se ainda que, apesar de no projeto do Aterro Sanitário Regional do Cariri não haver previsão explícita sobre a adoção de práticas conservacionistas, acredita-se que a geometria final típica de aterros sanitários atue como fator controlador de erosão.

A geometria final típica de aterros sanitários apresenta, no geral, forma de terraços escalonados de largura variável, assemelhando-se à prática conservacionista de terraceamento. Se assim consideramos, o Fator P deixa de assumir valor unitário e passa a assumir valores inferiores a este. Tomaz (2008 *apud* RIGHETO, 1998) apresenta valores de Fator P para a técnica de terraceamento que variam de 0,10 a 0,18, de acordo com a inclinação do terreno. Aceitar esta consideração e utiliza-la na EUPS reduziria consideravelmente as taxas de perdas de solo por erosão obtidas.

Este estudo teórico serviu para fornecer estimativas de perdas de solo na cobertura do Aterro Sanitário Regional do Cariri. Considerando que o empreendimento em questão ainda não foi implantado, compreende-se que este trabalho pode gerar uma importante contribuição uma vez que elucida os processos erosivos em sua cobertura. Assim sendo, o processo de erosão na cobertura do aterro deve ser acompanhado e monitorado durante a operação do aterro sanitário e após o encerramento de sua vida útil, de modo a garantir que medidas sejam tomadas para que não haja o comprometimento da estrutura do empreendimento em questão.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa propôs-se a quantificar os fatores controladores envolvidos no processo de erosão hídrica, com a finalidade estimar as taxas de erosão na cobertura de perfis selecionados do Aterro Sanitário Regional do Cariiri. O cenário da área de estudo compreende chuvas com forte erosividade, solos com erodibilidade média a alta e, conforme indicado no projeto, após o encerramento do aterro sanitário o cenário local será de terreno com superfícies extensas e alta declividade, finalizado com cultivo de gramíneas sem o desenvolvimento de práticas conservacionistas para o controle da erosão.

As características analisadas neste estudo teórico indicam que pode haver perdas significativas na cobertura do aterro se não forem adotadas técnicas para o controle das perdas de solo. A aplicação dos fatores R, K, L, S, C e P na Equação Universal de Perdas de Solo permitiu a estimativa da taxa média de perdas de solo por erosão, correspondente a 36,930t/ha/ano. Esta taxa é classificada como moderada conforme os critérios de FAO; UNEP; UNESCO (1980, *apud* Galdino *et al.*, 2004), no entanto algumas parcelas da EUPS podem ter sido superestimadas, como por exemplo a erosividade das chuvas, calculada pelo total pluviométrico da região, e a erodibilidade dos solos, obtida pela consulta de publicações científicas.

Considerando que o aterro sanitário é uma obra de engenharia destinada ao confinamento de resíduos sólidos, a erosão de sua superfície pode comprometer o confinamento dos resíduos sólidos ali depositados, podendo comprometer também a estabilidade estrutural dos taludes do aterro. Assim, as perdas de solo na cobertura este tipo de empreendimento são indesejáveis, esperando-se nela nenhum ou ligeiro grau de erosão, de modo a garantir o confinamento dos resíduos sólidos e a estabilidade estrutural dos taludes.

Com o intuito de obter menores taxas de perdas de solo, sugere-se a modificação no projeto dos perfis topográficos analisados, buscando uma configuração mais estável e menos suscetível a erosão, e a adoção de práticas conservacionistas de controle à erosão. A adoção de práticas como o plantio em curvas de nível e o cultivo em faixas ou cordões de vegetação permanente poderão diminuir consideravelmente as taxas de erosão e, portanto, constituem-se como uma

boa alternativa para o controle dos processos erosivos na cobertura do aterro sanitário estudado. Além disso, sugere-se um monitoramento da erosão na cobertura dos perfis analisados durante a operação do aterro sanitário e após o encerramento de sua vida útil.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419: Informação Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ARAÚJO, G. H. S.; ALMEIDA, J. R.; GUERRA, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. 10ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. ed. São Paulo: Ícone, 2012.
- BLOISE, G. L. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; REATTO, A.; GUIMARÃES, R. F.; MARTINS, E. S. & CARVALHO, A. P. F. **Avaliação da Suscetibilidade Natural à Erosão dos Solos da Bacia do Olaria-DF**. Planaltina: 2001.
- BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989.
- BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, DF, v. X, n. Y, p. Z, 3, ago., 2010. Seção 1. Pt. 3.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2016**. Brasília: MCIDADES.SNSA, 2018.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Aterro sanitário**. Disponível em: < <http://cetesb.sp.gov.br/biogas/aterro-sanitario/>> Acesso em: 24 de julho de 2018.
- CHAVES, H. M. L. **Estimativa da erosão atual e potencial no Vale do São Francisco**. In: Relatório Final de Consultoria. Brasília, 1994.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Ceará - Atlas Digital dos Recursos Hídricos Subterrâneos**. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Ceara---Atlas-Digital-dos-Recursos-Hidricos-Subterraneos-588.html>> Acesso em: 24 de julho de 2018.
- CORRECHEL, V. **Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do "fallout" do 137Cs**. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo (USP). Centro de Energia Nuclear na Agricultura Piracicaba. Piracicaba, 2003.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M. **Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal de Perdas de Solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba – PI-MA**. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, ano 7, nº 2, p. 73-85, 2006.
- FREITAS, L. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; MARTINS, E. S.; LOEBMANN, D. G. **Determinação do potencial de erosão a partir da utilização da EUPS na bacia do rio Preto**. *Revista Espaço & Geografia*, vol. 10, nº 2. São Paulo, 2007.

- GALDINO, S.; VIEIRA, L. M.; PADOVANI, C. R.; SORIANO, B. M. A. **Erosão Potencial Laminar Hídrica na Bacia do Alto Taquari**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 9, n.2, p. 125-133, 2004.
- GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **Panorama dos resíduos sólidos do Ceará – Versão resumida**. Secretaria do Meio Ambiente do Ceará - SEMA. Gaia Engenharia Ambiental. Ceará, 2015.
- GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **Estudo de Impacto Ambiental – EIA e Relatório de Impacto Ambiental – RIMA para a implantação do Aterro Sanitário Regional do Cariri – Caririaçu – CE**. Vol. 2. Fortaleza, 2012
- GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ. **Aterro Sanitário Regional do Cariri**. Projeto Executivo. Projeto Geométrico. Vol. 4A. Fortaleza, 2013.
- GUERRA, A. J. T; CUNHA, A. S. **Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos**. 11ª Ed. Rio de Janeiro: Betrand Brasil, 2012.
- INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil Básico Municipal 2017 – Caririaçu**. Fortaleza, 2018.
- MAGALHÃES, R. A. **Erosão: Definições, tipos e formas de controle**. In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia, 2001.
- MANHAGO, S. R. **Técnicas de revegetação de taludes de aterro sanitário**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2008. 18f.
- MANNIGEL, A. R.; CARVALHO M. De P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. R. **Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo**. Revista Acta Scientiarum, v.24, n.5, p.1335-1340, 2002.
- MIQUELONI, D. P; BUENO, C. R. P. **Análise multivariada e variabilidade espacial na estimativa da erodibilidade em um argissolo vermelho-amarelo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 35, nº 6, 2011.
- MONTEIRO; J. H. P. **Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200p.
- MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 5. Ed. Rio de Janeiro: ABES, 2012.
- PEREIRA, A. R. Determinação da perda de solo. Boletim Técnico. **Deflor**, ano 01, n. 001, 2006.
- OROZCO, M. M. D. **Caracterização da gramínea *Vetiveriazizanioides* para aplicação na recuperação de áreas degradadas por erosão**. 2009. 96 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- PRUSKI, F. F. **Conservação de solo e água – Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa: Ed. UFV, 2009.
- PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. 2. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2004.
- RIBEIRO, L. S; ALVES, M. G. **Quantificação de perda de solo por erosão no município de Campos dos Goytacazes/RJ através de técnicas de geoprocessamento**. UIENF, Rio de Janeiro, 2007.
- RODRIGUES, B. F. **Análise de estabilidade de um aterro sanitário no município de Caririaçu através da modelagem geomecânica**. Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia. Relatório técnico-científico. Fortaleza, 2104.
- SALGADO, L. D. **Análise da aplicação de agregado reciclado em cobertura de aterros de resíduos sólidos urbanos**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental, 2010.
- SANTOS, E. P. **Simulações do potencial erosivo frente a mudanças climáticas em Mato Grosso/BR: Experimentos a partir de técnicas de geoprocessamento**

- e mapeamentos disponíveis na Internet.** Monografia (Especialização em Geoprocessamento) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2008.
- SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J.; ALMEIDA, E. P. C. **Neossolos litólicos.** Disponível em: < [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONT000gn230xho02wx5ok0liq1mqxhk6vk7.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn230xho02wx5ok0liq1mqxhk6vk7.html)> Acesso em: 01 de maio de 2018a..
- SANTOS, H. G.; ZARONI, M. J.; ALMEIDA, E. P. C. **Argissolos vermelho- amarelos.** Disponível em: < [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONT000gn0pzmhe02wx5ok0liq1mqk4130gy.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn0pzmhe02wx5ok0liq1mqk4130gy.html)> Acesso em: 01 de maio de 2018b.
- SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A. **Erosividade e padrões hidrológicos de precipitação no Agreste Central pernambucano.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.16, n.8, p.871–880, 2012.
- SERIO, J.; COSTA, A. G.; TEIXEIRA, A. S.; ORTEGA, E. **Aplicação da USLE e SIG na caracterização de três microbacias hidrográficas no Brasil.** Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais, vol. 6, nº 2, 2008.
- SILVA, J. R. C.; DIAS, A. S.. **A erosividade das chuvas em Fortaleza (CE): II - correlação com o coeficiente de chuva e atualização do fator R no período de 1962 a 2000.** Rev. Bras. Ciênc. Solo vol.27, n.2 Viçosa Mar, 2003.
- SILVA, M. A.; ALVARES, C. A. **Levantamento de informações e estruturação de um banco de dados sobre a erodibilidade de classes de solos no estado de São Paulo.** Revista Geociências, Rio Claro, vol. 24, nº 1, 2005.
- TOMAZ, P. **Curso de Manejo de águas pluviais:** Capítulo 23- RUSLE- Equação revisada universal de perda de solo. Guarulhos. 2008.

ANEXO

ANEXO A – Consórcios para Resíduos Sólidos no Estado do Ceará (2018)

