



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Trabalho de Licenciatura

**Determinação da produção de sedimentos em bacias hidrográficas de regiões
tropicais**

Estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Umbeluzi

Frâncio Armando André Mate

Supervisor:

Prof. Doutor Eng^o. Dinis Juízo

Maputo, Agosto de 2022



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Trabalho de Licenciatura

Determinação da produção de sedimentos em bacias hidrográficas de regiões tropicais

Estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Umbeluzi

Frâncio Armando André Mate

Supervisor:

Prof. Doutor Eng^o. Dinis Juízo

Maputo, Agosto de 2022



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE ATRIBUIÇÃO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Referência do tema _____

Data: março de 2022

Título: Determinação da produção de sedimentos em bacias hidrográficas de regiões tropicais.

Caso de estudo: Bacia hidrográfica do rio Umbeluzi

Local de realização: Universidade Eduardo Mondlane

Supervisor

Prof. Doutor Eng^o. Dinis Juízo

Data de entrega: março de 2022

Previsão de conclusão: julho de 2022

Maputo, ____ de _____ 2022

Chefe da Comissão Científica

Visto do Chefe do Departamento

Declaro que recebi o tema do Trabalho de Licenciatura na data acima indicada

O estudante finalista

Frâncio Armando André Mate

Dedicatórias

Dedicado aos meus pais e irmãos.

“O temor do Senhor é o princípio do conhecimento, mas os insensatos desprezam a sabedoria e a disciplina.”

Provérbios 1:7 (NVI)

Agradecimentos

Agradeço ao detentor de toda a sabedoria, ciência e conhecimento, e por acaso, também Criador.

Ao Supervisor Prof. Doutor Eng. Dinis Juízo, pelo acompanhamento paciente e descontraído, pela motivação e esclarecimento de todas as dúvidas assim como fornecimento de informações relevantes para a realização do trabalho.

Aos docentes que de forma rívida, mas brilhante e sábia, desencadearam e impulsionaram o gosto pela engenharia e pela busca por mais sabedoria e conhecimento.

Agradeço em especial a minha mãe, Luísa Carlos Machava, que foi sempre a força motriz da minha vida, inclusive a académica, muito obrigado!

Agradeço ao meu Pai André Mate e irmãos: Nilza Chongo, Rosa Mate, Gizela Mate, Lurdes Inguane. Milton Inguane e Alexandre Mate, e todos familiares que contribuíram directa e indirectamente para o meu desenvolvimento em todos sentidos.

Agradeço aos meus amigos e irmãos de coração: Faizal Chivite, Júlio Langa, Hans Dete, Mateus Armando, Hélio Cláudia, Wélmio Titos, Gerson Naiete, Adérito Chambule, Adama Gakou, Craig Stefan, Narciso Vassoia, Julieta Muchine, Culpa António, Cleide Santos e Gerson Ribeiro, que sempre foram inspiração e participaram de conquistas e derrotas ao longo do meu percurso académico e pessoal, têm o meu apreço e respeito!

Às amigas Fidélica Matsinhe e Ilda Armindo, pelo apoio emocional e espiritual.

A todos os amigos e colegas do curso de Engenharia Civil e da Faculdade de Engenharia em geral, em especial: Sheldon Foster, Anita Paixão, Yara Raviua, Fábio Aires, Plínio Matimula e Celestino Comé, o meu muito obrigado.

Resumo

Este estudo visou determinar a quantidade anual média de sedimentos produzida nas sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Umbeluzi, definida como a percentagem de sedimentos erodidos que atinge a foz do rio, e avaliar as relações de causa e efeito entre a erosão anual média e os factores que intervêm neste processo. A erosão anual média do solo, laminar e por sulcos, foi quantificada através da Equação Universal Revista da Perda de Solo (EURPS), com recurso ao programa QGIS aplicado a sistemas de informação geográfica. A aplicação da EURPS requer o conhecimento da distribuição espacial dos factores R (erosividade da chuva), K (erodibilidade do solo), LS (factor topográfico), C (uso e ocupação do solo) e P (factor das práticas de conservação do solo). A erosão anual média na bacia do Umbeluzi variou de 0 a 2157,62 Mg/ha/ano, sendo que 98% da área apresentou valores de erosão inferiores a 41 Mg/ha/ano e cerca de 86% valores inferiores a 5Mg/ha/ano, o que se justifica pela predominância de maior percentagem da bacia ocupada por vegetação densa e baixa, havendo poucas áreas agrícolas e ainda menos áreas construídas; classes de uso mais propícias a erosão. A bacia foi subdividida em 8 sub-bacias de acordo com a estrutura de drenagem prevaiente e a produção de sedimentos foi calculada a partir de valores da taxa de entrega de sedimentos (TES) e da erosão bruta de cada sub-bacia, tendo-se obtido valores da produção de sedimentos entre 30 668,4 e 99 541,3 Mg/ano. Concluiu-se assim que as sub-bacias apresentam valores baixos a moderados de erosão.

Palavras Chave : EURPS, produção de sedimentos, Umbeluzi, erosão.

Abstract

This study, aimed to quantify the average annual sediment yield in watersheds of the Umbeluzi catchment, defined as the percentage of eroded sediments that reach the outlet of the river, and assess cause-effect relationships between the annual soil loss and the factors that intervene in this process. The average annual sheet and rill erosion was quantified using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), with the aid of QGIS software applied to geographic information system. The application of RUSLE requires the knowledge of the spatial distribution of the factors R (rainfall erosivity), K (soil erodibility), LS (topographic factor), C (land use and cover factor) and P (conservation practice factor). The average annual soil loss of the catchment varied between 0 and 2157,62 Mg/ha/year, with 98% of the catchment showing values below 41 Mg/ha/year and 86% of the catchment showing values below 5 Mg/ha/year favored by the fact that a major percentage of the catchment area being covered by dense vegetation (trees) and rangeland, with few cultivated or built-up areas, which are more prone to favor erosion. The catchment was divided into 8 watersheds and sediment yield was calculated for each watershed through sediment delivery ratio (SDR) values and gross erosion, resulting on values ranging from 30 668,4 to 99 541,3 Mg/year. In conclusion, the watersheds have low to moderate soil loss values.

Key-words: RUSLE, sediment yield, Umbeluzi, erosion.

Índice

Dedicatórias.....	I
Agradecimentos.....	II
Resumo	III
Abstract	IV
Lista de símbolos e abreviaturas.....	VII
Lista de Siglas	VIII
Lista de figuras	IX
Lista de tabelas	X
Lista de gráficos	X
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa.....	1
1.2 Formulação do problema	2
1.2.1 Necessidades	2
1.2.2 Problema de pesquisa	3
1.2.3 Soluções alternativas.....	3
1.3 Objectivos.....	4
1.3.1 Geral	4
1.3.2 Específicos	4
1.4 Metodologia.....	5
1.4.1 Revisão de bibliografia.....	5
1.4.2 Materiais e métodos.....	5
1.4.3 Análise dos resultados.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Perda de solo / erosão	7
2.1.1 Descrição do modelo EURPS.....	8
2.2 Taxa de entrega de sedimentos	18
2.3 Produção de sedimentos.....	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 Localização e descrição da área de estudo	21
3.1.1. Clima da região.....	22
3.2 Cálculo da perda anual média de solo	23
3.2.1 Cálculo do factor R	23
3.2.2 Cálculo do factor K	26
3.2.3 Cálculo do factor LS	31

3.2.4	Cálculo do factor C e P.....	35
3.2.5.	Distribuição da erosão na bacia hidrográfica	37
3.3.	Taxa de entrega de sedimentos	38
3.4	Produção de sedimentos	40
4	DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	41
4.1	Estimativa da perda de solo	41
4.2	Produção de sedimentos.....	48
5	CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES.....	49
5.1	Conclusões.....	49
5.2	Limitações	50
5.3	Recomendações.....	50
6	BIBLIOGRAFIA	52
6.1	Referências Bibliográficas	52
6.2	Outra bibliografia consultada.....	53
	ANEXOS.....	56
	Anexo 1 – Base de dados das estações pluviométricas da área de estudo.....	57
	Anexo 2 - Dados para o cálculo do factor R	58
	Anexo 3 – Descrição das classes de uso do solo	60

Lista de símbolos e abreviaturas

$\alpha_{i,j}$	Orientação da inclinação para a célula da grade com coordenadas (i,j)
θ	Ângulo de inclinação
λ	Comprimento da encosta (m)
A	Perda de solo por unidade de área
$A_{i,j-in}$	Área de contribuição a entrada da célula com coordenadas (i,j)
$A_{s_{i,j-in}(out)}$	Área de contribuição unitária a entrada e a saída da célula (i,j)
C	Factor de uso e gestão do solo
C_{ss}	Concentração média de sedimentos suspensos na secção transversal
D	Largura da célula
D_g	Diâmetro geométrico médio da partícula
$D_{i,j}$	Comprimento efectivo da curva de nível no interior da célula com coordenadas (i,j)
E	Erosão bruta em toda a área ou bacia
f_i	Percentagem das partículas com textura i
K	Factor de erodibilidade do solo
L	Factor do comprimento da encosta
m	Constante que depende do ângulo de inclinação
m_i	Média aritmética dos diâmetros limite das partículas com textura i
MO	Percentagem de matéria orgânica
P	Factor das práticas de conservação do solo
PS	Produção de sedimentos ou descarga de sedimentos suspensos
p	Parâmetro de permeabilidade
\bar{P}_a	Precipitação média anual

\bar{P}_m	Precipitação média mensal
Q_w	Descarga de água
R	Factor de erosividade da precipitação-escoamento $\approx EI_{30}$
Rc	Coeficiente de chuva
S	Factor da inclinação da encosta
s	Parâmetro estrutural da amostra de solo
S_x e S_y	Inclinação na direção x e y respectivamente
T	Tolerância a perda de solo

Lista de Siglas

ARA-Sul	Administração Regional de Águas
EUPS	Equação Universal da Perda de Solo
EURPS	Equação Universal Revista da Perda de Solo
GIS / SIG	<i>Geographic Information System</i> / Sistema de Informação Geográfica
HWSD	<i>Harmonized World Soil Database</i>
HWSM	<i>Harmonized World Soil Map</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> / Administração nacional de Aeronáutica e Espaço
$PS_{estimada}$	Produção anual média de sedimentos estimada
PS_{medida}	Produção anual média de sedimentos obtida a partir de medições
QGIS	Quantum GIS
TES	Taxa de Entrega de Sedimentos
USGS	<i>United States Geology Survey</i>

Lista de figuras

Figura 1_ Esquema do perfil de uma encosta para aplicação do modelo EURPS na determinação da erosão por sulcos e entre sulcos (laminar).	13
Figura 2_ Localização da área de estudo.....	21
Figura 3_ Rios e sub-bacias da bacia hidrográfica do Umbeluzi.	22
Figura 4_ Localização espacial das estações pluviométricas usadas.	24
Figura 5_ Distribuição espacial do factor de erosividade, resolução espacial de 30m, projeção WGS84.	26
Figura 6 _ Distribuição das classes de solo	29
Figura 7_ Distribuição espacial do factor K	31
Figura 8_ Indicação do processo de escolha do método para o cálculo do factor LS. ...	33
Figura 9_ Indicação do processo de escolha do resultado desejado para a geração da distribuição espacial do factor LS.	33
Figura 10_ Modelo de elevação digital da área em estudo	34
Figura 11_ Factor LS da área em estudo	34
Figura 12_ Distribuição espacial do uso e ocupação do solo da área em estudo	35
Figura 13_ Distribuição espacial do factor CP na área em estudo	36
Figura 14_ Distribuição espacial da perda de solo na bacia hidrográfica do Umbeluzi .	37
Figura 15_ Representação das sub-bacias da área em estudo	39

Lista de tabelas

Tabela 1_ Equações para o cálculo do EI_{30}	10
Tabela 2_ Valores do parâmetro estrutural do solo	11
Tabela 3_ Valores do parâmetro de permeabilidade do solo	12
Tabela 4 - Uso de terra e respectivo valor do factor C	16
Tabela 5_ Valores do factor P.	17
Tabela 6_ Métodos para o cálculo da TES baseados em índices fisiográficos da bacia hidrográfica.....	19
Tabela 7_ Classes de solo presentes na bacia hidrográfica do Umbeluzi.....	28
Tabela 8_ Diâmetros limites para cada tipo de solo.....	29
Tabela 9_ Valores usados no cálculo do factor K.....	30
Tabela 10_ valores do factor CP para a área em estudo.	36
Tabela 11_ Valores da TES para cada sub-bacia.	38
Tabela 12_ Valores da produção de sedimentos estimada no exutório de cada sub-bacia.	40
Tabela 13_ Classes de erosão segundo Colman et al. (2018).....	47
A1.14_ Base de dados das estações pluviométricas da área de estudo.....	A1.57
A2.15_ Precipitações media mensal e anual para cada estação.....	A2.58
A2.16_ Valores do R_c e EI_{30} para cada estação.....	A2.59
A3.17_ Descrição das classes de uso e ocupação do solo.....	A3.60

Lista de gráficos

Gráfico 1_ Correlação entre a precipitação média anual e a erosividade média anual.	42
Gráfico 2_ Percentagem de cada classe de uso e ocupação do solo.....	42

1. INTRODUÇÃO

A conservação dos solos é um assunto de importância estratégica dado que a perda do solo significa a redução da fertilidade dos solos, a diminuição dos rendimentos das culturas e, no caso extremo, um grande passo para a desertificação.

O desenvolvimento socio-económico do nosso país e da África Austral, caracterizado por actividades como a intensificação da agricultura, desmatamento, expansão urbana e o aumento da construção, associados aos efeitos das mudanças climáticas de origem antropogénica têm seus impactos na natureza e mais concretamente nas bacias hidrográficas. Especialmente em bacias hidrográficas de regiões tropicais, caracterizadas por chuvas intensas, as actividades anteriormente referidas conduzem a um aumento no escoamento superficial, com um notável aumento do potencial de erosão dos solos. Essa erosão influencia consideravelmente na fertilidade e qualidade dos solos, qualidade da água e deposição de sedimentos em leitos dos rios, que tende a provocar redução da profundidade do rio, transbordamento de canais durante eventos de alta precipitação (Anees *et al.* 2018), aumento do risco de inundações e redução da vida útil de reservatórios artificiais (Colman *et al.* 2018).

Tendo em conta os argumentos acima apresentados, estudos e investigações referentes a erosão do solo, transporte e produção de sedimentos, principalmente em bacias hidrográficas das regiões tropicais, são de elevada importância, para o desenvolvimento de medidas de mitigação e controle desses fenómenos. Apesar de se tratar de fenómenos de difícil predição, vários modelos foram desenvolvidos para a avaliação e melhor entendimento da relação entre a erosão do solo nas bacias hidrográficas e a produção de sedimentos na secção de saída das mesmas (Colman *et al.* 2018).

1.1 Justificativa

O trabalho tem enquadramento nos desafios actuais que se colocam a Moçambique, em particular a necessidade de melhorar a preservação das bacias hidrográficas, reduzir a degradação e proteger os seus recursos hídricos necessários para o seu desenvolvimento.

O crescimento populacional no país representa um desafio na conservação das condições naturais de escoamento nas bacias hidrográficas. A desmatação associada a

conversão de extensas regiões em áreas de cultivo leva ao surgimento de novas respostas hidrológicas nas bacias com consequências significativas que podem incluir o aumento dos picos de cheias, mas também a perda de solos de qualidade para fins agrícolas. O controle ou reversão deste cenário requer o conhecimento e domínio das principais variáveis que influenciam o comportamento da erosão de solos na bacia.

Em Moçambique estudos que visam o desenvolvimento e exploração de técnicas para a determinação da quantidade de sedimentos produzida em bacias hidrográficas são escassos e por isso há também necessidade de avaliar a adequabilidade dos modelos utilizados em outras partes do mundo à bacias tropicais como as do nosso país.

O presente estudo é igualmente uma contribuição importante para a introdução, no país, de uma linha de pesquisa que traga informação técnica para o apoio a tomada de decisões na melhor gestão do solo.

Para tal, será avaliada a produtividade de sub-bacias da bacia hidrográfica do rio Umbeluzi, localizadas no território Moçambicano, no Reino de Essuatíni e na África do Sul.

1.2 Formulação do problema

1.2.1 Necessidades

- Determinar estratégias para a gestão e conservação do solo;
- Prever impactos da erosão e planejar estratégias para a sua mitigação;
- Determinar o volume de sedimentos que chegam anualmente aos reservatórios artificiais em rios (albufeiras), assim como o volume acumulado de sedimentos no final da vida útil desses reservatórios artificiais;
- Determinar os factores que tornam certas bacias hidrográficas mais propensas a produção de sedimentos em relação às outras;
- Determinar a quantidade de sedimentos produzida em bacias hidrográficas tropicais através de modelos matemáticos e com auxílio de SIG.

1.2.2 Problema de pesquisa

Os impactos da erosão do solo como a perda de culturas agrícolas e a perda de produtividade do solo em que está erosão ocorre, assim como os impactos do transporte e deposição/produção de sedimentos, como o assoreamento de canais e albufeiras e o aumento da turbidez e contaminação de rios com impactos na degradação da qualidade da água dos sistemas de água doce podem conduzir a grandes prejuízos económicos e sociais, pelo que, coloca-se a seguinte pergunta de pesquisa:

Como estimar a produção de sedimentos em bacias hidrográficas de regiões tropicais com carência de dados resultantes de medições?

1.2.3 Soluções alternativas

- Realização de campanhas de medição do caudal sólido na secção de saída da bacia hidrográfica;
- Utilização de modelos semi-empíricos que permitem calcular o caudal sólido a partir das características do escoamento líquido e do próprio sedimento;
- Utilização de modelos matemáticos empíricos associados a SIG para a determinação da distribuição espacial da erosão e produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

Segundo Vaz(2019) a realização de medições do caudal sólido, quando feita em número suficiente para se estabelecer correlação com o caudal líquido, permite obter uma série cronológica que pode ser tratada estatisticamente para se prever a produção de sedimentos de uma certa área. As limitações de dados de medições de caudal sólido dificultam a utilização desta solução, principalmente para estudos desta natureza em que não se dispõe de tempo suficiente para a obtenção de séries longas de medição de caudal sólido, além do facto destas medições serem dispendiosas e não permitirem observar o padrão erosivo da área, apenas a produção de sedimentos na secção de medição.

A utilização de modelos semi-empíricos que permitem calcular o caudal sólido a partir das características do escoamento líquido e do próprio sedimento do leito do rio é amplamente usada para a análise do transporte de sedimentos em rios aluvionares, e neste processo é apenas representado o transporte dos sedimentos erodidos no leito do

rio e não dos sedimentos que advém da bacia hidrográfica. Além disso, este processo não permite observar o padrão erosivo ou distribuição da erosão ao longo da área de estudo.

A solução amplamente usada para estudos deste género, tendo em conta as tecnologias actuais, é a utilização de modelos matemáticos empíricos associados a SIG para a determinação da distribuição espacial da erosão e produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Esta solução permite observar a distribuição da erosão na área de estudo e também a produção de sedimentos, e por isso será a solução demonstrada neste estudo. É importante salientar que a medição de sedimentos é crucial para a calibração dos modelos empíricos utilizados neste tipo de solução.

1.3 Objectivos

1.3.1 Geral

Este trabalho de pesquisa foi desenvolvido procurando analisar a variação da produtividade de sedimentos dentro duma bacia hidrográfica com recurso a um modelo de estimativa da erosão como função de parâmetros fisiográficos e climáticos da envolvente. Assim foi principal objectivo do trabalho:

Estimar a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Umbeluzi por meio da aplicação de ferramentas de sistemas de informação geográfica.

1.3.2 Específicos

- Modelar a perda anual média de solo em sub-bacias da bacia hidrográfica do Umbeluzi, através do modelo ¹EURPS – Equação Universal Revista da Perda de Solo;
- Determinar a Taxa de Entrega de Sedimentos (²TES), com base em vários modelos disponíveis e o modelo para o cálculo da entrega de sedimentos que mais se adequa às sub-bacias da bacia hidrográfica a estudar;

¹ Tradução da sigla RUSLE – Revised Universal Soil Loss Equation

² Tradução da sigla SDR – Sediment Delivery Ratio

- Determinar a produção de sedimentos estimada (${}^3PS_{estimada}$), através dos valores de TES e de perda de solo;
- Avaliar a relação entre a perda de solo e o regime pluviométrico em bacias tropicais;
- Avaliar a conexão entre o uso e ocupação de solo e a erosão nas sub-bacias;
- Determinar as regiões das sub-bacias mais propensas a erosão.

1.4 Metodologia

Quanto ao objectivo geral, trata-se de uma pesquisa **descritiva**, que de acordo com Gil (1946) visa á descrição de determinado fenómeno e o estabelecimento de relações entre as variáveis do fenómeno, em que o objectivo da pesquisa é atingido através de métodos padronizados de recolha e análise dos dados. Quanto ao delineamento/procedimentos técnicos trata-se de uma pesquisa **bibliográfica**, realizada com base em material já elaborado (principalmente livros e artigos) e também um **estudo de caso**.

Com base no tipo de pesquisa definido, apresenta-se de seguida as etapas seguidas para se atingir os objectivos traçados.

1.4.1 Revisão de bibliografia

Nesta fase da pesquisa, faz-se recolha de informação bibliográfica teórica referente ao assunto a estudar, informação essa obtida principalmente através de artigos científicos relacionados com o tema, com auxílio sempre que necessário de livros e portais de pesquisa da *internet*.

1.4.2 Materiais e métodos

Dentro desta etapa é feita a recolha dos dados necessários e o tratamento dos dados de modo a obter os resultados que respondem aos objectivos traçados.

Recolha de dados

Nesta fase da pesquisa faz-se recolha de todos os dados necessários e disponíveis em portais online para:

³ Tradução da sigla SY – Sediment Yield

Determinação da perda de solo, refere-se à dados/série temporal de precipitação para estações pluviométricas da região em estudo, dados de classificação e caracterização dos solos disponíveis na área de estudo, assim como da sua distribuição espacial, dados topográficos mediante obtenção de modelos de elevação digital que cobrem a área em estudo, e dados do uso e ocupação do solo.

Determinação da taxa de entrega de sedimentos, corresponde a área da bacia e de cada sub-bacia, obtida através do *software QGIS* e do modelo de elevação digital da área.

Dados gerais referentes a caracterização da área de estudo, como clima, localização geográfica, rede hidrográfica e nomenclatura dos rios.

Análise e tratamento dos dados

Corresponde ao uso dos dados recolhidos para a obtenção dos resultados pretendidos, a distribuição espacial da erosão anual média na área de estudo, a taxa de entrega de sedimentos e a produção de sedimentos. Esta etapa foi realizada por meio da aplicação das ferramentas de processamento de dados do programa *QGIS (Quantum GIS, versão 3,8 zanzibar)*, que é um sistema de informação geográfica aberto e gratuito que permite a visualização, edição, impressão e análise de dados geo-espaciais. Este programa permitiu a criação das imagens e mapas que melhor representam a distribuição espacial dos fenómenos estudados ao longo da área de estudo.

Foi usado o *Microsoft Office Excel 2019* para a análise dos dados estatísticos de precipitação e também para os diversos cálculos realizados.

1.4.3 Análise dos resultados

Corresponde a avaliação das relações entre as variáveis do fenómeno estudado, assim como as conclusões a que os dados permitem chegar, com base em critérios estabelecidos no referencial teórico, de modo a alcançar os objectivos pretendidos. Análise feita por meio do *Microsoft Excel* (para a construção dos gráficos e tabelas).

A redação do relatório foi feita por meio do *Microsoft Office Word 2019*. A base para a estrutura do relatório e regras de citação e referências foi o Regulamento de Culminação de Estudos nos Cursos de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Perda de solo / erosão

A perda de solo corresponde a remoção de partículas de solo ou sedimentos devido principalmente a agentes hídricos e eólicos. É geralmente quantificada em termos anuais, designando-se perda anual média de solo a quantidade de solo erodido em média por ano. Segundo Guimarães *et al.* (2011) a erosão hídrica pode ser laminar (entre sulcos), por sulcos e por ravinas, sendo que a erosão hídrica laminar é definida como a remoção homogénea da porção superficial de solo devido ao escoamento de água. Segundo Vaz (2019) esta consideração de uma lâmina de água uniforme é apenas uma idealização e este tipo de erosão não abre caminhos privilegiados ao longo da encosta.

A medida que a água se concentra em caminhos privilegiados, criam-se sulcos dando origem a uma erosão localizada mais intensa, a erosão por sulcos (Vaz, 2019).

Segundo Montolar-Sparovek *et al.* (1999) a erosão por sulcos é aquela que é linear, não perenizada, causada pelo fluxo disperso da enxurrada, de ocorrência aleatória e cujos sulcos podem ser desfeitos com operações convencionais de preparo do solo, referindo-se a agricultura, enquanto que a erosão por ravinas corresponde aos sulcos de erosão linear reincidentes a cada evento de enxurrada, perenizados e não desmancháveis com operações de cultivo convencionais.

Para estudar e quantificar este fenómeno dispõe-se de métodos directos e indirectos. Os directos consistem na colecta de material erodido em campos e análise em laboratório (Guimarães *et al.* 2011), enquanto que os indirectos consistem na aplicação de modelos matemáticos empíricos.

Os modelos matemáticos podem ser associados a técnicas de geoprocessamento que permitem análises espaciais do fenómeno, para o planeamento racional do uso e ocupação do solo e identificação de áreas que necessitam de adopção de práticas de controle de erosão (Guimarães *et al.* 2011).

Os métodos indirectos são geralmente empregues em várias pesquisas e estudos sobre a erosão pelo facto de permitirem análises rápidas de vastas áreas de solo, como é o caso de bacias hidrográficas.

Um dos modelos mais empregues é a EUPS (Equação Universal de Perda de Solo), desenvolvida com base em dados de pequenos campos agrícolas (Williams e Berndt, 1972). De acordo com Wischmeier e Smith (1965) citados por Williams e Berndt (1972), o principal objectivo deste modelo é de providenciar guias específicos e fiáveis de práticas de conservação de solo e água para campos agrícolas.

Para que este modelo pudesse ser aplicado a escala de bacias hidrográficas e para outros fins, surgiram os seus derivados, a EUMPS (Equação Universal Modificada de Perda de Solo) (Williams e Berndt, 1972), a EURPS (Equação Universal Revista de Perda de Solo) (Renard *et al.* 1997) e EURPS2 (Foster *et al.* 2001), e estes são os modelos mais usados a nível mundial (Oliveira *et al.* 2015).

O modelo EURPS é usado para estimar a perda anual média de solo por sulcos e entre sulcos a nível de bacias hidrográficas, é capaz de demonstrar a distribuição espacial heterogénea da erosão e foi desenvolvido em um ambiente SIG, por isso tem sido o modelo comumente usado para predições da erosão do solo (Cunha *et al.* 2016).

2.1.1 Descrição do modelo EURPS

O modelo EURPS permite calcular a quantidade média de solo erodido a partir da equação abaixo, usando 6 factores (Cunha *et al.* 2016).

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

- Onde:
- A – perda de solo por unidade de área [Mg/ha/ano]
 - R – factor de erosividade da precipitação-escoamento [Mj*mm/ha/h/ano]
 - K – factor de erodibilidade do solo, baseado em características físicas, químicas e biológicas [Mg*h/Mj/mm]
 - L – factor do comprimento da encosta [sem unidades]
 - S – factor da inclinação da encosta [sem unidades]
 - C – factor de uso e gestão do solo [sem unidades]
 - P – factor das práticas de conservação do solo [sem unidades]

- **Cálculo do factor de erosividade da precipitação-escoamento [R]**

Segundo Hickmann *et al.* (2008) a erosividade representa o potencial que as chuvas têm de provocar erosão hídrica no solo. É geralmente determinada pelo índice EI_{30} calculado para cada chuva individual e erosiva. O índice EI_{30} representa o produto entre a energia cinética total da chuva (E) em [Mj/ha/mm] e a sua máxima intensidade em 30min, em [mm/h] (Hickmann *et al.* 2008 ; Batista *et al.* 2017).

O valor numérico de R deve refletir o efeito erosivo do impacto da gota de chuva e do escoamento provocado pela mesma chuva (Renard *et al.* 1997).

A chuva possui enorme variação ao longo do ano e de ano em ano, sendo por isso geralmente usado um valor médio da erosividade da chuva para representar o factor R, este valor médio é obtido a partir do índice de erosividade anual (igual ao factor R), obtida em uma série temporal longa de pelo menos 20 anos de acordo com Hickmann *et al.* (2008).

Em climas tropicais, estudos feitos por (Lombardi 1977; Cogo *et al.* 1978; Carvalho *et al.* 1989; Bertol 1994; Pissarra *et al.* 2000) citados por Hickmann *et al.* (2008), demonstraram que nos meses mais chuvosos verifica-se os maiores valores de erosividade.

Com os valores do índice de erosividade pode-se desenvolver uma relação matemática linear entre a erosividade e o coeficiente de chuva R_c :

$$EI_{30} = a + b * R_c \quad (2)$$

Onde: a, b – coeficientes de regressão

R_c – coeficiente de chuva em mm dado por :

$$R_c = \frac{\bar{P}_m^2}{\bar{P}_a} \quad (3)$$

\bar{P}_m – Precipitação média mensal [mm]

\bar{P}_a – Precipitação média anual [mm]

Esta relação matemática permite calcular o índice de erosividade (EI_{30}) médio mensal e a soma dos valores do índice de erosividade de cada mês do ano representa o índice de erosividade médio anual (igual ao factor R).

Dados de campo necessário para o cálculo detalhado do índice EI_{30} são geralmente escassos e por isso foram desenvolvidas relações matemáticas para o seu cálculo com base apenas no coeficiente de chuva R_c .

Tabela 1_ Equações para o cálculo do EI_{30} (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do MS Office Word)

Equações para o cálculo do EI_{30}			
	Equação	Região	Autor
1	$EI_{30} = 67,355 * R_c^{0,85}$	Bahia, Brasil	Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) citado por Oliveira et al. (2015)
2	$EI_{30} = 109,65 * R_c^{0,76}$	Rio Grande do Sul , Brasil	Cassol et al. (2007) citado por Didoné et al. (2015)
3	$EI_{30} = 85,672 * R_c^{0,6557}$	Minas Gerais, Brasil	Aquino et al. (2014) citado por Batista et al. (2017)

- **Cálculo do factor de erodibilidade do solo [K]**

O factor K corresponde a taxa de erosão do solo por unidade do índice de erosividade para um solo específico em uma região lavrada e não cultivada, com declive de 9% e 22,13m de comprimento (Williams e Berndt, 1972). Segundo Renard et al. (1997) em termos práticos, o factor de erodibilidade do solo corresponde a resposta média a longo prazo do solo e do perfil do solo ao poder erosivo da chuva e escoamento, desde o desprendimento das partículas devido ao impacto da gota de chuva, ao transporte dos sedimentos erodidos pelo escoamento, a deposição localizada devido a topografia do terreno e a infiltração da água no perfil do solo.

O factor de erodibilidade pode ser obtido por medição directa em campo em estudos com precipitação natural em uma “parcela unitária” com dimensões e características padrão, comprimento de 22,13m e inclinação de 9% correspondendo a um factor LS de 1 (um), sem culturas e sem práticas conservacionistas, factor C e P igual a 1 (um). Para tal necessita-se de dados de observação de 20 a 22 anos (Renard et. al. 1997).

Outros métodos de obtenção do factor K incluem estudos com precipitação simulada e modelos matemáticos que exprimem a relação do K com propriedades do solo.

Cunha *et al.* (2016) e Anees *et al.* (2018), fizeram uso da expressão nomográfica abaixo modificada para unidades do SI, para o cálculo do factor de erodibilidade de um solo individual através da relação do K com propriedades do solo. Esta expressão tem como base o ábaco apresentado por *Renard et al.* (1997).

$$K = 0.277 \times 10^{-6}(12 - MO)M^{1.14} + 0.0043(s - 2) + 0.0033(p - 3) \quad (4)$$

Onde:

K – factor de erodibilidade do solo $\left[\frac{Mg \cdot h}{Mj \cdot mm} \right]$

MO – percentagem de matéria orgânica

M – (percentagem de silte + areia muito fina) × (100 – percentagem de argila)

s – Parâmetro estrutural da amostra de solo [sem unidade]

p – Parâmetro de permeabilidade [sem unidade]

Tabela 2_ Valores do parâmetro estrutural do solo (fonte: Renard et al. 1997)

Valores do parâmetro estrutural do solo	
Estrutura do solo	Parâmetro estrutural (s)
Muito fina	1
Fina	2
Média ou grossa	3
Em blocos	4

Renard *et al.* (1997) apresenta uma equação alternativa para o cálculo do factor de erodibilidade, resultante do estabelecimento de uma relação entre dados de K medidos e o diâmetro geométrico médio da partícula de solo, expressa como:

$$K = \left\{ 0.0017 + 0.0494 * e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log(Dg) + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right]} \right\} \quad (5)$$

Onde:

Dg – Diâmetro geométrico médio da partícula [mm]

$$Dg = \exp \{ 0.01 * \sum [f_i * \ln(m_i)] \} \quad (6)$$

f_i – Percentagem das partículas com textura i

m_i – Média aritmética dos diâmetros limite das partículas com textura i

i – (argila, silte e areia)

Tabela 3_ Valores do parâmetro de permeabilidade do solo (fonte: Renard et al. 1997)

Valores do parâmetro de permeabilidade do solo	
Características de drenagem	Parâmetro de permeabilidade (p)
Rápida	1
Moderada a rápida	2
Moderada	3
Lenta a moderada	4
Lenta	5
Muito lenta	6

- **Cálculo dos factores L e S**

Os factores L e S são geralmente tratados como um factor, o factor LS, que é composto pelo comprimento médio do escoamento originado pela precipitação (L), que segundo Zhang *et al.* (2013) corresponde a distância do ponto de origem do escoamento até ao ponto onde a inclinação reduz e inicia a deposição ou até ao ponto onde o escoamento entra em um canal/curso de água bem definido, e a inclinação (S), sendo denominado factor topográfico.

Vários métodos foram desenvolvidos para o cálculo do factor LS, a maior parte deles sendo baseados no método desenvolvido por Wischmeier e Smith (1978), dentre eles o método de Desmet e Govers (1996).

Segundo Wischmeier e Smith (1978) apesar dos factores L e S terem sido desenvolvidos separadamente, é mais conveniente considerá-los como apenas um factor, LS. Os mesmos autores desenvolveram um ábaco e uma tabela para obtenção do factor LS a partir dos factores L e S, baseados na equação abaixo.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m * (65.41 * \sin^2\theta + 4.56 * \sin\theta + 0.065) \quad (7)$$

λ = comprimento da encosta (m)

θ = ângulo da encosta

$m=0.5$ para $\theta \geq 5$; $m=0.4$ para $3.5 \leq \theta \leq 4.5$; $m=0.3$ para $1 \leq \theta \leq 3$; $m=0.2$ para $\theta < 1$, com θ em percentagem.

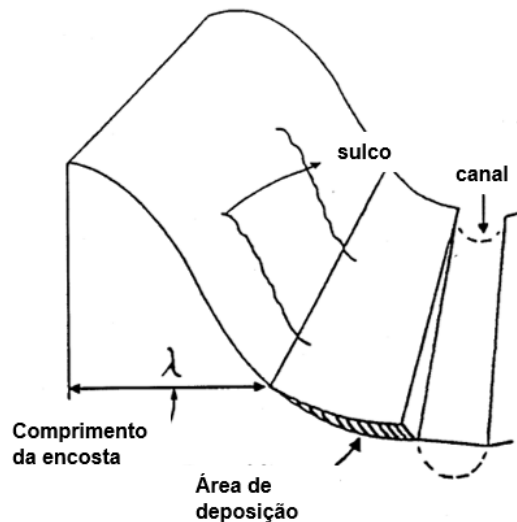


Figura 1_ Esquema do perfil de uma encosta para aplicação do modelo EURPS na determinação da erosão por sulcos e entre sulcos (laminar).(fonte: Adaptado de Renard et al. 1997)

Esta equação foi desenvolvida a partir de dados obtidos de campos agrícolas sob precipitação natural, com inclinações entre 3 e 18% e comprimentos entre 9,14 e 91,44m (Wischmeier e Smith, 1978).

No caso de inclinações irregulares, isto é, quando a encosta apresenta variações na inclinação, Wischmeier e Smith (1978) apresentam um procedimento que consiste em dividir a encosta em segmentos com inclinações constantes, calcular o factor LS para cada segmento, considerando o comprimento λ de toda a encosta e multiplicar o factor LS de cada segmento pelos correspondentes valores obtidos através da equação abaixo para cada segmento.

$$\text{fração de perda de solo} = \frac{i^{m+1} - (i-1)^{m+1}}{N^{m+1}} \quad (8)$$

Onde:

i – Número do segmento

N – Número de segmentos de igual comprimento no qual a encosta foi dividida

O processo é finalizado por meio da soma dos factores LS de cada segmento para obter o factor LS de toda a encosta.

Porém, em uma situação bidimensional, caso da aplicação do modelo EURPS em extensas áreas usando SIG, Desmet e Govers (1996), considera que o factor L deve ser substituído pela área de contribuição unitária.

Os mesmos autores aplicaram um algoritmo de fluxo em múltiplas direções para calcular área de contribuição unitária e factor LS em segmentos, de modo a ter em conta a complexidade da topografia com auxílio de tecnologias SIG e modelos de elevação digital (MED).

Este algoritmo consiste na divisão da superfície do MED em células quadradas, e no cálculo da área de contribuição da bacia para cada célula (área a montante da célula que drena para a célula).

Área de contribuição unitária no ponto de entrada da célula:

$$A_{s_{i,j}-in} = \frac{A_{i,j-in}}{D_{i,j}} \quad (9)$$

Área de contribuição unitária no ponto de saída da célula:

$$A_{s_{i,j}-out} = \frac{A_{i,j-in} + D^2}{D_{i,j}} \quad (10)$$

Comprimento efectivo da curva de nível no interior da célula pela qual o escoamento pode passar:

$$D_{i,j} = D * (\sin\alpha_{i,j} + \cos\alpha_{i,j}) = D * X_{i,j} \quad (11)$$

Onde:

$A_{s_{i,j}-in}$ e $A_{s_{i,j}-out}$ = área de contribuição unitária a entrada e a saída da célula respectivamente, com coordenadas (i,j) (m²)

$A_{i,j-in}$ = área de contribuição a entrada da célula com coordenadas (i,j) (m²)

D = largura da célula (m)

$D_{i,j}$ = comprimento efectivo da curva de nível no interior da célula com coordenadas (i,j) (m)

$\alpha_{i,j}$ = orientação da inclinação para a célula da grelha com coordenadas(i,j)

$\alpha_{i,j} = 0^\circ \approx \text{norte}; 90^\circ \approx \text{este}; 180^\circ \approx \text{sul e } 270^\circ \approx \text{oeste}$

m = constante que depende do ângulo de inclinação

$$m = \frac{\beta}{1+\beta} \quad (12); \quad \beta = \frac{(\sin\theta)}{3*(\sin\theta)^{0.8}+0.56} \quad (13); \quad \theta = \text{ângulo de inclinação}$$

O fator L para a célula com coordenadas (i,j) é dado por:

$$L_{i,j} = \frac{A_{S_{i,j}-out}^{m+1} - A_{S_{i,j}-in}^{m+1}}{(A_{S_{i,j}-out} - A_{S_{i,j}-in}) * (22.13)^m} \quad (14)$$

O fator S para cada ponto é dado por:

$$S_{i,j} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (15)$$

Onde:

S_x e S_y = inclinação na direção x e y respectivamente (m/m)

O factor LS é obtido inserindo L obtido pela equação (14) e S obtido pela equação (15) na equação (1).

Cálculo do factor de uso e gestão do solo [C]

O factor C representa o efeito da protecção oferecida pela cobertura do solo e pelos diferentes sistemas de gestão do solo na erosão. Trata-se da taxa de solo perdido em uma situação específica de uso do solo em relação a uma situação de solo sem cobertura. Segundo Batista *et al.* (2017), valores do factor C variam de 0 a 1, com valores baixos representando áreas com vegetação densa como florestas e valores altos representando áreas com solo sem vegetação.

Para aplicação a escala de bacias hidrográficas, os valores do factor C são atribuídos a mapas de uso e cobertura de solo, produzidos a partir de imagens de alta resolução.

A tabela abaixo representa valores de C recomendados por Batista *et al.* (2017) e Cunha *et al.* (2016).

Tabela 4 - Uso de terra e respectivo valor do factor C (fonte: adaptado de Batista et al. 2017 e Cunha et al. 2016)

Valores do factor C para cada classe de uso e ocupação do solo	
Uso / ocupação do solo	Factor C
Agricultura	0.156
Solo sem vegetação	1.000
Eucalipto	0.121
Florestas	0.015
Pastagem	0.025
Vegetação rupestre	0.025
Solo exposto(estradas)	1.000
Solo exposto (áreas agrícolas)	1.000
Área construída	1.000
Corpos de água	0.000

Factor das práticas de conservação do solo [P]

Segundo Didoné *et al.* (2015), o factor P reflecte o impacto positivo da gestão do solo no controlo do escoamento da água da chuva, com ênfase especial em como a gestão altera a velocidade e direcção do escoamento. Trata-se de um factor geralmente usado para levar em conta o impacto de práticas agrícolas, como cultivo em tiras, cultivo em terraços e cultivo em contornos.

Segundo Renard *et al.* (1997), os valores do factor P foram originalmente obtidos através de dados experimentais, suplementados por análises experimentais envolvendo observações científicas de relações conhecidas de causa e efeito. O factor P de uma certa região será o produto do factor P referente a cada prática de conservação ali aplicada, visto que as práticas de conservação são geralmente combinadas.

Righetto (1998) citado por Colman *et al.* (2018) sugere os valores de P indicados na tabela a seguir:

Tabela 5 _Valores do factor P. (fonte: adaptado de Colman et al. 2018)

Valores do factor P para cada prática de conservação do solo	
Prática de conservação	Factor P
Sem práticas	1.000
Agricultura de contorno	0.500
Recuperação de vegetação ribeirinha	0.250
Agricultura em terraços	0.1000

Sempre que não haja aplicação de práticas de conservação do solo ou não haja informação precisa sobre as práticas adoptadas em uma certa área, recomenda-se adopção de um valor unitário do factor P.

Tolerância a perda de solo (Valor T)

Segundo Renard et al. (1997) um dos principais objectivos da Equação Universal de Perda de Solo é de ser uma ferramenta que auxilie na tomada de decisões ligadas a conservação do solo, sendo assim esta equação permite ao planeador prever a taxa média de erosão do solo para várias alternativas de combinação de sistemas de plantio, técnicas de gestão do solo e práticas de controlo contra a erosão em um certo lugar. O valor T representa a taxa máxima de erosão que pode ocorrer em um dado solo mantendo a produtividade deste mesmo solo economicamente sustentável. Este termo deve considerar a perda de produtividade devido a erosão mas também a taxa de formação ou renovação do solo, que pode ocorrer através da deposição ou da meteorização de rochas. O valor T considera ainda a perda de produtividade devido a perda de nutrientes e o custo de substituição desses nutrientes.

De acordo com Renard et al. (1997) valores de T entre 2.5 e 12.5 Mg/ha/ano foram derivados para os solos dos Estados Unidos da América, enquanto que Wischmeier & Smith (1978) estipula valores entre 5 e 12.5 Mg/ha/ano para campos agrícolas, tendo em conta factores como profundidade do solo, propriedades físicas e outras características que afectam o desenvolvimento das raízes, perda de sementes, redução da matéria orgânica do solo e perda de nutrientes, de modo que não se perca a fertilidade destes

campos. De acordo com os mesmos autores, para directrizes de conservação de recursos hídricos, deve-se estipular valores diferentes de tolerância para a perda de solo.

2.2 Taxa de entrega de sedimentos

A taxa de entrega de sedimentos (TES) representa a fracção da quantidade total de solo erodido, que é transferida/transportada para a secção de saída da bacia hidrográfica (Didoné *et. al.* 2015).

A TES pode ser determinada a partir do quociente entre a produção de sedimentos medida e a erosão bruta, determinada pelo modelo EURPS, porém, este procedimento implica a realização de campanhas de medição do caudal sólido para a obtenção da produção de sedimentos medida.

$$TES = \frac{PS_{medida}}{E} \quad (16)$$

Onde: PS_{medida} – produção anual de sedimentos obtida a partir de medições do caudal sólido na secção do rio na secção de saída da bacia hidrográfica

E – Erosão bruta em toda a área ou bacia e não por unidade de área como o caso do “A” obtido na EURPS.

Devido a grande complexidade dos processos de transporte de sedimentos em bacias hidrográficas, não foi ainda desenvolvida uma equação universalmente aplicável para o cálculo da TES, sendo assim, várias equações empíricas foram desenvolvidas para várias regiões e bacias hidrográficas, apresentadas na tabela 6.

Segundo Colman *et al.* (2018) a diferença entre os valores da TES obtidos por medições através de (16) e valores estimados por meio de modelos como os apresentados na tabela 6 não descreve a situação real, visto que os modelos de previsão da TES consideram poucos factores intervenientes. Sendo assim, para se desenvolver modelos de TES para uma bacia hidrográfica é necessário a realização de investigações detalhadas das características da bacia hidrográfica pois diversos modelos para a previsão da TES foram criados com base em medições limitadas para algumas regiões específicas.

Tabela 6_ Métodos para o cálculo da TES baseados em índices fisiográficos da bacia hidrográfica (fonte: Colman et. al. 2018 e Didoné et. al. 2015)

Equações para o cálculo da TES			
Equação (TES em %)	Descrição das variáveis	Área [Km ²]	Referência
$TES = 0.627D^{0.403}$	D=inclinação do canal principal (%)	0.5 - 18	Williams e Berndt (1972)
$Log(TES) = 1.793 - 0.142Log(Ab)$	Ab=área da bacia hidrográfica	1 - 262	Renfro (1975) citado por Colman et al.(2018) e Didoné et al. (2015)
$TES = 47.5 * (Ab)^{-0.125}$		2.6 – 1295	Vanoni (1975) -Modificado de modo que Ab seja em [Km ²]
$TES = 56.5657(Ab)^{-0.11}$		1.3 – 388.5	USDA-NRCS (1979) citado por Colman et al. (2018) e Didoné et al. (2015) Modificado de modo que Ab seja em [Km ²]
$TES = 47.466(Ab)^{-0.135} - 12.7$		0.026 - 2590	USDA-NRCS (1983) citado Didoné et al. (2015) Modificado de modo que Ab seja em [Km ²]

2.3 Produção de sedimentos

De acordo com Lu *et al.* (2005) observações demonstram que a produção de sedimentos em bacias hidrográficas é geralmente inferior a taxa de erosão em encostas da bacia, o que se deve ao facto de que a maior parte dos sedimentos percorre curtas distâncias antes de ser depositado ao longo da bacia, não atingindo os cursos de água.

Um típico conceito empírico usado para o cálculo da produção de sedimentos é a TES, já discutida anteriormente, que serve para ter em conta este efeito de redução dos sedimentos que alcançam a secção de saída da bacia. A equação (16) é amplamente usada para a obtenção da produção de sedimentos estimada ($PS_{estimada}$) a partir do conhecimento da perda de solo bruta (E) e da TES (Rompaey *et al.* 2001; Lu *et al.* 2005; Colman *et al.* 2018).

Outra maneira de obter a produção de sedimentos em bacias hidrográficas, não muito prática, mas essencial para a calibração dos modelos empíricos, é a realização de campanhas de medição da concentração de sólidos suspensos na secção de saída da bacia hidrográfica. Segundo Colman *et al.* (2018) trata-se de medições do caudal sólido mensal descarregado e da concentração de sedimentos, que permite obter o caudal sólido e líquido ao longo do ano.

A estimativa da descarga de sedimentos suspensos ou produção de sedimentos é feita através da equação abaixo de acordo com Didoné (2013):

$$PS = \sum_{i=1}^n (Q_w \times C_{ss}) \quad (18)$$

Onde: PS =Produção de sedimentos ou descarga de sedimentos suspensos [Mg]

Q_w =descarga de água [l/s]

C_{ss} =concentração média de sedimentos suspensos na secção transversal do curso de água [g/l]

O n representa o número de medições instantâneas de C_{ss} e Q_w num determinado período de tempo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização e descrição da área de estudo

Foi conduzido um estudo para a bacia hidrográfica do rio Umbeluzi, situada na África Austral, abrangendo a região sul de Moçambique (província de Maputo), o Reino de Essuatíni e uma pequena porção da República da África do Sul, sendo por isso uma bacia hidrográfica internacional ou transfronteiriça.

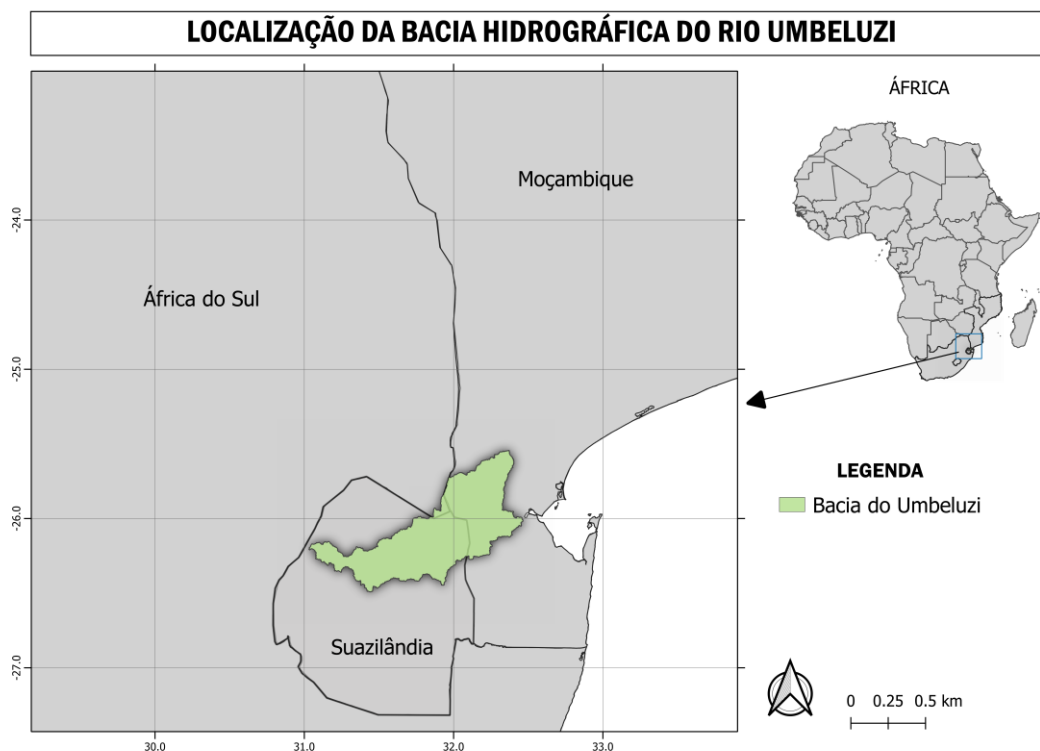


Figura 2_ Localização da área de estudo. (fonte: elaborado pelo autor, Shapefiles de divisão geográfica de países obtidos em: GADM maps and data (<https://gadm.org/maps.html>), 18 de Abril de 2022))

De acordo com ARA-SUL (<https://www.ara-sul.gov.mz/unidade-de-gestao-da-bacia-do-umbeluzi-ugbu/>, 25 de abril de 2022) a bacia do rio Umbeluzi ocupa uma área de 5460Km², sendo 2240 Km² (41%) em Moçambique, 3140 Km² (58%) em Essuatíni e 80 Km² (1%) na RAS. A maior altitude da bacia é de 1800m, sendo que a maior no território moçambicano é de 801m no monte Ponduine.

O curso de água principal da bacia do rio Umbeluzi é o rio com o mesmo nome, que nasce na fronteira ocidental do reino de Essuatíni a uma altitude de 1690m e atravessa

tanto o Reino de Essuatíni e a província moçambicana de Maputo de oeste para este entrando em Moçambique pela vila fronteiriça de Goba e desaguando no estuário do Espírito Santo a este de Maputo.

O rio possui duas obras hidráulicas de grande importância, a Barragem dos Pequenos Libombos em Moçambique e a barragem de M'njoli em Essuatíni.

RIOS E SUB-BACIAS - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UMBELUZI

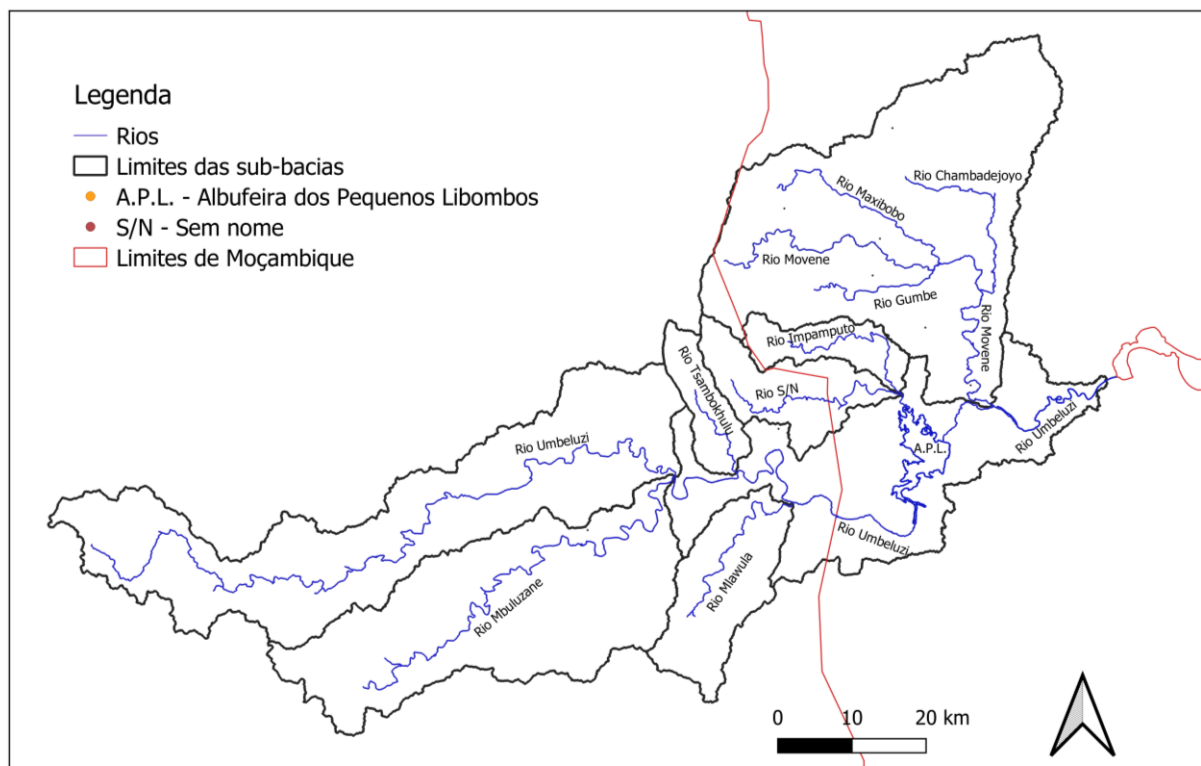


Figura 3_ Rios e sub-bacias da bacia hidrográfica do Umbeluzi.(fonte: elaborado pelo autor com auxílio do QGIS, nomenclatura de rios obtida através da camada vectorial de cursos de água de Moçambique e por meio do Google Maps para a região do Essuatíni)

A rede hidrográfica(rios) em formato vectorial foi obtido no portal *World Wildlife Fund* (2007)(<https://geodata.lib.utexas.edu/catalog/stanford-wf122zm7811>, 20 de abril de 2022)

3.1.1. Clima da região

Segundo KSR-Limpopo (2006) (http://www.limpopo.riverawarnesskit.org/limpoporak_com/pt/rio/clima_e_meteorologia/principles_of_cliate_and_weather/climate_classificati

on.htm. 2 de junho de 2022) que apresenta o mapa de classificação climática de *Köppen-Geiger* para África Austral, em Maputo predomina um clima tropical de savana ou clima tropical com estação seca de inverno, caracterizado por forte precipitação anual e chuvas no verão (Aw) e o Reino de Essuatíni um clima subtropical/temperado húmido com inverno seco e verão quente (Cwa), sendo estas duas classificações climáticas predominantes na bacia hidrográfica do rio Umbeluzi.

3.2 Cálculo da perda anual média de solo

A perda anual média de solo para a área de estudo foi calculada por meio da aplicação das ferramentas de processamento do programa *Quantum GIS*. Para tal foram criadas camadas *raster* (imagens compostas por uma ou mais bandas representando uma matriz de valores) com a distribuição espacial de cada um dos factores da equação EURPS, e a distribuição espacial da perda de solo foi obtida pela sobreposição das camadas.

3.2.1 Cálculo do factor R

O factor R é estimado com base em dados de pluviosidade, sendo assim foi necessário a obtenção destes dados de modo a calcular-se a pluviosidade média mensal e anual. Para esta análise foram usados registos matriciais de pluviosidade, que consistem em dados estimados remotamente através de sensores acoplados em satélites, obtidos no portal da NASA (*NASA Prediction of Worldwide Energy Resources*, <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, 29 de maio de 2022). Este portal permitiu a obtenção de dados de pluviosidade mensais de 1981 a 2021 (40 anos) para 27 pontos com coordenadas definidas no interior da bacia hidrográfica, sendo 20 estações pluviométricas existentes e 7 pontos definidos de modo a obter uma melhor distribuição dos dados de pluviosidade ao longo da bacia hidrográfica, apresentados na figura 4.

A grelha desta fonte apresenta resolução espacial de $1/2^{\circ}$ (124,7 km) latitude por $5/8^{\circ}$ (155,9 km) longitude e o sistema de projeção geográfica é o WGS84.

Para cada estação pluviométrica foram obtidos dados mensais de precipitação para cada ano de 1981 a 2021 em formato de uma folha de cálculo do *MS Office Excel*. Para cada estação pluviométrica foi calculada a precipitação média mensal por meio da média das

precipitações de cada mês ao longo dos 40 anos, por exemplo, a precipitação média mensal do mês de janeiro corresponde a média das precipitações do mês de janeiro do ano 1981 ao ano 2021 e assim foi procedido para os outros meses. A precipitação média anual para cada estação foi obtida por meio da soma das precipitações médias mensais. Os resultados são apresentados na tabela A2,15 do anexo 2.

ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UMBELUZI

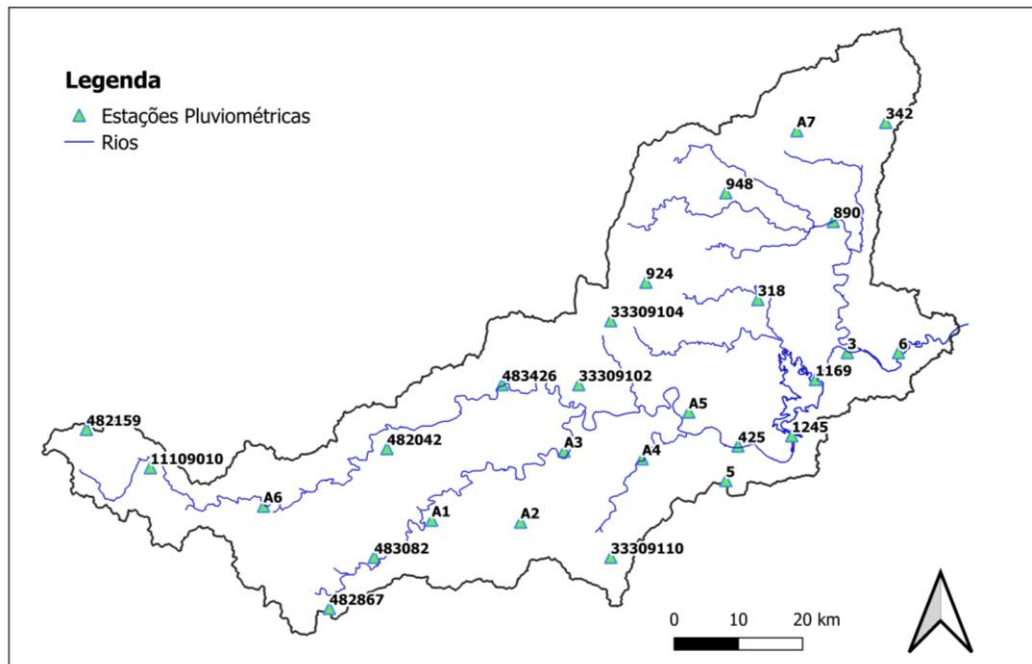


Figura 4_ Localização espacial das estações pluviométricas usadas. (fonte: Elaborado pelo autor com auxílio do QGIS. Localização das estações obtida por meio do relatório publicado pela SWECO & ASSOCIATES, 2005)

Para o cálculo do EI_{30} foi feita comparação da pluviosidade média anual entre as regiões para as quais as equações da tabela 2 foram definidas e a região em estudo, de modo a definir-se a equação que melhor se adequa a região em estudo.

O Reino de Essuatíni apresenta pluviosidade média mensal em torno de 11.9 mm no mês menos chuvoso (junho) a 143.3 mm no mês mais chuvoso (janeiro), com uma média anual de 810.81mm, de acordo com dados de 1991 a 2020 (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/eswatini/climate-data-historical#:~:text=mean%20annual%20rainfall%20ranges%20from,the%20typically%20hottest%20period%20annually>, 2 de junho de 2022).

A parte moçambicana da bacia do Umbeluzi apresenta precipitação média anual de 800mm, variando de 600mm no litoral a 1000mm na cordilheira dos Libombos, no interior, de acordo com ARA-Sul (2014) citado por Notisso *et al.* (2021).

Observa-se que as duas regiões apresentam um regime de pluviosidade semelhante, e que vai de encontro com os resultados obtidos com as estações em estudo para a bacia, com uma precipitação média anual entre 687.9 mm e 806.3 mm, e uma média para toda a bacia de 742.6 mm, indicado na tabela A2,15 do Anexo 2.

A primeira equação da tabela 1 deste relatório foi desenvolvida para Ribeirão do Salto, uma sub-bacia da bacia hidrográfica Jequitinhonha, no estado da Bahia, Brasil, que segundo o mapa pluviométrico do Estado da Bahia, publicado em 2003 pelo SEI (https://www.sei.ba.gov.br/site/geoambientais/mapas/pdf/mapa_pluviometria.pdf, 2 de junho de 2022) apresenta uma pluviosidade média anual entre 700 e 900 mm, que se enquadra na gama de valores de pluviosidade da área em estudo.

A segunda equação da tabela 1 deste relatório foi desenvolvida para a bacia do Rio Conceição, na região norte do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, que segundo Didoné *et al.* (2015) apresenta um clima subtropical húmido sem estações secas (Cfa), com precipitação média anual em torno de 1750 e 2000 mm, sendo uma região com pluviosidade média bem maior que a da região em estudo.

A terceira equação da tabela 1 deste relatório foi desenvolvida para a cidade de Lavras, localizada na bacia hidrográfica do Rio Grande, que segundo Batista *et al.* (2017) apresenta um clima subtropical húmido com invernos secos e verões temperados (Cwb), com precipitação média anual de 1567mm, não se enquadrando também na área em estudo.

Sendo assim, foi utilizada a primeira equação da tabela 2 para fazer o cálculo do factor R.

Com base nos dados da pluviosidade média mensal e anual para cada estação, foi feito o cálculo do parâmetro R_c da equação 3. A partir do parâmetro R_c obteve-se o índice de erosividade (EI_{30}) / factor R para cada estação, apresentados na tabela A2,16 do anexo 2.

A seguir apresenta-se o mapa da distribuição espacial do factor R ao longo da bacia hidrográfica do rio Umbeluzi.

FACTOR R - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UMBELUZI

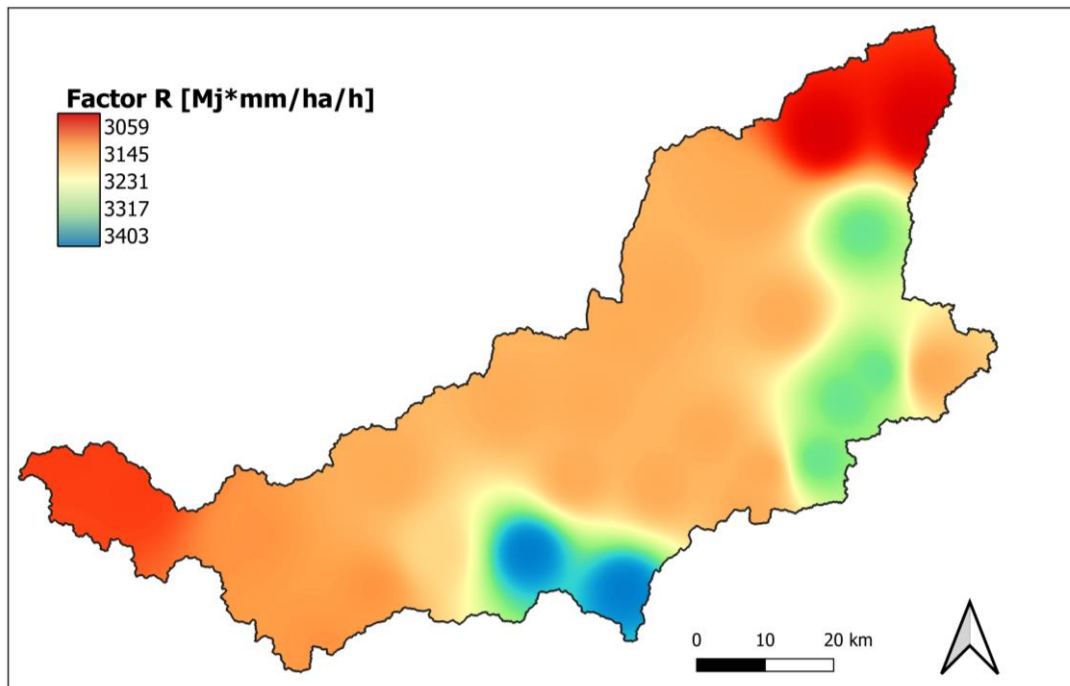


Figura 5_ Distribuição espacial do factor de erosividade, resolução espacial de 30m, projeção WGS84.(fonte: elaborado pelo autor com por meio do QGIS)

3.2.2 Cálculo do factor K

A erodibilidade do solo é função da textura do solo, teor em matéria orgânica, estrutura do solo e da permeabilidade do solo, parâmetros que variam de acordo com a classificação do solo.

Por meio do Mapa Mundial Harmonizado do Solo (HWSM) em Fischer *et al.* (2008) em formato *raster*, e fazendo-se uso do QGIS para obter as percentagens de cada classe de solo apresentadas na figura 6, a bacia hidrográfica do rio Umbeluzi é composta pelos solos apresentados na tabela 7.

Segundo FAO *et al.* (2009) a base de dados HWSD foi criada pela IIASA (International institute for Applied System Analysis) e pela FAO (Food and Ariculture Organization), em parceria com:

- a ISRIC(International Soil Reference and Information Centre) que em coordenação com a FAO foi responsável pelo desenvolvimento da base de dados de solo e terreno (SOTER – Soil and Terrain).

A base de dados da SOTER foi responsável por fornecer informações dos solos da África central e do Sul, América Latina, Caribe e Europa Central e do leste, que são os dados considerados mais fiáveis.

- European Soil Bureau Network, responsável pelos dados dos solos do restante da Europa.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, responsável por fornecer os dados dos solos da china.

O programa SOTER foi iniciado em 1986 pela FAO, Programa Ambiental das Nações Unidas e ISRIC, sob supervisão da International Soil Science Society, em colaboração com organizações parceiras, que providenciaram informações sobre os solos para regiões, países e continentes (FAO et al. 2009). Os dados sobre os solos derivam de relatórios de estudos/trabalhos de campo realizados por instituições dos respectivos países para a criação das cartas de solos.

Segundo FAO et al. (2009) os perfis de solo no SOTER são geralmente incompletos, o que dificulta sua utilização em estudos quantitativos. Para superar isso, regras consistentes de taxa-transferência desenvolvidas ao longo do projecto WISE (World Inventory of Soil Emission Potential) foram usadas para preencher as falhas do SOTER, resultando em um conjunto de 18 propriedades do solo para profundidades entre 20cm até 100cm.

Sendo assim é importante salientar que os dados referentes aos solos da região não resultam de um estudo de campo realizado pelo autor no âmbito deste trabalho, e que os dados do HWSD podem não ser dos mais precisos tendo em conta a escala dos mapas de solo e o facto do solo poder variar e muito dentro de uma certa área considerada com a mesma classe de solo e de acordo com a profundidade, o que pode colocar em causa a precisão dos resultados obtidos com base nestes dados e exigir que se avalie com cautela e reservas os mesmos resultados. Sendo por isso sempre recomendado a realização de estudos de campo para se ter uma caracterização mais precisa do solo.

Estudos deste género em áreas muito grandes como bacias hidrográficas podem inviabilizar a realização destes estudos de campo de forma que os dados do HWSD podem ser a melhor opção.

A base de dados do HWSM em Fischer *et al.* (2008) em formato de folha de cálculo do *MS Office Access* disponibiliza uma vasta quantidade de informações sobre as características e propriedades físicas e químicas da camada superficial de cada classe de solo presente na bacia, necessário para o cálculo do factor K, desde as percentagens de argila, silte e areia, às percentagens de carbono orgânico (CO) necessários para o cálculo da percentagem de matéria orgânica ($\%MO=1,724 \times \%CO$), a textura do solo para a obtenção do parâmetro estrutural e as características de drenagem para a obtenção do parâmetro de permeabilidade, para a aplicação da equação 4, assim como os limites do diâmetro das partículas para cada tipo de solo (areia, silte e argila) necessários para a aplicação da equação 5.

Tabela 7_ Classes de solo presentes na bacia hidrográfica do Umbeluzi. (fonte: realizado pelo autor com auxílio do MS Office Excel. Dados obtidos em Fischer et al. (2008))

Descrição das classes de solo da bacia hidrográfica em estudo						
Símbolo (FAO90)	Descrição (FAO 90)	Descrição solo (USDA)	Profundidade de referência (cm)	Região predominante	Área (km ²)	% na bacia
LPe	Eutric Leptosols	Franco argiloso	30	MZ	708,1	13,0
PHI	Luvic Phaeozems	Argiloso	100	MZ	772,6	14,2
FLe	Eutric Fluvisols	Argila siltosa	100	MZ	33,7	0,6
VRe	Eutric Vertisols	Argiloso	100	MZ	283,4	5,2
Aro	Ferralic Arenosols	Arenoso	100	MZ	288	5,3
LXh	Haplic Lixisols	Franco arenoso	100	MZ	106,2	1,9
FLs	Salic Fluvisols	Argila densa	100	MZ	15,9	0,3
RGu	Umbric Regosols	Arenoso	100	SZ	34,6	0,6
LPq	Lithic Leptosols	Franco argiloso	10	SZ	195	3,6
FRh	Haplic Ferralsols	Argiloso	100	SZ	318,3	5,8
CMg	Gleyic Cambisols	Argila densa	100	SZ	28	0,5
PHh	Haplic Phaeozems	Franco argiloso	100	SZ	426,8	7,8
LPm	Mollic Leptosols	Franco	30	SZ	415	7,6
SNj	Stagnic Solonetz	Argila franco arenosa	100	SZ	850,5	15,6
LPe	Eutric Leptosols	Franco	30	SZ	547,8	10,0
FRr	Rhodic Ferralsols	Argila densa	100	SZ	322,2	5,9
ACu	Humic Acrisols	Franco argiloso	100	SZ	10,7	0,2
LPq	Lithic Leptosols	Franco argiloso	10	ZA	37,1	0,7
CMx	Chromic Cambisols	Franco argiloso	100	ZA	0,1	0,0
LVf	Ferric Luvisols	Franco arenoso	100	ZA	45,9	0,8
VRk	Calcic Vertisols	Argiloso	100	ZA	15,1	0,3

O cálculo do factor K foi feito através da equação 5 para cada classe de solo, devido a indisponibilidade de percentagem de areia muito fina (partículas com diâmetro entre 0.0625 e 0.125 mm) necessário para a aplicação da equação 4, considerada mais precisa, por fazer uso de mais propriedades e características do solo.

Os diâmetros geométricos limite para cada tipo de solo usados no presente trabalho são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 8_ Diâmetros limites para cada tipo de solo. (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do MS Office Word. Dados obtidos em FAO et al. 2009)

Diâmetros limites para cada tipo de solo	
Tipo de solo	Limites do diâmetro (mm) (Classificação da FAO)
Areia	0.0625 – 2
Silte	0.002 – 0.0625
Argila	Inferiores a 0.002

DISTRIBUIÇÃO DAS CLASSES DE SOLO - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UMBELUZI

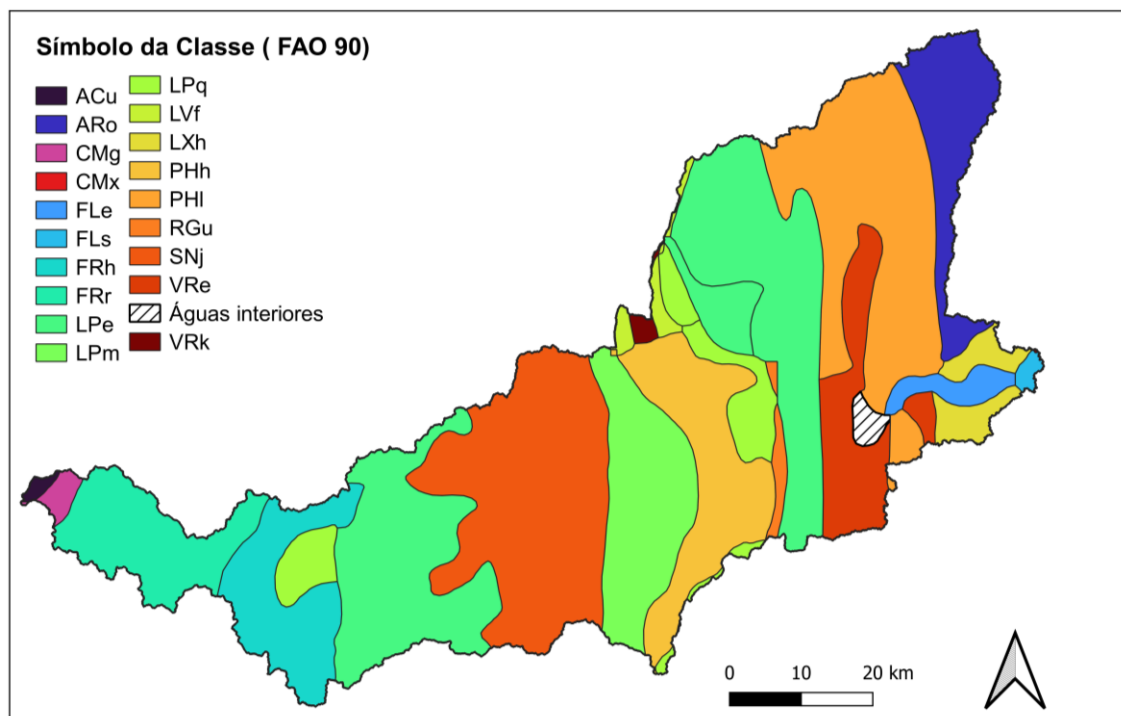


Figura 6 _ Distribuição das classes de solo (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do QGIS. Projeção WGS84. Dados obtidos através de Fischer et al. 2008)

Tabela 9_ Valores usados no cálculo do factor K. (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do MS Office Excel. Dados obtidos em FAO et al. 2009)

Valores usados no cálculo do factor K								
Solo	%silte	Dg(silte)	%argila	Dg(argila)	%areia	Dg(areia)	Dg(mm)	K [Mg*h/ Mj/ mm]
LPe	36	0,0323	34	0,001	30	1,0313	0,0280	0,05035
PHI	17	0,0323	58	0,001	25	1,0313	0,0102	0,04632
FLe	44	0,0323	50	0,001	6	1,0313	0,0070	0,04070
LPe	36	0,0323	34	0,001	30	1,0313	0,0280	0,05035
VRe	25	0,0323	54	0,001	21	1,0313	0,0102	0,04632
ARo	2	0,0323	5	0,001	93	1,0313	0,6801	0,00651
LXh	13	0,0323	11	0,001	76	1,0313	0,3064	0,01411
FLs	26	0,0323	65	0,001	9	1,0313	0,0046	0,03325
RGu	12	0,0323	15	0,001	73	1,0313	0,2403	0,01747
LPq	29	0,0323	28	0,001	43	1,0313	0,0541	0,04335
FRh	19	0,0323	51	0,001	30	1,0313	0,0155	0,05019
CMg	20	0,0323	63	0,001	17	1,0313	0,0065	0,03950
PHh	35	0,0323	31	0,001	34	1,0313	0,0357	0,04855
LPm	32	0,0323	24	0,001	44	1,0313	0,0644	0,04057
SNj	15	0,0323	32	0,001	53	1,0313	0,0666	0,04000
LPe	30	0,0323	20	0,001	50	1,0313	0,0910	0,03441
LPq	29	0,0323	28	0,001	43	1,0313	0,0541	0,04335
FRr	14	0,0323	77	0,001	9	1,0313	0,0030	0,02557
ACu	23	0,0323	37	0,001	40	1,0313	0,0357	0,04855
LPq	29	0,0323	28	0,001	43	1,0313	0,0541	0,04335
CMx	26	0,0323	32	0,001	42	1,0313	0,0455	0,04580
LVf	18	0,0323	17	0,001	65	1,0313	0,1699	0,02304
LVf	18	0,0323	17	0,001	65	1,0313	0,1699	0,02304
VRk	27	0,0323	53	0,001	20	1,0313	0,0102	0,04632

A seguir encontra-se representado o mapa da distribuição espacial do factor K.

FACTOR K - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UMBELUZI

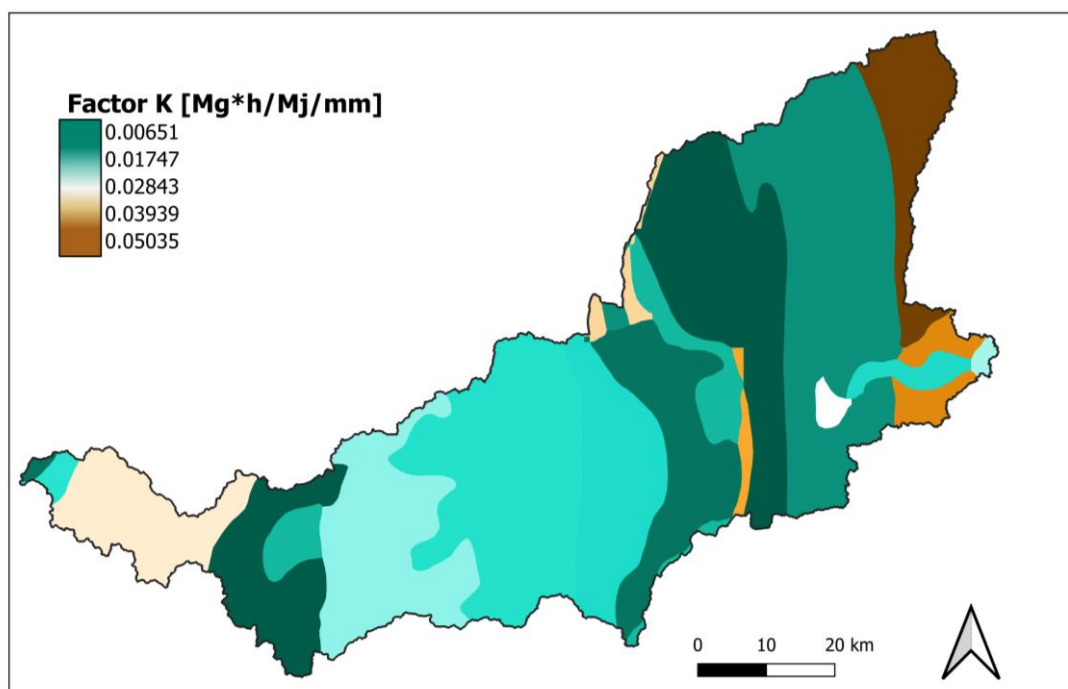


Figura 7_ Distribuição espacial do factor K, resolução espacial de 30m, projeção WGS84. (fonte: Elaborado pelo autor com auxílio das ferramentas de processamento do QGIS)

3.2.3 Cálculo do factor LS

Para o cálculo do factor LS foram usados modelos de elevação digital (MED) da Missão de Transporte de Radar de Topografia (SRTM), com 30m de resolução espacial e com projeção 4326 - WGS84 – geográfico(*graus*), descarregados através do módulo *descarregador SRTM* do QGIS.

Os procedimentos para a obtenção do mapa *raster* da distribuição espacial do factor topográfico ao longo da bacia hidrográfica em estudo são descritos a seguir:

1º passo: carregamento dos MED;

2º passo: junção dos MED de modo a obter um MED que cobre toda a área de estudo;

3º passo: recorte do MED pela extensão da bacia hidrográfica;

A delimitação da bacia hidrográfica de modo a obter a sua extensão foi feita por meio das ferramentas do QGIS, para tal foi criada uma camada *raster* com a direcção de drenagem e outra com o número de células que drenam através de cada célula do *raster*,

accedendo a *ferramentas de processamento* → *grass* → *r.watershed*. Repetindo os procedimentos anteriores, porém escolhendo *r.water.outlet* ao invés de *r.watershed*, introduzindo a camada *raster* da direcção de drenagem e colocando como coordenada do exutório a secção do rio Umbeluzi logo a montante do estuário do Espírito Santo, onde o rio Umbeluzi desagua, foi criada uma camada *raster* composta por toda a área do MED que drena para a secção indicada como a secção de saída da bacia hidrográfica, que corresponde a área da bacia hidrográfica do rio Umbeluzi.

4º passo: correção de pequenas depressões através do comando SAGA → Análise de terreno → Hidrologia → preencher depressões (Wang & Liu);

5º passo: Obtenção da camada raster representando a distribuição espacial do factor LS na bacia hidrográfica a partir do MED e através do comando SAGA → Análise de terreno → Hidrologia → Factor LS, baseado em campo.

O método usado para o cálculo do factor LS foi o desenvolvido por Wischmeier e Smith (1978). Inicialmente foi calculado o factor LS com os 2 métodos mencionados na revisão bibliográfica, sendo que o método desenvolvido por Desmet & Govers (1996) resultou nos valores mais extremos, atingindo cerca de 2000, enquanto que o método de Wischmeier e Smith (1978) resultou em máximos na ordem de 21,1.

Esta discrepância entre os valores do factor LS obtidos por diferentes métodos confirma o facto de que o factor LS apresenta maior incerteza no processo de aplicação da EUPS (Santos *et al.* 2015). Além disso, a existência de várias equações para a determinação deste factor aumenta a incerteza.

O método proposto por Desmet e Govers (1996) apesar de mais recente e sofisticado, foi considerado inadequado no presente estudo, por apresentar valores do factor LS muito altos quando comparados com os valores das bibliográficas consultadas, o que influenciaria nos valores de erosão, resultando em valores de certa forma absurdos. O método de Wischmeier e Smith (1978) foi o escolhido para o presente estudo como já mencionado, pois além de ter sido o primeiro método desenvolvido para o cálculo do factor LS, é um dos mais citados e usados nas bibliografias consultadas, transmitindo maior confiança. De salientar que não foi identificado nenhum critério directo para a escolha do método a usar para o cálculo do factor LS, e há muito poucos estudos sobre quais métodos seriam mais precisos para o cálculo deste factor.

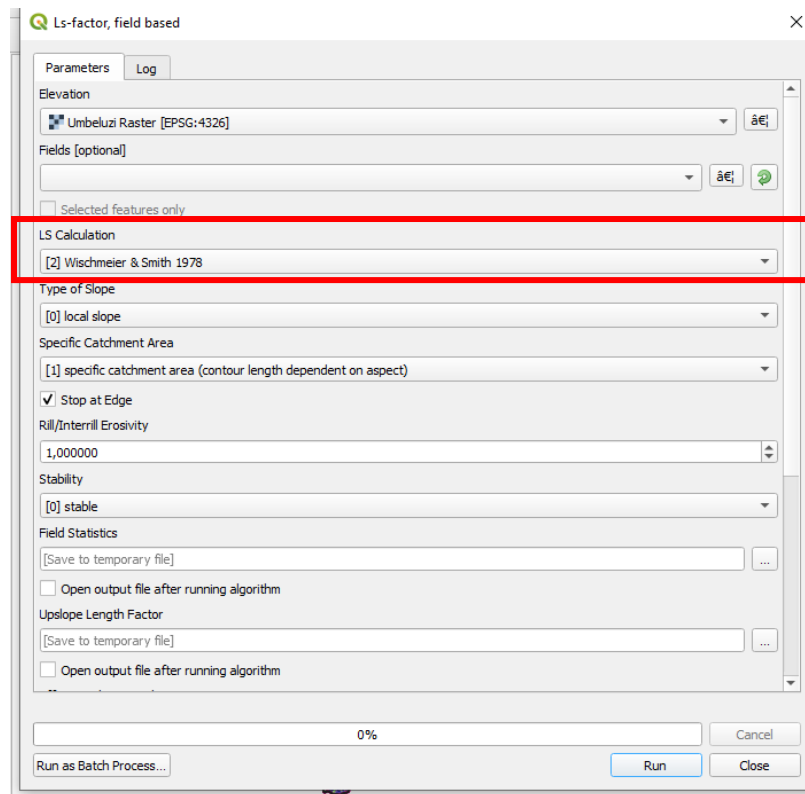


Figura 8_ Indicação do processo de escolha do método para o cálculo do factor LS.(fonte: captura de tela efectuada pelo autor no QGIS)

O resultado da operação corresponde a camada *raster* com a distribuição do factor LS.

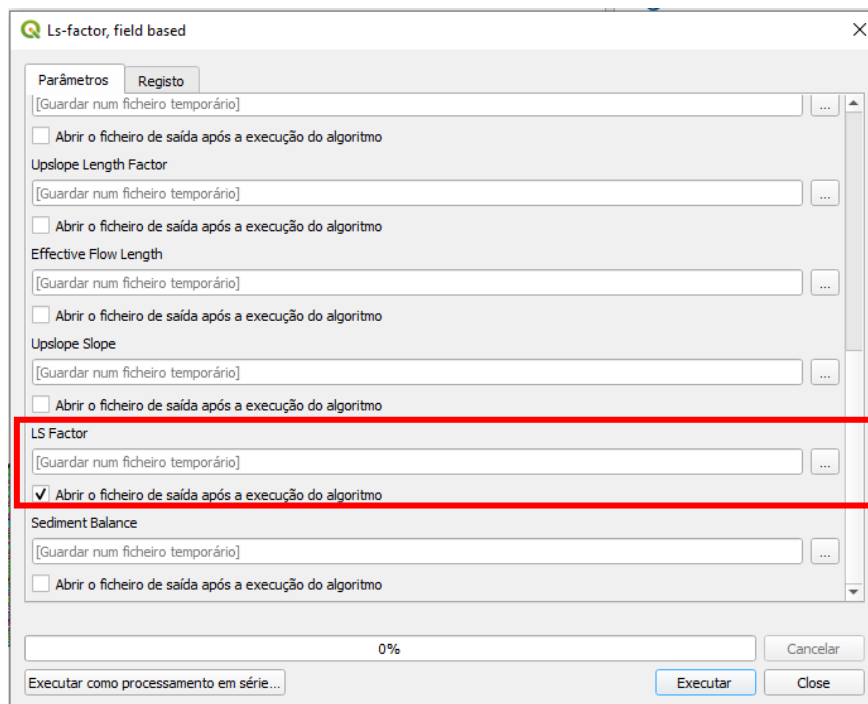


Figura 9_ Indicação do processo de escolha do resultado desejado para a geração da distribuição espacial do factor LS. (fonte: captura de tela efectuada pelo autor no QGIS)

Abaixo encontra-se representada a distribuição espacial do factor LS para a bacia hidrográfica do Rio Umbeluzi, assim como o MED com a distribuição das altitudes.

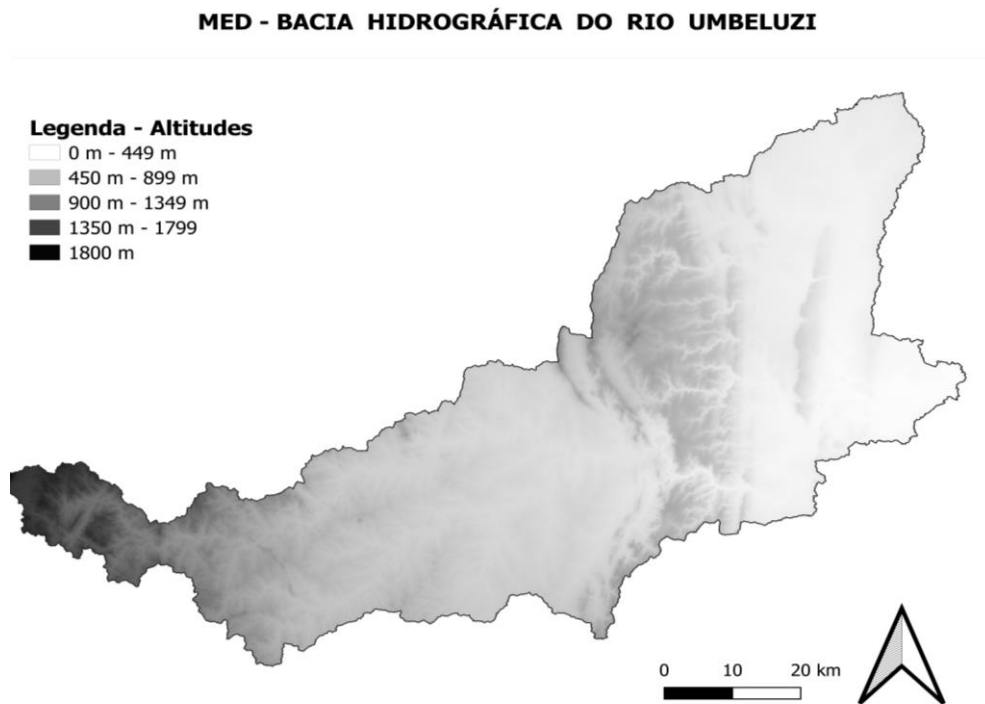


Figura 10_ Modelo de elevação digital da área em estudo, resolução espacial de 30m, projeção WGS84. (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do QGIS)

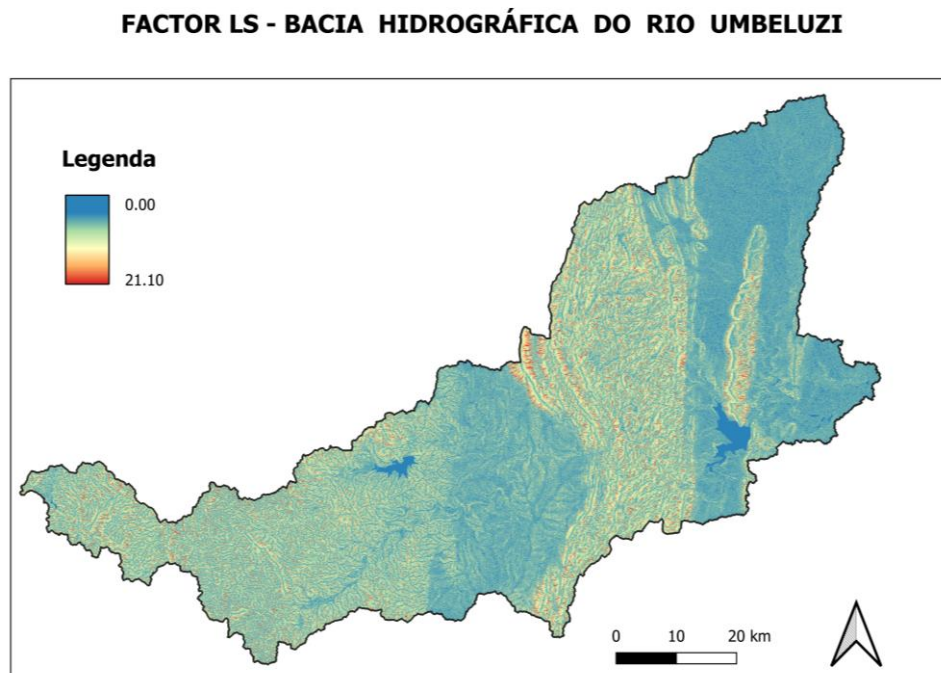


Figura 11_ Factor LS da área em estudo, resolução espacial de 30m, projeção WGS84. (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do QGIS)

3.2.4 Cálculo do factor C e P

Para o cálculo do factor C foi necessário a obtenção do mapa de uso e ocupação do solo para a bacia em estudo no portal da USGS - *United States Geological Survey* (<https://www.usgs.gov/prorams/national-geospatial-program/land-cover>, 24 de abril de 2022), resultante de imagens de alta resolução (10m) do satélite *Sentinel-2*, obtidas para o ano de 2021, na projecção geográfica WGS84, em formato vectorial.

O mapa possui 8 classes, descritas na tabela A3.17 do anexo 3, sendo que a área em estudo possui 7 classes (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8).

Com base na tabela 4, atribuiu-se a cada classe de uso de solo um valor do factor C, representado na tabela 10.

Quanto ao factor P, foi considerado igual a 1 para todas as classes, devido a falta de informação precisa sobre quais práticas de conservação do solo são adoptadas na área de estudo.

DISTRIBUIÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UMBELUZI

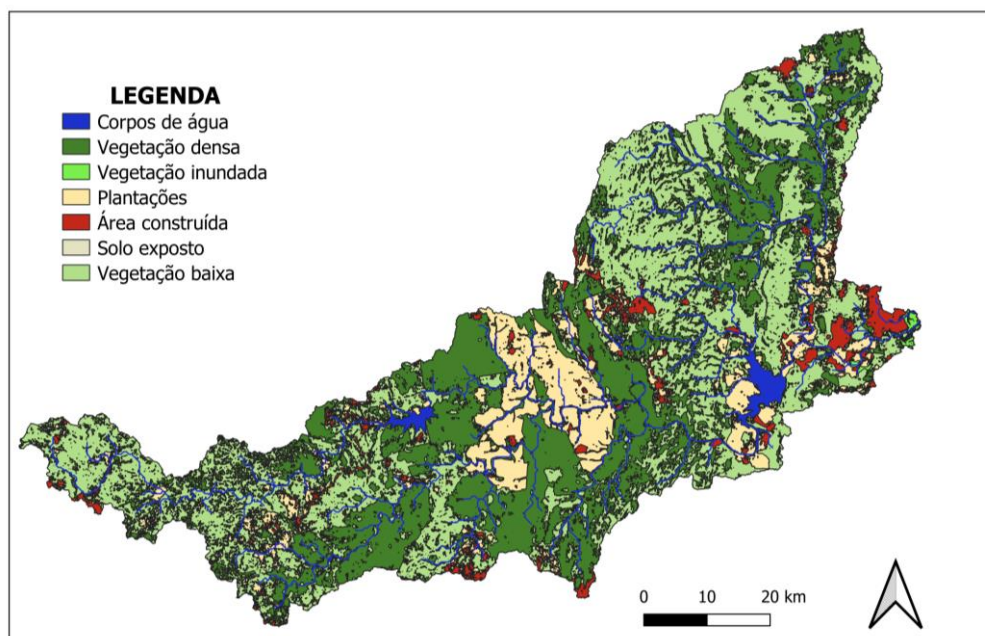


Figura 12_ Distribuição espacial do uso e ocupação do solo da área em estudo, projecção WGS84.(fonte: elaborado pelo autor com auxílio do QGIS)

Tabela 10_ valores do factor CP para a área em estudo.(fonte: elaborado pelo autor com auxílio do MS Office Word)

Valores do factor CP para a área em estudo		
Nr.	Classe	Factor CP
1	Corpos de água	0
2	Vegetação densa	0.015
3	Vegetação inundada	0
4	Plantações	0.156
5	Área construída	1
6	Solo exposto	1
8	Vegetação baixa	0.025

Abaixo encontra-se a representação da distribuição espacial do factor CP na área em estudo.

FACTOR CP - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UMBELUZI

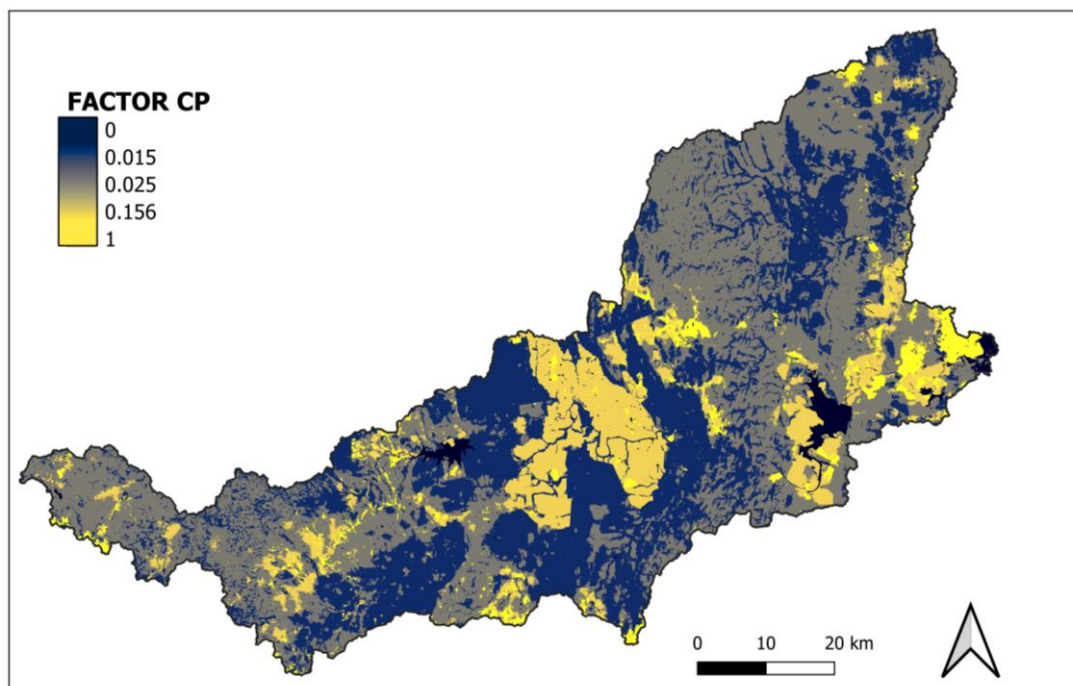


Figura 13_ Distribuição espacial do factor CP na área em estudo, resolução espacial de 30m, projecção WGS84.(fonte: elaborado pelo autor com auxílio do QGIS)

É importante salientar que para a área descrita como plantações foi usado um valor, mas o factor C varia de acordo com a cultura que é praticada e de acordo com o estágio de desenvolvimento da mesma cultura, pois na fase inicial do plantio a cultura não protege o solo sendo uma fase em que área se encontra mais vulnerável enquanto que na fase de desenvolvimento e na fase final a cultura já possui uma maior capacidade de proteger o solo. Sendo um estudo geral e mais abrangente pode não ser muito importante a diferenciação do factor C para esta área, sendo esta diferenciação mais importante em estudos mais específicos em áreas menores.

3.2.5. Distribuição da erosão na bacia hidrográfica

A avaliação da erosão é feita matematicamente por análise simultânea da informação dos vários factores para um dado pixel ou elemento numa grelha no mapa com recurso a EURPS. Assim o mapa com a distribuição espacial da erosão foi obtido através da sobreposição dos mapas de cada um dos factores em formato *raster* por meio da aplicação das ferramentas do QGIS, representada na figura 14.

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA EROSÃO ANUAL MÉDIA - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UMBELUZI

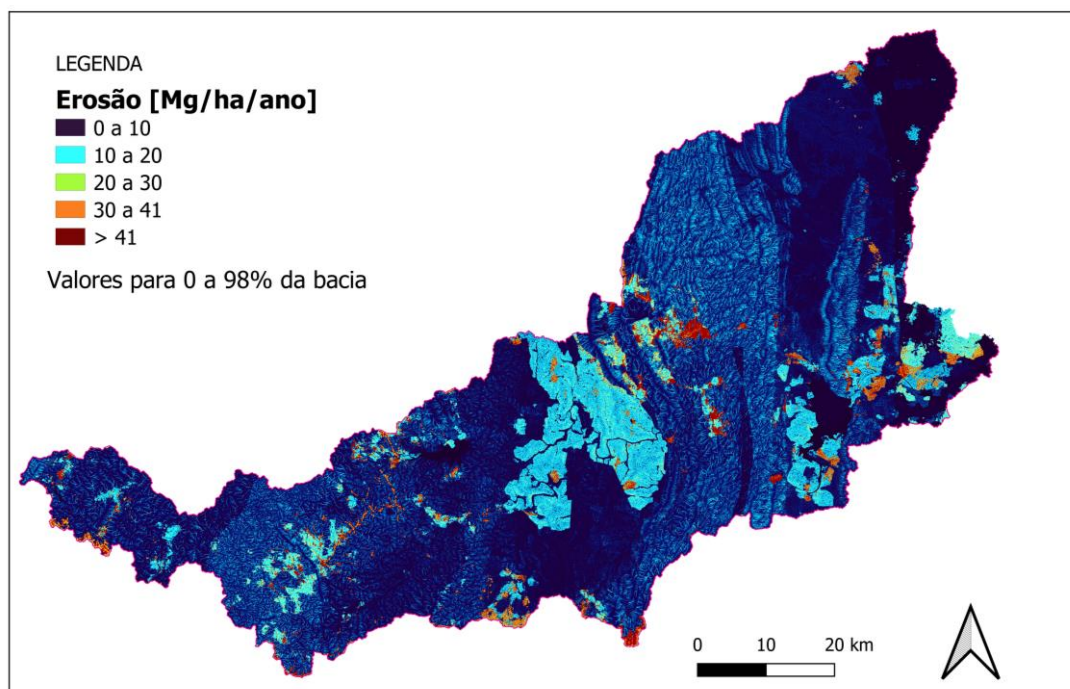


Figura 14_ Distribuição espacial da perda de solo na bacia hidrográfica do Umbeluzi, resolução espacial de 30m, projecção WGS84. (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do QGIS)

Importante salientar que 98% da área apresentou valores de erosão inferiores a 41 Mg/ha/ano e cerca de 86% valores inferiores a 5Mg/ha/ano. A figura 14 apresenta a variação da erosão para 98% da bacia, os 2% restantes apresentaram valores entre 41 e 2157.62 Mg/ha/ano, isto resulta do facto de que em uma análise simultânea da informação dos vários factores para um dado pixel, isto é, o cálculo da erosão para cada ponto do mapa, basta que se reúnam as piores condições em um dado ponto que resultem em valores extremos de erosão para que tenhamos resultados com valores muito diferentes do restante da bacia. Estes resultados são pouco significativos visto se situarem em uma percentagem insignificante da bacia.

3.3. Taxa de entrega de sedimentos

A taxa de entrega de sedimentos (TES) foi estimada com base nas equações apresentadas na tabela 6, e as equações a usar foram escolhidas em função da área de cada sub-bacia. Para as sub-bacias com área superior a 262 Km² foi usada a equação desenvolvida por Vanoni (1975) e para sub-bacias com áreas inferiores a 262 Km², foi usada a equação desenvolvida por Renfro (1975) citado por Colman *et al.* 2018 e Didoné *et al.* 2015. Os valores de TES são apresentados na tabela 11.

Tabela 11_ Valores da TES para cada sub-bacia.(fonte: elaborado pelo autor com auxílio do MS Office Excel)

Valores da TES para cada sub-bacia					
SB	Sub-bacia	AREA[km2]	%	Equação usada	TES
1	UMBELUZI-1	1250	22,8	Vanoni(1975)	0,19
2	MBULUZANE	1022	18,7	Vanoni(1975)	0,20
3	TSAMBOKHULU	127,24	2,3	Renfro(1975)	0,31
4	MLAWULA	311,6	5,7	Vanoni(1975)	0,23
5	S/N	238,74	4,4	Renfro(1975)	0,29
6	IMPAMPUTO	139,11	2,5	Renfro(1975)	0,31
7	MOVENE	1495	27,3	Vanoni(1975)	0,19
8	UMBELUZI-2	894,84	16,3	Vanoni(1975)	0,20

Equações para o cálculo da TES que foram desenvolvidas de forma muito abrangente, isto é, para intervalos grandes de áreas, como a equação USDA-NRCS (1983) citado Didoné *et al.* (2015) apresentada na tabela 6 resultam em valores muito baixos e de certa

forma menos precisos, daí ter se optado pela utilização da equação de Vanoni (1975) para áreas superiores a 262 Km², que é o limite da equação proposta por Renfro (1975) citado por Colman *et al.* (2018) e Didoné *et al.* (2015).

As equações de Renfro (1975) e USDA-NRCS (1979) citados por Colman *et al.* (2018) e Didoné *et al.* (2015), apresentaram valores muito próximos com diferença de cerca de 2 unidades para as áreas das sub-bacias aqui estudadas, sendo assim qualquer das duas equações seriam adequadas.

NOMENCLATURA DAS SUB-BACIAS - BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UMBELUZI

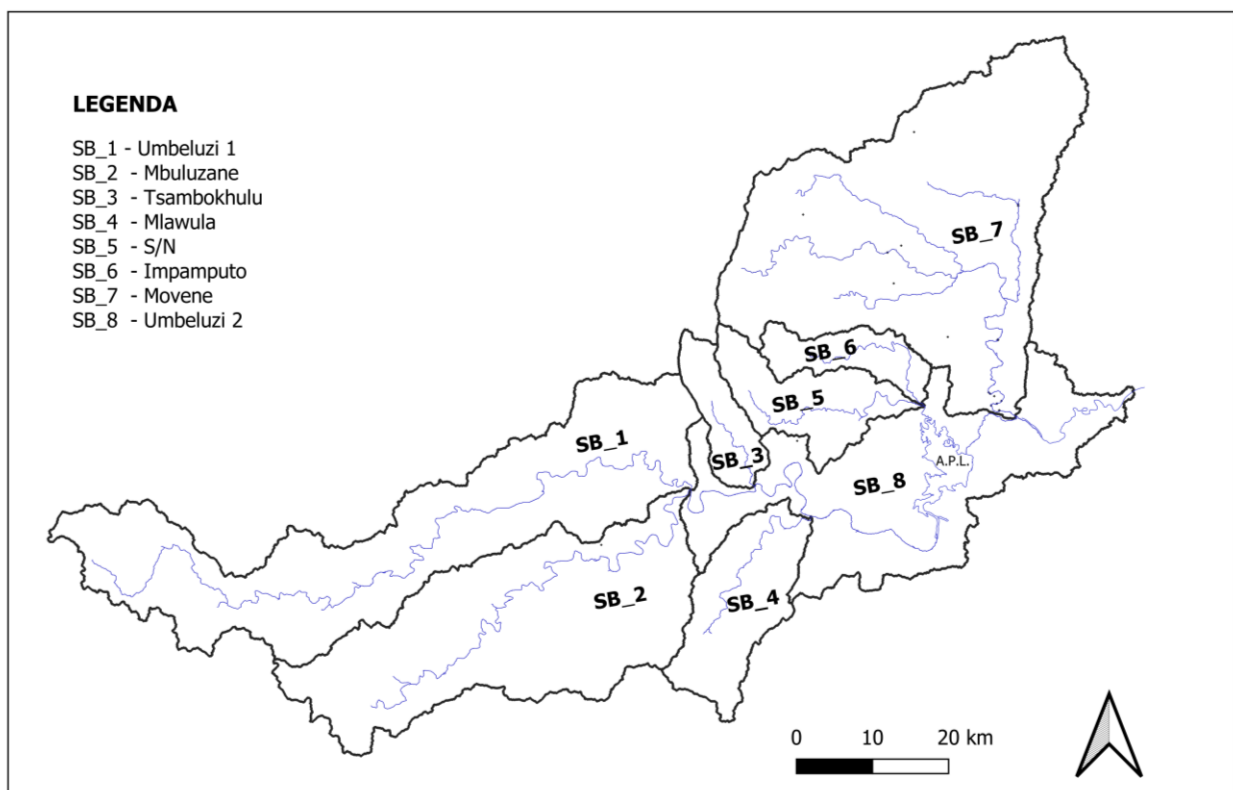


Figura 15_Representação das sub-bacias da área em estudo, projecção WGS84. (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do QGIS)

3.4 Produção de sedimentos

A produção de sedimentos em cada sub-bacia foi estimada com base na equação 16, colocando em evidência o PS_{medido} , nesse caso considerando-o $PS_{estimado}$. Para tal foi determinada a erosão média em cada sub-bacia, fazendo a média ponderada dos valores de erosão em cada ponto no interior da área da sub-bacia.

Tabela 12_ Valores da produção de sedimentos estimada no exutório de cada sub-bacia. (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do MS Office Excel)

Valores da produção de sedimentos estimada no exutório de cada sub-bacia						
SB	Sub-bacia	área(ha)	Erosão média anual (A) [Mg/ha/ano]	Erosão bruta E [Mg/ano]	TES	$PS_{estimado}$ [Mg/ano]
1	UMBELUZI-1	125000	4.11	513750	0.19	99541.3
2	MBULUZANE	102200	3.63	370986	0.20	73712.5
3	TSAMBOKHULU	12724	11.05	140600.2	0.31	43866.1
4	MLAWULA	31160	4.27	133053.2	0.23	30668.4
5	S/N	23874	10.93	260942.82	0.29	74452.6
6	IMPAMPUTO	13911	9.28	129094.08	0.31	39769.4
7	MOVENE	149500	2.22	331890	0.19	62882.4
8	UMBELUZI-2	89484	5.37	480529.08	0.20	97077.0

A sub-bacia 8 recebe os sedimentos de todas as outras sub-bacias, de tal modo que os sedimentos na secção de saída desta sub-bacia serão a soma dos sedimentos na secção de saída de todas as outras sub-bacias e os sedimentos gerados na própria sub-bacia, tendo em conta que o modelo EURPS não considera os sedimentos erodidos e depositados ao longo do curso de água.

4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Estimativa da perda de solo

Factor de erosividade (R)

Com base na série de precipitação usada, presente na tabela A2,15 do anexo 2, a área recebe em média, precipitação ao longo de todos os meses do ano, com os meses de Dezembro e Janeiro apresentando as maiores quantidades de precipitação.

A erosividade anual ou poder erosivo anual da chuva variou entre 3059 e 3403 $Mj*mm/ha/h$, com uma média de 3278,7 $Mj*mm/ha/h$. A faixa de valores de erosividade demonstrou uma certa uniformidade ao longo da bacia, algo que vai de encontro com a certa uniformidade também da precipitação, com a precipitação média anual variando entre 687 e 806mm de acordo com a tabela A2,15, valores relativamente próximos. Os menores valores de erosividade média anual foram verificados na região norte da bacia, na sub-bacia do rio Movene e a sudoeste da bacia, na sub-bacia Umbeluzi 1. Os maiores foram verificados a sul da bacia, mais concretamente a este da sub-bacia Mbuluzane e na sub-bacia Mlawula.

Não foi verificada qualquer relação entre a precipitação média anual e o poder erosivo, pois o coeficiente de determinação (R^2) entre a erosividade média anual e a precipitação média anual foi de 0,2407 como se pode observar no gráfico 1, inferior aos valores obtidos por Silva (2004) e Oliveira *et al.* (2012) para Brasil, 0,975 e 0,41 respectivamente de acordo com Oliveira *et al.* (2012). De acordo com Oliveira *et al.* (2012), o $R^2=0,975$ obtido por Silva (2004) indica uma correlação forte entre a erosividade e a precipitação anual, porém segundo Mello *et al.* (2007) citado por Oliveira *et al.* (2012) e o estudo desenvolvido por Oliveira *et al.* (2012) tal não se verificou para os estados de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, pelo que, para os resultados observados no presente estudo, tal também não é válido para a bacia hidrográfica do Umbeluzi, isto é, maiores valores de precipitação anual não indicam necessariamente maiores valores de erosividade anual.

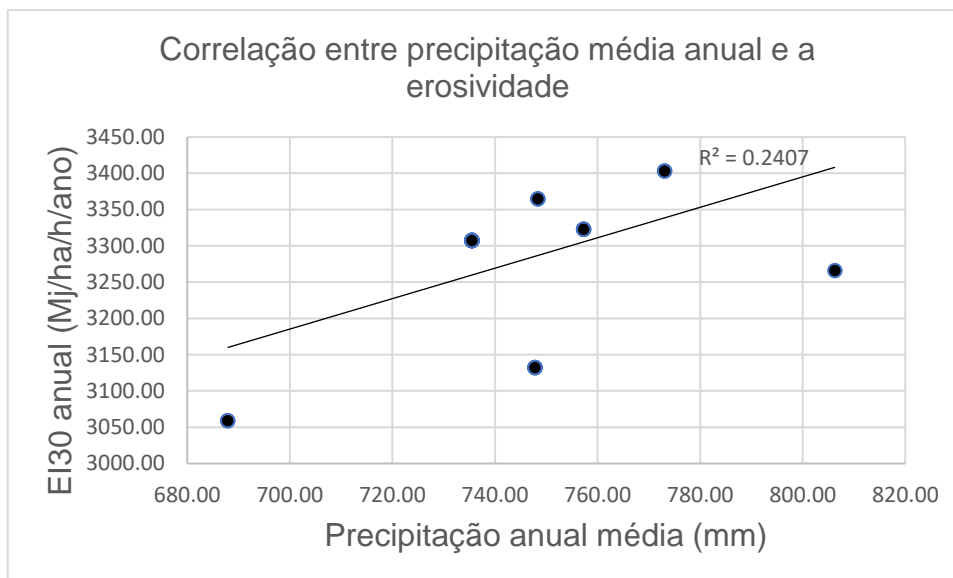


Gráfico 1_ Correlação entre a precipitação média anual e a erosividade média anual. (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do MS Office Excel)

Estudos como o realizado por Cordeiro e Van den Berg (1996) para Maputo, revelam que existe uma relação entre a precipitação média mensal e a erosividade média mensal. No estudo acima citado, maiores valores de erosividade foram verificados nos meses de maior precipitação. A intensidade da precipitação tem um grande efeito na erosividade, isto é, maiores quantidades de chuva caindo em curtos períodos de tempo, tendem sim a provocar maior erosão. É importante salientar que nem sempre o mês mais chuvoso será o mês com maior erosividade, pois a erosividade depende bastante da intensidade de cada evento individual de chuva. Podem haver meses com muita precipitação, mas ocorrida de forma bem distribuída e meses com pouca precipitação mas ocorrida em um pequeno período de tempo e com maior intensidade, resultando em maior poder erosivo. Mas é sempre mais provável a ocorrência de eventos de chuva de alta intensidade em meses com maiores valores de precipitação.

Esta análise não foi feita no presente estudo, visto que as equações da tabela 1 resultam do estabelecimento de relações entre o valor anual de EI30 (factor R) e o coeficiente Rc, sendo adequadas para o cálculo do valor anual de EI30 como foi feito neste estudo, e não para o cálculo dos valores mensais de EI30. Para obtenção dos valores mensais de EI30 seria necessário dispor de dados de intensidade de cada evento de chuva de cada mês, para o cálculo da energia cinética e do valor de EI30 mensal

Factor de erodibilidade (K)

A área em estudo apresentou valores de erodibilidade entre 0,00651 e 0,05035 Mg*h/Mj/mm. As classes de solo LPe, PHi e SNj com 23%, 14,2% e 15,6%, respectivamente, representaram a maior parte da bacia, sendo LPe franco a franco-argiloso, PHi argiloso e SNj argila franco-arenosa. Na figura 7, têm-se o mapa de erodibilidade em que as áreas a castanho estão associadas solos siltosos, com maiores valores de K, e as áreas a verde estão associadas a solos altamente argilosos ou arenosos, com menores valores de K.

A relação entre a classe de solo e a erodibilidade se demonstrou um tanto complexa, visto que solos com alto teor de areia, conseqüentemente grosseiros como o Aro com 93% de areia, apresentaram o menor valor de erodibilidade, com 0,00651 Mg*h/Mj/mm, porém solos com alto teor de argila e conseqüentemente muito finos como o FRr com 77% de argila, não apresentaram os maiores valores de erodibilidade, com 0,02557 Mg*h/Mj/mm. O que se verificou foi que para Dg inferior a 0,03mm há uma tendência de redução da erodibilidade com a redução do Dg e para Dg maior que 0,03mm há uma tendência de redução da erodibilidade com aumento do Dg, uma tendência um tanto estranha, visto que Batista *et al.* (2017) afirmou que texturas mais grosseira contribuem para o aumento da propensão do solo a erosão.

Colman *et al.* (2018) observou que solos de textura arenosa possuem alta susceptibilidade a erosão devido a fraca agregação entre as partículas, porém Anees *et al.* (2018) afirmou que solos argilosos são resistentes ao desprendimento das partículas, solos arenosos resistentes ao transporte devido as altas taxas de infiltração e solos franco-siltosos são ligeiramente desprendidos, sendo que a infiltração é moderada a baixa para siltes, resultando em escoamentos moderados a altos, e os sedimentos são moderadamente a facilmente transportados, essas condições resultam em valores baixos do factor K para solos arenosos e argilosos, e valores moderados a altos do factor K para solos siltosos.

Apesar do quão erodível um solo se apresenta em uma certa região ser também dependente de outros factores como a inclinação, o factor K tende a representar a erodibilidade baseada apenas em características do solo.

Factor topográfico (LS)

O factor LS variou de 0,004 em regiões planas ou com inclinações nulas a 21,1 em regiões de maior inclinação, com uma média de 16,33 em concordância com o observado por Batista *et al.* (2017) em relação ao comportamento do factor LS, alto em regiões de maior inclinação e baixo em regiões de menor inclinação. Isto demonstra que a inclinação tem um grande impacto na susceptibilidade do solo a erosão, visto que é da inclinação que depende a velocidade do escoamento gerado pela chuva, que tem um papel determinante no transporte dos sedimentos.

Factor de uso e cobertura do solo (C)

A bacia hidrográfica do Umbeluzi conta com 35,45%(1954,7 Km^2) de área coberta por vegetação densa, 46,4%(2558,66 Km^2) de área coberta por vegetação baixa, 12,04%(663,95 Km^2) de área agrícola, 4,5%(247,55 Km^2) de área construída, 1,32%(72,81 Km^2) de área coberta por água e 0,27%(14,91 Km^2) de área de vegetação inundada, como melhor representado no gráfico 3, áreas obtidas a partir do mapa de uso e ocupação do solo e aplicação das ferramentas de processamento do programa de sistema de informação geográfica utilizado ao longo do estudo.

A maior parte da área da bacia apresenta vegetação densa e vegetação baixa, que correspondem aos menores valores do factor C, demonstrando uma baixa influência isolada da cobertura do solo na quantidade de erosão da bacia. As poucas regiões com práticas agrícolas, apesar de não possuírem práticas de controlo e suporte, não apresentaram altos valores de erosão, por apresentarem valores baixos do factor LS e erosividade.

As áreas construídas apesar de pequenas, estiveram associadas aos maiores valores de erosão, estas áreas correspondem a estruturas feitas pelo Homem, grandes áreas homogéneas impermeáveis, edifícios, vilas/cidades densamente povoadas, estradas pavimentadas e asfaltadas, entre outros, sendo assim, podem apresentar diversas variações internas do uso do solo, mas tendo em conta a escala do estudo não se fez essa diferenciação do factor C dentro da área classificada como área construída.

Percentagem de cada classe de uso e ocupação do solo

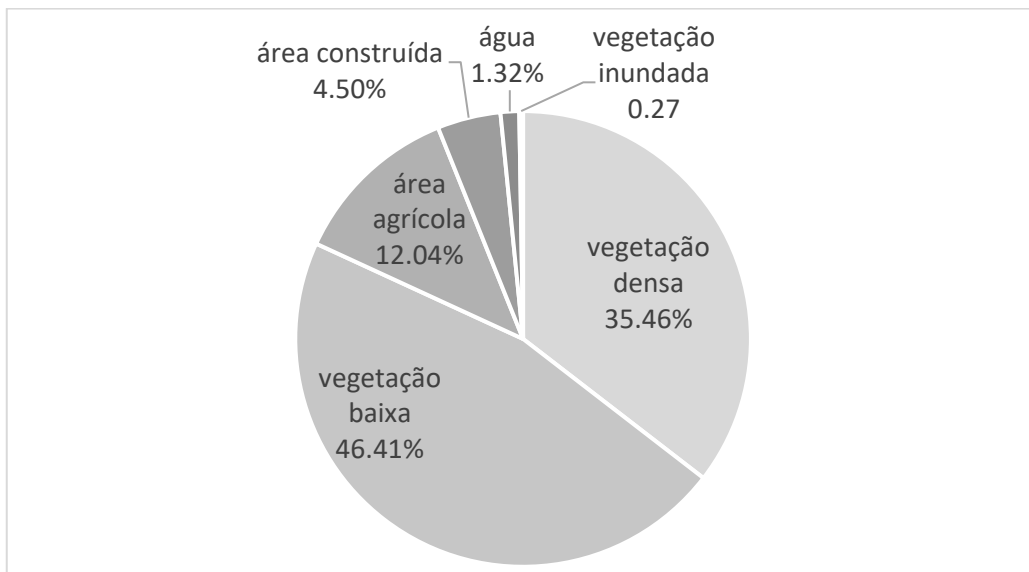


Gráfico 2_ Percentagem de cada classe de uso e ocupação do solo. (fonte: elaborado pelo autor por meio do MS Excel)

Erosão

A distribuição espacial da erosão demonstrou a influência da predominância de baixos valores de factor LS na bacia, e conseqüentemente de baixas inclinações, combinado com elevada quantidade de regiões com vegetação densa. Os valores variaram de 0 a 2157,62 Mg/ha/ano, com uma média de 4,33 Mg/ha/ano. Importa salientar que 98% da área apresentou valores de erosão inferiores a 41 Mg/ha/ano e cerca de 86% valores inferiores a 5Mg/ha/ano. A figura 14 apresenta a variação da erosão para 98% da bacia, os 2% restantes apresentaram valores entre 41 e 2157,62 Mg/ha/ano. Os máximos valores de erosão (a vermelho) estão associados às áreas construídas. Porém as maiores quantidades, resultado da relação entre a área e os valores de erosão na respectiva área, estão associadas às áreas agrícolas (a azul claro).

A maior parte da bacia apresentou valores baixos (quando comparados com a literatura consultada), menores que 5 Mg/ha/ano, a azul escuro, justificado pelo facto da maior parte da bacia estar coberta por vegetação densa e baixa.

Segundo Cunha et al. (2016) a vegetação desempenha um papel chave na estabilização e protecção das encostas, agindo como um escudo protector contra o impacto das gotas de chuva, promovendo a dispersão da água, intersectando e fazendo com que a água

evapore antes de alcançar o solo, melhorando a estrutura do solo adicionando matéria orgânica e reduzindo a velocidade do escoamento aumentando a fricção superficial.

Os maiores valores de erosão foram verificados em regiões com valores altos do factor LS associadas a áreas sob intensa acção antropogénica como solo exposto e área construída, sendo que as regiões de prática agrícola não resultaram nos máximos valores de erosão, visto que a maior parte delas se encontra em terrenos menos inclinados resultando num menor valor do factor LS.

Em relação aos máximos valores de erosão associados as áreas construídas, há que notar que estas áreas são geralmente caracterizadas pela remoção da cobertura vegetal deixando o solo mais susceptível a erosão e também caracterizadas pela compactação e impermeabilização permitindo que se formem maiores lâminas de água em eventos de chuva com maior poder erosivo.

É importante salientar que existe um grau de incerteza na estimativa da erosão através do modelo EURPS, pois este modelo só considera a erosão laminar e em sulcos, desprezando a erosão que ocorre nos bancos dos rios.

O transporte por arrastamento representado no processo morfológico fluvial, tem pouco interesse para o estudo da erosão nas bacias. Os sedimentos que entram para o rio, oriundo da bacia, são transportados em suspensão. É por isso que só interesse esta forma de transporte sólido no estudo da erosão em bacias.

Os resultados permitem identificar os locais de maior erosão e consequentemente de maior interesse no que tange a recuperação e conservação do solo.

Perda de solo nas sub-bacias

Foram delimitadas 8 sub-bacias, de acordo com os afluentes principais do rio e com base na direcção do fluxo de drenagem, inclinação, topografia e relevo, em um ambiente SIG e demarcadas como SB1 a SB8. A maior sub-bacia (SB7) possui 1495 Km^2 e a menor (SB3) possui $127,24 \text{ Km}^2$ de área. As sub-bacias possuíram diferentes inclinações, elevações, áreas e distribuição do uso e ocupação do solo, e consequentemente, diferentes valores da perda anual média de solo. Sendo assim, para estimar a erosão anual média em cada sub-bacia, a área de cada sub-bacia foi recortada em um ambiente

SIG, e foi feita a média ponderada dos valores da erosão no interior de cada área, valores representados na quarta coluna da tabela 12.

A perda de solo nas sub-bacias foi dividida em 8 classes de acordo com Colman *et al.* (2018), de muito baixa para muito severa.

Tabela 13_classes de erosão segundo Colman et al. (2018). (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do MS Office Excel)

classe de erosão	limites da classe [Mg/ha/ano]
Muito baixa	0-2
Baixa	2-5
Moderada	5-10
Alta	10-20
Muito alta	20-40
Severa	40-80
Muito severa	>80

De acordo os valores da perda média anual de solo em cada sub-bacia, representados na tabela 13, as sub-bacias SB1, 2, 4, e 7 apresentaram baixos valores de perda de solo, as sub-bacias SB 6 e 8 apresentaram perda de solo moderada, as SB3 e 5 apresentaram perda de solo alta. Tal facto pode ser justificado através da observação de menor percentagem de área construída e de área agrícola nas sub-bacias SB1,2,4 e 7 (tendo em conta que a agricultura sem aplicação de práticas de gestão e conservação do solo tende a causar maiores valores de perda de solo) e maior percentagem de área coberta por vegetação densa e baixa, que representa maior protecção do solo contra a erosão.

O contrário se verifica nas sub-bacias 3 e 5, com a sub-bacia 5 apresentando uma grande percentagem da sua área coberta por área agrícola e no caso da SB5 verifica-se máximos valores do factor topográfico por se situar em uma região de transição entre altitudes elevadas e baixas, mesmo não tendo grandes áreas agrícolas, oque contribui também para valores altos de erosão.

Outro aspecto interessante é que na sub-bacia 1, pelo facto da área mais propensa a erosão se situar próximo da secção de saída da bacia, haverá maior produção de sedimentos, pois mais sedimentos alcançarão a secção de saída da sub-bacia.

4.2 Produção de sedimentos

A taxa de entrega de sedimentos (TES) variou de 0,19 para as áreas maiores (SB1 e 7) a 0,31 para as áreas menores (SB3 e 6), pois a TES é inversamente proporcional a área, visto que quanto maior a área da bacia maior será o percurso da água transportando os sedimentos até alcançar a secção de saída da bacia, resultando em maior probabilidade de deposição dos sedimentos a montante da secção de saída da bacia hidrográfica. A produção de sedimentos nas sub-bacias estudadas variou de 30668,4 Mg/ano (SB4) a 99541,3 Mg/ano (SB1). Em termos de produção de sedimentos por hectare (produção específica) obtida por meio da divisão da produção de sedimentos pela área da respectiva sub-bacia, as sub-bacias apresentaram valores relativamente baixos, entre 0,8 e 3,45 Mg/ha/ano para SB1 e SB3 respectivamente.

Há que salientar que tanto a TES como a produção de sedimentos não foram calibradas através de dados de medição da produção de sedimentos. A calibração é um meio importante para certificar a precisão dos resultados obtidos e também para a criação de equações pra o cálculo da TES mais adequadas as áreas em estudo.

5 CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

No presente estudo, foi possível quantificar a perda anual média de solo na bacia hidrográfica do rio Umbeluzi através do modelo EURPS, de forma rápida e distribuída com auxílio de SIG, tendo sido observados valores entre 0 e 41 M/ha/ano para 98% da área com uma média de 4,33 Mg/ha/ano. Tendo-se verificado valores relativamente baixos da erosividade para a bacia hidrográfica do Umbeluzi, em torno de 3059 a 3403 $Mj \cdot mm/ha/h$. Concluiu-se ainda que a erodibilidade tende a ser menor em solos com texturas arenosas ou argilosas, sendo os maiores valores nos solos intermédios (siltosos). As regiões da bacia e sub-bacias mais propensas a erosão, foram as situadas em zonas íngremes ou de maior inclinação, na transição entre regiões altas e baixas, combinadas com uso e ocupações de solo através áreas construídas e agrícolas, revelando que para a bacia em questão, a influência combinada da topografia e do uso de solo resulta nas regiões mais propícias a erosão. Verificou-se que apesar da existência de vários modelos para o cálculo da TES, a maior parte deles é limitada pela área da bacia para qual foi desenvolvido e que a área é um factor determinante no valor da TES. Foi ainda determinada a produção de sedimentos na secção de saída de cada sub-bacia, variando entre 30668,4 Mg/ano (SB4) a 99541,3 Mg/ano. Este estudo serviu para apresentar e demonstrar a aplicação de modelos matemáticos, neste caso a EURPS associado a SIG para a previsão da erosão anual média em bacias hidrográficas de regiões tropicais, assim como diversos meios para a recolha de dados. Este tipo de análise tem um grande potencial para permitir determinar as regiões que precisam de estratégias para o controle e redução da erosão e consequentemente dos sedimentos produzidos, que com base nos dados usados neste estudo, foram identificadas nas sub-bacias 3 e 5 que apresentaram os maiores valores de erosão e sub-bacias 1 e 8 que apresentaram os maiores valores de produção de sedimentos. Conclui-se ainda que o controlo da produção de sedimentos como consequência da erosão é muito importante para a conservação do solo e dos recursos hídricos, assim como obras hidráulicas, e que o uso e ocupação do solo deve ser bem analisado devido ao seu forte impacto na protecção ou não do solo contra a erosão. É importante salientar que a falta de medições e calibração dos resultados referentes a bacia em estudo não permite que os mesmos sejam conclusivos, tendo de ser analisados com reservas.

5.2 Limitações

Equações empíricas para a modelagem da erosão como a EURPS usada neste estudo, são de certa forma sensíveis aos dados utilizados para o cálculo dos factores da equação. Sendo assim a criação ou obtenção de dados precisos é um aspecto muito importante, principalmente no que se refere às propriedades do solo, assim como ao padrão de uso e ocupação do solo. As características dos solos utilizadas no caso de estudo aqui apresentadas não são das mais precisas, tendo em conta a escala dos mapas de solos criados a nível nacional ou global, sendo assim, pode se considerar como uma limitação o facto de não ter se realizado estudos de campo referentes aos solos, mas há que notar que em um estudo deste género, a viabilidade de se realizarem este tipo de campanhas a nível de áreas enormes como bacias hidrográficas é bastante reduzida.

Há ainda as limitações ligadas as medições de campo da produção de sedimentos para calibração do modelo, estas medições são geralmente feitas ao longo de vários anos, de modo a ter resultados representativos do regime de produção de sedimentos de uma certa área, e tendo em conta a área de estudo, seria possível de forma faseada, uma sub-bacia de cada vez. Estas medições não foram realizadas ao longo do estudo, tendo em conta questões ligadas ao período de tempo no qual o estudo foi realizado.

5.3 Recomendações

Recomenda-se em primeiro lugar, que os resultados do estudo de caso não seja vistos como conclusivos, devido a falta de calibração, mas sim que se observe o estudo como um ponto de partida para o melhor entendimento dos processos erosivos em bacias hidrográficas e a criação de mais estudos ligados a quantificação da erosão no país.

É importante ainda recomendar em relação ao estudo de caso, a realização futura de medições da produção de sedimentos nas sub-bacias de modo a calibrar os resultados, assim como da melhor avaliação dos solos da região, de forma faseada, uma sub-bacia de cada vez.

Em relação a realização de estudos ligados a previsão da erosão no nosso país, tendo em conta que os dados para alimentar os modelos são essenciais para a fiabilidade desses estudos, recomenda-se criação de mais informação ou dados seja ligados as

características dos solos do país, ao mapeamento preciso do uso e ocupação dos solo, assim como de práticas de gestão e controlo da erosão que sejam implementadas nas áreas agrícolas do país. Dados como os mencionados serão essenciais para alimentar este tipo de modelo e permitir a criação de mapas de erosão para as diversas bacias hidrográficas do país.

Recomenda-se a realização de estudos individuais sobre cada um dos factores da EURPS para Moçambique, isto permitirá o desenvolvimento de equações mais precisas para cada região do país para o cálculo da erosividade e dos outros factores. Estudos deste género já foram realizados, como o de Cordeiro e Van den Berg (1996) relativo ao cálculo da erosividade para Maputo e Beira, mas são de certa forma escassos e limitados devido a informação limitada utilizada.

Apesar dos resultados obtidos demonstrarem no geral um padrão erosivo baixo a moderado na área de estudo, há que ter em conta que se trata de uma bacia localizada em regiões que tem vivenciado um crescimento sócio-económico, e que com o tempo poderá sofrer mais acção antropogénica gerando mudanças que acelerem a erosão, sendo assim, estudos sobre este fenómeno devem ser realizados antes do agravamento do fenómeno, de modo a estabelecer estratégias para a sua prevenção.

6 BIBLIOGRAFIA

6.1 Referências Bibliográficas

1. Anees M. T., Abdullah K., Nawawi M. N. M., Norulaini N. A. N., Syakir M. I., e Omar A. K. M. 2018 – Soil erosion analysis by RUSLE and sediment yield models using remote sensing and GIS in Kelantan state, Peninsular Malaysia, *CSIRO PUBLISHING*, vol 56, n. 4, p. 356-372.
2. Batista P. V. G., Silva M. L. N., Silva B. P. C., Curi N., Bueno I. T., Júnior F. W. A., Davies J., Quinton J. 2017 – Modelling spatially distributed soil losses and sediment yield in the upper Grande River Basin – Brazil, *Catena*, vol 157, p. 139-150.
3. Colman C. B., Garcia K. M. P., Pereira R. B., Shinma E. A., Lima F. E., Gomes A. O., Oliveira P. T. S. 2018 – Different approaches to estimate the sediment yield in a tropical watershed, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol 23, n. 47.
4. Cunha E. R., Bacani V. M., Panachuki E. 2016 – Modeling soil erosion using RUSLE and GIS in a watershed occupied by rural settlement in the Brazilian Cerrado, *Nat Hazards*, vol 85, p. 851-868.
5. Desmet P. J. J. & Govers G. 1996 – A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units, *Journal of Soil and Water Conservation*, vol 51, n. 5, p. 427-433.
6. Didoné E. J., Minella J. P. G., Merten G. H. 2015 – Quantifying soil erosion and sediment yield in a catchment in southern Brazil and implications for land conservation, *Journal of Soils and Sediments*, vol 15, p. 2334-2346.
7. Guimarães R. Z., Lingnau C., Rizzi N. E., Scheichi R. G., Bianchi R. C. 2011- Espacialização da perda de solo por erosão laminar na microbacia do rio campinas, Joinville SC, *RA'E GA*, vol 23, p. 534-554.
8. Hickmann C., Eltz F. L. F., Cassol E. A., Cogo C. M. 2008 – Erosividade das chuvas em Uruguaiana, RS, determinada pelo índice EI_{30} , com base no período de 1963 a 1991, *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, vol 32, p. 825 - 831.
9. Lu H., Moran C. J., Prosser I. P. 2005 – Modelling sediment delivery ratio over the Murray Darling Basin, *Environmental Modelling & Software*, vol 21, p. 1297 – 1308.

10. Montolar-Sparovek R. B., Vidal-Torrado P., Sparovek G. 1999 – Rill, interrill and gully erosion in an intensive cultivated watershed of Piracicaba, *Scientia Agricola*, vol 56, n. 4, p. 859-865.
11. Notisso P. F., Formiga K. T. M. 2021 – Avaliação da demanda futura de água na bacia hidrográfica do rio Umbeluzi em Moçambique, *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, vol 1, n. 1, p. 98-111.
12. Oliveira P. T. S., Rodrigues D. B. B., Sobrinho T. A., Carvalho D. F., Panachuki E. 2012 – Spatial variability of the rainfall erosive potential in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil, *Engenharia Agrícola*, vol 32, n. 1, p. 69-79.
13. Oliveira J., Dominguez J. M. L., Nearing M., Oliveira P. T. S. 2015 – A GIS-based procedure for automatically calculating soil loss from the Universal Soil Loss Equation: GISus-M, *Applied Engineering in Agriculture*, vol 31, n. 6, p. 907-917.
14. Rompaey A. J. J. V., Verstraeten G., Oost K. V., Govers G., Poesen J. 2001 – Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol 26, p. 1221 – 1236.
15. Santos A. T., Mancuso M. A., Fioreze M. 2015 – Variabilidade do factor topográfico (LS) da equação universal de perda de solo em função de diferentes resoluções de modelos numéricos de elevação do terreno, *Congresso Internacional de Hidrossedimentologia*.
16. Williams J. R., Berndt H. D. 1972 - Sediment yield computed with Universal Equation, *Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol 98, no. HY12, p. 2087-2098.
17. Zhang H., Yang Q., Li R., Moore D., He P., Ritsema C. J., Geissen V. 2013 – Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor, *Computers & Geosciences*, vol 52, p. 177-188.

6.2 Outra bibliografia consultada

18. Cordeiro P. C. A., Van den Berg M. 1996 – Correlação entre índice de erosividade e características de precipitação facilmente mensuráveis da Beira e Maputo. Trabalho de Licenciatura, UEM-Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal.
19. Didoné, E. J. 2013 – Erosão bruta e produção de sedimentos em bacia hidrográfica sob plantio directo no planalto do Rio Grande do Sul, Dissertação

- (mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Centro de ciências Rurais, programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo.
20. FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2009 - Harmonized World Soil Database (version 1.1), FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
 21. Gil, A. C. 1946 – Como elaborar projectos de pesquisa, 4ª Ed., Atlas, São Paulo.
 22. Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., Yoder, D. C. 1997 - Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation, *U.S. Department of Agriculture*, Washington.
 23. Sweco in association with Consultec Lda, Impacto Lda, BKS, Knight Pie'sold, 2005 – Joint Umbeluzi River Basin Study: Final Report, report prepared for the Government of the Republic of Mozambique and the Government of the Kingdom of Swaziland.
 24. Universidade Eduardo Mondlane 2009 - Regulamento de Culminação de Estudos nos Cursos de Engenharia, Maputo.
 25. Vanoni V. A. 1975 – Sedimentation Engineering, Manuals and reports on engineering practice, USA, American Society of Civil Engineers, No. 54.
 26. Vaz A. C. 2019–Obras Hidráulicas, Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
 27. Wischmeier W. H., Smith D. D. 1978 – Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning with Universal Soil Loss Equation (USLE), *Agriculture Handbook*, United States Department of Agriculture, Washington, No. 537.
 28. <https://gadm.org/index.html> , 18 de Abril de 2022
 29. <https://geodata.lib.utexas.edu/catalog/stanford-wf122zm7811>, 20 de abril de 2022.
 30. <https://www.usgs.gov/prorams/national-geospatial-program/land-cover>, 24 de abril de 2022.
 31. <https://www.ara-sul.gov.mz/unidade-de-gestao-da-bacia-do-umbeluzi-ugbu/>, 25 de abril de 2022
 32. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, 29 de maio de 2022
 33. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/eswatini/climate-data-historical#:~:text=mean%20annual%20rainfall%20ranges%20from,the%20typicaly%20hottest%20period%20annually>, 2 de junho de 2022
 34. https://www.sei.ba.gov.br/site/geoambientais/mapas/pdf/mapa_pluviometria.pdf, 2 de junho de 2022

35. http://www.limpopo.riverawarnesskit.org/LIMPOPORAK_COM/PT/RIO/CLIMA_E_METEOROLOGIA/PRINCIPLES_OF_CLIMATE_AND_WEATHER/CLIMATE_CLASSIFICATION.HTM. 2 de junho de 2022
36. Fischer, G., F. Nachtergaele, S. Prieler, H. T. van Velthuisen, L. Verelst, D. Wiberg, 2008 - Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture. IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy. ([Harmonized world soil database v1.2 | FAO SOILS PORTAL | Food and Agriculture Organization of the United Nations](#), 4 de junho de 2022)

ANEXOS

Anexo 1 – Base de dados das estações pluviométricas da área de estudo

A1. 14_ Base de dados das estações pluviométricas da área de estudo.(fonte: elaborado pelo autor com auxílio do MS Office Excel. Dados de localização das estações obtidos em SWECO & Associates 2005)

Estação pluviométrica	Número	Latitude	Longitude	altitude [m]	abrangência dos dados	Nr de anos	fonte dos dados
Moçambique							
BOANE PEQUENOS LIBOMBOS	1169	-26,092	32,24	24	1981 - 2021	40	referência (27)
NAMAACHA MAILANE 2	1245	-26,18	32,203	16	1981 - 2021	40	referência (27)
BOANE MASSACA 2	3	-26,05	32,29	33	1981 - 2021	40	referência (27)
NAMAACHA GOBA FRONTEIRA	5	-26,25	32,1	418	1981 - 2021	40	referência (27)
BOANE E. AGRARIA UMBELUZE	6	-26,05	32,37	45	1981 - 2021	40	referência (27)
MOAMBA / PESSENE	342	-25,69	32,35	41	1981 - 2021	40	referência (27)
GOBA PONTE	425	-26,196	32,119	70	1981 - 2021	40	referência (27)
NAMAACHA CULULA MOVENE 2	890	-25,845	32,268	29	1981 - 2021	40	referência (27)
NAMAACHA MONTE MPONDUINE	924	-25,94	31,975	30	1981 - 2021	40	referência (27)
IMPAPUTO	318	-25,967	32,15	140	1981 - 2021	40	referência (27)
MONTE BOMA	948	-25,8	32,1	240	1981 - 2021	40	referência (27)
Essuatíni							
HLANE NATIONAL PARK	A1	-26,312	31,64	73,08	1981 - 2021	40	referência (27)
HLANE NATIONAL PARK 2	A2	-26,315	31,779	311,33	1981 - 2021	40	referência (27)
HLANE NATIONAL PARK 3	A3	-26,204	31,847	307,1	1981 - 2021	40	referência (27)
MLAWULA RIVER	A4	-26,216	31,969	307,1	1981 - 2021	40	Referência (27)
MAIN CAMP SHEWULA NATURE RESERV	A5	-26,143	32,042	307,1	1981 - 2021	40	referência (27)
NSINWENI	A6	-26,29	31,377	833,33	1981 - 2021	40	referência (27)
GUEBO	A7	-25,703	32,211	73,37	1981 - 2021	40	referência (27)
CROYDON	482042	-26,2	31,57	381	1981 - 2021	40	referência (27)
FORBES REEF	482159	-26,17	31,1	1420	1981 - 2021	40	referência (27)
ST JOSEPHS	482867	-26,45	31,48	572	1981 - 2021	40	referência (27)
DINEDOR	483082	-26,37	31,55	403	1981 - 2021	40	referência (27)
SWAZILAND RANCH HOMEST	483426	-26,1	31,75	250	1981 - 2021	40	referência (27)
MBULUZI FARM	11109010	-26,23	31,2	1146	1981 - 2021	40	referência (27)
VUVULANE	33309102	-26,1	31,87	293	1981 - 2021	40	referência (27)
MANANGA	33309104	-26	31,92	293	1981 - 2021	40	referência (27)
KALANGA / MPOLONJENI	33309110	-26,37	31,92	250	1981 - 2021	40	referência (27)

Anexo 2 - Dados para o cálculo do factor R

A2. 15 _ Precipitações média mensal e anual para cada estação. (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do MS Office Excel. Dados para o cálculo obtidos na referência 32)

Precipitações média mensal e anual para cada estação														
ESTAÇÃO	NÚMERO	PRECIPITAÇÃO MÉDIA MENSAL [mm]												PMA [mm]
		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGOS	SET	OUT	NOV	DEC	
BOANE PEQUENOS LIBOMBOS	1169	136,98	120,52	86,18	50,93	24,96	18,46	14,09	14,33	27,92	53,74	90,17	109,56	747,83
NAMAACHA MAILANE 2	1245	136,98	120,52	86,18	50,93	24,96	18,46	14,09	14,33	27,92	53,74	90,17	109,56	747,83
CROYDON	482042	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
FORBES REEF	482159	134,92	119,10	85,15	42,58	14,30	9,02	8,31	10,36	23,62	67,93	104,26	128,86	748,41
ST JOSEPHS	482867	132,35	114,86	86,69	42,54	15,47	10,77	8,31	13,09	26,12	71,64	108,21	127,25	757,30
DINEDOR	483082	132,35	114,86	86,69	42,54	15,47	10,77	8,31	13,09	26,12	71,64	108,21	127,25	757,30
SWAZILAND RANCH HOMEST	483426	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
MBULUZI FARM	11109010	134,92	119,10	85,15	42,58	14,30	9,02	8,31	10,36	23,62	67,93	104,26	128,86	748,41
VUVULANE	33309102	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
MANANGA	33309104	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
KALANGA OU MPOLONJENI	33309110	122,45	106,75	80,64	39,67	14,95	10,34	7,53	11,10	24,06	61,33	97,89	111,17	687,88
BOANE MASSACA 2	3	136,98	120,52	86,18	50,93	24,96	18,46	14,09	14,33	27,92	53,74	90,17	109,56	747,83
NAMAACHA GOBA FRONTEIRA	5	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
BOANE E. AGRARIA UMBELUZE	6	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
IMPAPUTO	318	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
MOAMBA / PESSENE	342	150,61	126,95	85,40	48,35	20,79	16,79	11,83	12,13	24,36	54,04	95,16	126,68	773,09
GOBA PONTE	425	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
NAMAACHA CULULA MOVENE 2	890	136,98	120,52	86,18	50,93	24,96	18,46	14,09	14,33	27,92	53,74	90,17	109,56	747,83
NAMAACHA MONTE MPONDUINE	924	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
MONTE BOMA	948	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
HLANE NATIONAL PARK	A1	141,48	123,60	94,79	55,72	28,96	19,04	15,73	16,54	32,08	61,55	100,45	116,36	806,30
HLANE NATIONAL PARK 2	A2	122,45	106,75	80,64	39,67	14,95	10,34	7,53	11,10	24,06	61,33	97,89	111,17	687,88
HLANE NATIONAL PARK 3	A3	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
MLAWULA RIVER	A4	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
MAIN CAMP SHEWULA NATURE RESERV	A5	134,02	118,07	82,96	42,97	15,35	9,48	7,94	10,49	23,35	64,08	101,06	125,71	735,50
NSINWENI	A6	132,35	114,86	86,69	42,54	15,47	10,77	8,31	13,09	26,12	71,64	108,21	127,25	757,30
GUEBO	A7	150,61	126,95	85,40	48,35	20,79	16,79	11,83	12,13	24,36	54,04	95,16	126,68	773,09

A2. 16_ Valores do Rc e EI30 para cada estação. (fonte: elaborado pelo autor com auxílio do MS Office Excel)

Valores do Rc e do EI30 para a equação 1 da tabela 2														
ESTAÇÃO	Rc													EI30
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGOS	SET	OUT	NOV	DEC	ANO	EQ 1
BOANE PEQUENOS LIBOMBOS	25,09	19,42	9,93	3,47	0,83	0,46	0,27	0,27	1,04	3,86	10,87	16,05	91,57	3132,19
NAMAACHA MAILANE 2	25,09	19,42	9,93	3,47	0,83	0,46	0,27	0,27	1,04	3,86	10,87	16,05	91,57	3132,19
CROYDON	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
FORBES REEF	24,32	18,95	9,69	2,42	0,27	0,11	0,09	0,14	0,75	6,17	14,53	22,19	99,63	3365,05
ST JOSEPHS	23,13	17,42	9,92	2,39	0,32	0,15	0,09	0,23	0,90	6,78	15,46	21,38	98,17	3323,20
DINEDOR	23,13	17,42	9,92	2,39	0,32	0,15	0,09	0,23	0,90	6,78	15,46	21,38	98,17	3323,20
SWAZILAND RANCH HOMEST	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
MBULUZI FARM	24,32	18,95	9,69	2,42	0,27	0,11	0,09	0,14	0,75	6,17	14,53	22,19	99,63	3365,05
VUVULANE	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
MANANGA	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
KALANGA OU MPOLONJENI	21,80	16,57	9,45	2,29	0,32	0,16	0,08	0,18	0,84	5,47	13,93	17,97	89,05	3058,98
BOANE MASSACA 2	25,09	19,42	9,93	3,47	0,83	0,46	0,27	0,27	1,04	3,86	10,87	16,05	91,57	3132,19
NAMAACHA GOBA FRONTEIRA	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
BOANE E. AGRARIA UMBELUZE	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
IMPAPUTO	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
MOAMBA / PESSENE	29,34	20,85	9,43	3,02	0,56	0,36	0,18	0,19	0,77	3,78	11,71	20,76	100,96	3403,25
GOBA PONTE	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
NAMAACHA CULULA MOVENE 2	25,09	19,42	9,93	3,47	0,83	0,46	0,27	0,27	1,04	3,86	10,87	16,05	91,57	3132,19
NAMAACHA MONTE MPONDUINE	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
MONTE BOMA	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
HLANE NATIONAL PARK	24,83	18,95	11,14	3,85	1,04	0,45	0,31	0,34	1,28	4,70	12,51	16,79	96,18	3265,96
HLANE NATIONAL PARK 2	21,80	16,57	9,45	2,29	0,32	0,16	0,08	0,18	0,84	5,47	13,93	17,97	89,05	3058,98
HLANE NATIONAL PARK 3	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
MLAWULA RIVER	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
MAIN CAMP SHEWULA NATURE RESERV	24,42	18,95	9,36	2,51	0,32	0,12	0,09	0,15	0,74	5,58	13,88	21,49	97,62	3307,34
NSINWENI	23,13	17,42	9,92	2,39	0,32	0,15	0,09	0,23	0,90	6,78	15,46	21,38	98,17	3323,20
GUEBO	29,34	20,85	9,43	3,02	0,56	0,36	0,18	0,19	0,77	3,78	11,71	20,76	100,96	3403,25

Anexo 3 – Descrição das classes de uso do solo

A3. 17__ Descrição das classes de uso e ocupação do solo.(fonte: elaborado pelo autor com auxílio do MS Office Word. Dados obtidos na referência 30)

Descrição das classes de uso e ocupação do solo		
Nr.	Classe	Descrição
1	Corpos de água	Áreas predominantemente cobertas de água ao longo do ano: rios, lagos, oceanos, áreas inundadas, etc.
2	Vegetação densa	Áreas com árvores com mais de 4.8m : regiões com vegetação de madeira, zonas de vegetação alta em savanas, plantações altas, pântanos ou mangais.
3	Vegetação inundada	Áreas com qualquer tipo de vegetação com óbvia inundação ao longo do ano : mangais inundados, campos de arroz e outras áreas agrícolas intensamente irrigadas.
4	Plantações	Cereais plantados, relva plantada e outras plantações de baixa estatura: milho, soja, etc.
5	área construída	Estruturas feitas pelo Homem, grandes áreas homog�neas impermeáveis, edifícios, vilas/cidades densamente povoadas, estradas pavimentadas e asfaltadas, etc.
6	Solo exposto	áreas com solo ou rocha e sem vegeta�o ou com vegeta�o muito esparsa ao longo do ano, desertos e dunas de areia, leitos secos de rios ,etc.
7	Neve/gelo	Grandes áreas homog�neas com neve permanente.
8	Vegeta�o baixa	áreas abertas cobertas por relva homog�nea, com pouca ou sem nenhuma vegeta�o alta, cereais e relva não plantada pelo Homem, zonas de pastagens, savanas, etc.