

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Centro de Engenharias**  
**Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária**



Trabalho de Conclusão de Curso

**Análise do Potencial de Perda de Solo através de Técnicas de  
Geoprocessamento no Município de São Lourenço do Sul/RS**

**Mayara Zanchin**

Pelotas, 2017

**Mayara Zanchin**

**Análise do Potencial de Perda de Solo através de Técnicas de  
Geoprocessamento no Município de São Lourenço do Sul/RS**

Trabalho de conclusão de curso  
acadêmico apresentado ao Centro de  
Engenharias, da Universidade Federal de  
Pelotas, como requisito parcial à obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia  
Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Diuliana Leandro

Coorientador: Maurízio Silveira Quadros

Pelotas, 2017

Mayara Zanchin

**Análise do Potencial de Perda de Solo através de Técnicas de  
Geoprocessamento no Município de São Lourenço do Sul/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, como requisito parcial, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária, Centro de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 11/12/2017

Banca examinadora:

.....  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Diuliana Leandro (Orientadora).  
Doutora em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná.

.....  
Prof. M<sup>a</sup>. Samanta Tolentino Cecconello.  
Mestre em Desenvolvimento Territorial e Sistemas Agroindustriais pela Universidade Federal de Pelotas.

.....  
Prof. Dr. Robson Andreazza.  
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

## Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Ivan e Ivonete, por serem minha base e me proporcionarem uma educação de qualidade e uma vida repleta de apoio, carinho e amor. Sem vocês, nada seria possível!

Agradeço a minha atual orientadora, Diuliana Leandro, por toda paciência e empenho na construção desse projeto. Por sempre ter um tempo livre para atender minhas (muitas) dúvidas e me apoiar em projetos pessoais. Tens minha total admiração e carinho.

Agradeço minha primeira orientadora na Universidade Federal de Pelotas, Isabela Fernandes Andrade. Sou eternamente grata por todos os ensinamentos repassados, oportunidades oferecidas e amizade sincera. És um exemplo a se seguir, de profissional e mulher.

Agradeço ao meu coorientador, Maurízio, pelo apoio na realização do projeto e aos professores Samanta e Robson, pela contribuição no crescimento e melhoria deste trabalho. Agradeço, também, ao José Maria Filippini Alba, do núcleo de Planejamento Ambiental da Embrapa Clima Temperado (Pelotas) por fornecer os dados necessários para realização das análises deste projeto e ter me acolhido no estágio obrigatório de forma tão calorosa.

Agradeço a todos meus familiares que, de forma positiva, vieram a somar na minha formação. Um agradecimento especial aos meus dindos Elaine e Rudimar, e aos meus primos Vinícius e Pedro, por me receberem de braços abertos em sua casa e vidas, por quatro anos incríveis. Agradeço também meus tios Romeu e Maria, primos Janaína e Juliano, e a prima de coração Tais por todo apoio e carinho ao me receberem em sua casa no estágio de verão. Amo vocês!

Agradeço a minha dinda, Ivandra, por sempre me abrigar no seu apartamento nas muitas viagens que fiz a Porto Alegre. Dinda linda, és como uma mãe de coração para mim. Te amo! Nélio, impossível deixar de te agradecer por ter batalhado ao meu lado, sempre me apoiando e acreditando no meu potencial. Te adoro muito!

Agradeço a minha sogra, Isoneida, por ter me recebido com tanto carinho em sua casa e, principalmente, em sua vida. Não tenho palavras para agradecer tamanho amor. Ao meu namorado, Matheus, agradeço todo apoio ao longo das minhas invenções e inquietações constantes, por aturar minhas neurálgicas e estar sempre disposto a me acalmar, mimar e amar. A vocês dois, minha segunda família, o meu eterno obrigada!

Por fim, agradeço aos meus amigos, aqueles de longa data e os que conheci em Pelotas. Obrigada pelos momentos bons e ruins, festas e estudos, por todo carinho e amizade sincera. Vocês têm um lugar especial no meu coração!

## Resumo

ZANCHIN, Mayara. **Análise do Potencial de Perda de Solo através de Técnicas de Geoprocessamento no Município de São Lourenço do Sul/RS.** 2017. (71) f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

A erosão é um processo natural que resulta no desgaste, transporte e deposição das partículas presentes no solo, ocasionada pelo intemperismo – conjunto de processos físicos, químicos e biológicos. Sabe-se, entretanto, que os fatores antrópicos têm acelerado a ocorrência deste processo, através do uso inadequado e sem qualquer planejamento do solo, o que acaba por retirar a estabilidade do perfil do solo e, consequentemente, acelerar seu processo erosivo. A erosão tem sido uma problemática muito estudada, entretanto seu estudo demanda tempo e é oneroso. Uma alternativa muito utilizada são os modelos matemáticos, sendo ferramentas que auxiliam na estimativa dos processos erosivos mais acentuados. A modelagem matemática RUSLE aliada aos Sistemas de Informação Geográfica, permitem uma análise espacial do terreno dinâmica e de menor custo, a qual foi utilizada no presente trabalho para estimativa de perda de solo no município de São Lourenço do Sul/RS. Foram determinados seis fatores presentes na equação RUSLE, sendo eles erosividade, erodibilidade, topografia (declive e rampa), cobertura do solo e práticas conservacionistas. Para determinação do fator cobertura do solo buscou-se auxílio na assinatura espectral da vegetação, através do índice NDVI, para posterior classificação das imagens *RapidEye* e determinação do atual uso de solo presente na área de estudo. Os resultados foram separados por fatores. O fator erosividade da chuva resultou em um índice de 6742,22 MJ.mm/ha.h.ano, apresentando alto poder erosivo. O fator erodibilidade indicou a presença de solos com índices de erodibilidade extremamente altos. O fator topográfico foi calculado em conjunto (declive e rampa) e apresentou classes de declividade variando de planas (0 a 3%) a montanhosas (45 a 75%). Por fim, fatores cobertura de solo e práticas conservacionistas também foram calculados em conjunto. A partir da classificação supervisionada do uso de solo conseguiu-se calcular os valores para os diferentes usos presentes no município. Para as práticas conservacionistas determinou-se a pior situação real, por conta da dificuldade de detalhamento nas imagens de satélite. Por fim, identificou-se que 47,22% das terras presentes na área de estudo classificam-se com grau de erosão muito forte, variando de 200 a 1000 ton/ha.ano e, 20,79% podem ser classificadas com grau de erosão extremamente forte, com índices de perda superiores a 1000 ton/ha.ano – podendo atingir valores de 2659,55 ton/ha.ano. As altas perdas podem estar associadas ao uso do solo inadequado na região, no qual se percebe alto índice de solo exposto e cultivo/pastagem, bem como a suscetibilidade natural dos solos presentes no município a erosão ao lado de uma topografia fortemente ondulada a montanhosa em algumas áreas. Conclui-se que a modelagem matemática para estimativa de perda de solo, aliada ao geoprocessamento, torna a análise rápida e menos onerosa, auxiliando na tomada de decisão para correta implantação de técnicas de manejo e práticas conservacionistas na região, visando à mitigação das perdas de solo.

Palavras-chave: Erosão do Solo; Modelagem RUSLE; Sistema de Informação Geográfica.

## Abstract

ZANCHIN, Mayara. **Analysis of Soil Loss Potential through Geoprocessing Techniques in the Municipality of São Lourenço do Sul/RS.** 2017. (71) f. Course Conclusion Paper (TCC). Graduation in Environmental and Sanitary Engineering. Federal University of Pelotas, Pelotas.

Erosion is a natural process that results in the wear, transport and deposition of the particles present in the soil, caused by weathering - a set of physical, chemical and biological processes. It is known, however, that the anthropic factors have accelerated the occurrence of this process, through the inadequate use and without any soil planning, it ends up removing the stability of the soil profile and, consequently, accelerating its erosive process. Erosion has been a very studied problem, however its study takes time and is costly. A widely used alternative is mathematical models, being tools that help in the estimation of the most severe erosive processes. The RUSLE mathematical model, coupled with the Geographic Information Systems, allows a spatial analysis of the dynamic terrain and the least cost, was used in the present work to estimate soil loss in the municipality of São Lourenço do Sul / RS. Six factors were identified in the RUSLE equation: erosivity, erodibility, topography (slope and ramp), soil cover and conservation practices. In order to determine the soil cover factor, the spectral signature of the vegetation was evaluated through the NDVI index, for later classification of the RapidEye images and determination of the current soil use present in the study area. The results were separated by factors. The rainfall erosivity factor resulted in an index of 6742.22 MJ.mm/h.ha.year, presenting high erosive power. The erodibility factor indicated the presence of soils with extremely high erodibility indexes. The topographic factor was calculated together (slope and ramp) and showed slope classes varying from flat (0 to 3%) to mountainous (45 to 75%). Finally, soil cover factors and conservation practices were also calculated together. From this supervised classification of soil use it was possible to calculate the values for the different uses present in the municipality. For the conservationist practices the worst real situation was determined, due to the difficulty of detail in the satellite images. Finally, it was identified that 47,22% of the lands present in the study area are classified with a very strong degree of erosion, varying from 200 to 1000 tons/ha.year and, 20,79% can be classified with degree of erosion, with loss rates above 1000 ton/ha.year - reaching values of 2659.55 ton/ha.year. High losses may be associated with inadequate soil use in the region, in which high soil exposure and crop / pasture rates can be perceived, as well as the natural susceptibility of the soils present in the municipality to erosion alongside a heavily undulating topography in some areas. It is concluded that the mathematical modeling for soil loss estimation, combined with geoprocessing, makes the analysis fast and less costly, aiding in the decision making for the correct implementation of management techniques and conservation practices in the region, aiming at the mitigation of soil losses.

**Keywords:** Keywords: Soil Erosion; RUSLE modeling; Geographic Information System.

## **Lista de Figuras**

Figura 1 – Área de estudo.....	23
Figura 2 – Classificação da Geomorfologia presente no município de São Lourenço do Sul .....	26
Figura 3 – Representação de imagem em composição colorida e por índices espectrais de vegetação (NDVI).....	29
Figura 4 – Classificação da erodibilidade do solo (ton.ha.h/ha.MJ.mm) .....	40
Figura 5 – Modelo de declividade para o município de São Lourenço do Sul..	41
Figura 6 – Classificação MaxVer para o município de São Lourenço do Sul ...	43
Figura 7 – Grau de Erosão (ton/ha.ano) para o município de São Lourenço do Sul .....	47
Figura 8 – Imagens <i>RapidEye</i> São Lourenço do Sul.....	68
Figura 9 – Índices Espectrais de Vegetação (NDVI) para São Lourenço do Sul .....	69

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Características do satélite <i>RapidEye</i> .....	19
Tabela 2. Bandas <i>RapidEye</i> .....	20
Tabela 3. Desastres naturais registrados em São Lourenço do Sul.....	24
Tabela 4. Classificação dos Solos proposta pela Embrapa (2013) .....	25
Tabela 5. Classes próprias e impróprias para cultivo.....	27
Tabela 6. Caracterização dos dados utilizados .....	27
Tabela 7. Cenas orbitais <i>RapidEye</i> que recobrem o município de São Lourenço do Sul .....	28
Tabela 8. Faixa de classificação do Índice Kappa.....	30
Tabela 9. Fator topográfico definido por declividade.....	34
Tabela 10. Fator de práticas do uso da terra e técnicas conservacionistas .....	35
Tabela 11. Erosividade média para uma série histórica de 20 anos .....	36
Tabela 12. Classes de interpretação para índices de erosividade .....	37
Tabela 13. Textura dos solos presentes nas formas de relevo existentes na área de estudo .....	38
Tabela 17. Fator erodibilidade (ton.ha.h/ ha.MJ.mm).....	39
Tabela 18. Classificação para erodibilidade dos solos.....	39
Tabela 19. Declividade estimada (%) de São Lourenço do Sul .....	41
Tabela 21. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224610.....	44
Tabela 22. Matriz de confusão para o município de São Lourenço.....	45
Tabela 23. Fator CP utilizado para o município de São Lourenço do Sul .....	46
Tabela 24. Classificação do Grau de Erosão para o município de São Lourenço do Sul (ton/ha.ano).....	48
Tabela 25. Valores das feições classificadas como extremamente fortes .....	49
Tabela 26. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224510.....	70
Tabela 27. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224609.....	70
Tabela 28. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224611 .....	70
Tabela 29. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224709.....	70
Tabela 30. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224710.....	71
Tabela 31. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224711 .....	71
Tabela 32. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224810.....	71

## Lista de Abreviaturas e Siglas

ANA	Agência Nacional de Águas
BR	Brasil
CEPED	Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENVI	<i>Exelis Visual Information Solutions</i>
FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler
h	Hora
ha	Hectare
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INDE	Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
KINEROS	<i>Kinematic Runoff and Erosion Model</i>
km	Quilômetros
MAXVER	Máxima Verossimilhança
MJ	Megajoule
mm	Milímetros
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MUSLE	<i>Modified Universal Soil Loss Equation</i>
NADIR	Direção vertical orientada para o centro da Terra
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
nm	Nanômetro
QGIS	<i>Quantum GIS</i>
REM	Radiação Eletromagnética
RS	Rio Grande do Sul
RUSLE	<i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>
S	Sul
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS 2000	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SR	Sensoriamento Remoto
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
ton	Toneladas
USLE	<i>Universal Soil Loss Equation</i>

UTC *Universal Coordinated Time*

UTM *Universal Transversa de Mercator*

WGS84 *World Geodetic System*

## SUMÁRIO

1 Introdução .....	13
1.1 Objetivos .....	15
1.1.1 Objetivo Geral .....	15
1.1.2 Objetivos Específicos .....	15
2 Revisão Bibliográfica .....	16
2.1 Erosão do Solo .....	16
2.2 Sensoriamento Remoto .....	17
2.3 Imagens <i>RapidEye</i> .....	19
2.4 Modelagens para Erosão de Solo através de Geoprocessamento .....	20
3 Metodologia .....	23
3.1 Caracterização da Área de Estudo .....	23
3.1.1 Classificação dos Solos da área de estudo .....	24
3.2 Caracterização de Escalas, Programas Utilizados e Fonte de Dados .....	27
3.3 Classificação de Imagens .....	28
3.4 Obtenção da RUSLE .....	31
3.4.1. Fator de Erosividade (R) .....	32
3.4.2 Fator Erodibilidade do Solo (K) .....	33
3.4.3 Fator Topográfico (LS) .....	33
3.4.4 Fator Cobertura do Solo (C) e Práticas Conservacionistas (P) .....	34
4 Resultados e Discussão .....	36
4.1 Fator de Erosividade (R) .....	36
4.2 Fator Erodibilidade do Solo (K) .....	37
4.3 Fator Topográfico (LS) .....	40
4.4 Fator de Cobertura do Solo (C) e Práticas Conservacionistas (P) .....	42
4.5 Perda de Solo no Município de São Lourenço do Sul .....	46
5 Conclusão .....	51
Referências .....	53
Anexos .....	64

## 1 Introdução

A erosão é um processo natural que faz parte da modificação do relevo do planeta e consiste, basicamente, de três etapas: desagregação do solo, transporte de partículas desagregadas e depósito de partículas nas áreas mais baixas (MELO et al., 2008).

Entretanto, a erosão tem aumentado devido ao crescimento demográfico desordenado, que resulta em uma utilização dos recursos naturais de forma errônea e irracional esgotando-os. O crescimento populacional demanda maior quantidade de alimentos, promove exploração de áreas inapropriadas e amplia a pressão de uso sobre terras. Muitas vezes, o maior impacto gerado por estas ocupações irregulares está relacionado ao desaparecimento das matas ciliares que circundam os cursos hídricos, bem como o desrespeito frente às áreas de preservação permanente, onde as construções (ou atividades) antrópicas distanciam-se poucos (ou nenhum) metros da água (COSTA et al., 2013).

A diminuição da capacidade produtiva e fertilidade de um solo é uma consequência direta da ação antrópica sobre os mesmos, causando assim, danos irreversíveis ao ambiente e reduzindo proporcionalmente a produtividade das culturas ali plantadas. A modificação da qualidade do solo está intimamente ligada às alterações no entorno da paisagem e, consequentemente, a qualidade da água dos cursos hídricos que recebem os sedimentos dos solos desestruturados. Segundo Costa et al. (2013) as erosões urbanas têm se tornado um dos problemas socioambientais mais estudados pelos cientistas de todas as áreas do conhecimento.

Percebe-se, porém, uma crescente busca para o controle e o não surgimento de novos focos de erosão. Contudo, o estudo da erosão do solo é geralmente dispendioso e demanda tempo, por isso, a utilização de ferramentais que permitam estimar as perdas de solo vem sendo cada vez mais usadas para esse propósito (MIGUEL, 2010). As estimativas da perda de solo podem ser realizadas por meio de diversos modelos que permitem identificar processos erosivos mais acentuados, favorecendo a tomada de decisão e facilitando o planejamento da rede de monitoramento hidrossedimentológico (SANTOS et al., 2001).

Os primeiros modelos matemáticos para estimativa de perda de solo foram propostos por Wischmeier e Smith (1978), através do desenvolvimento da “*Universal Soil Loss Equation*” (USLE). Posteriormente, foi adaptada e criada a “*Revised Universal Soil Loss Equation*” (RUSLE), modelo empírico que calcula valores para estimar erosão do solo (FIORIO et al., 2016). Conforme citado por Yue-Qing et al. (2008) o modelo RUSLE, integrado a Sistemas de Informação Geográfica (SIG), tem sido o modelo empírico para predição do solo mais amplamente utilizado, representando a heterogeneidade espacial da erosão do solo a partir de dados simplificados.

A integração dos SIGs com modelos matemáticos de estimativa de perdas de solo por erosão vem sendo aplicada com eficiência no planejamento agroambiental de bacias, principalmente no diagnóstico do risco de erosão (LELIS, 2011). Os SIGs permitem analisar e apontar áreas de maior vulnerabilidade a erosão em uma bacia hidrográfica, bem como uma região, de maneira rápida e dinâmica, minimizando custos e tempo (SILVA e MARCOLA, 2011). Com as técnicas de SIG é possível ter uma análise rápida, econômica e eficiente dos dados obtidos. Nesse contexto, para as estimativas espacializadas dos parâmetros das equações de perda de solo faz-se necessária a utilização de produtos da geotecnologia (LELIS, 2011).

Por meio deste trabalho, espera-se estimar a perda de solo através do modelo RUSLE, associado a técnicas de classificação das imagens da área de estudo pelo programa de sensoriamento remoto ENVI, na região de São Lourenço do Sul, no estado do Rio Grande do Sul.

## **1.1 Objetivos**

Os objetivos deste trabalho estão, de maneira geral e específica, descritos a seguir:

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Estimar a perda de solo no município de São Lourenço do Sul através de modelagem RUSLE com o auxílio de técnicas do geoprocessamento.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Classificar o uso atual do solo no município de São Lourenço do Sul, através de imagens de Sensoriamento Remoto do período de 2014/2015;
- Adequar os estimadores necessários para o cálculo da RUSLE;
- Utilizar a RUSLE como apporte para mensuração da quantidade de material erodido no município de São Lourenço do Sul, RS.

## 2 Revisão Bibliográfica

Para um melhor entendimento da aplicação do modelo matemático em conjunto com as técnicas de geoprocessamento é importante conhecer todos os processos envolvidos na análise ambiental.

### 2.1 Erosão do Solo

A erosão natural, de acordo com Simões e Coiado (2003), é um conjunto de processos, onde o material terroso ou rochoso é desgastado, desagregado e removido de algum lugar da superfície da terra, consequentemente, alterando-a localmente com diferentes taxas de mudanças. Costa (2003) acrescenta que o processo erosivo vem da ação do desgaste do solo pelo transporte dos seus constituintes efetuado por agentes geológicos como a água (erosão hídrica), o vento (erosão eólica), gelo e gravidade.

O processo de erosão hídrica compreende três fases básicas que podem ocorrer de forma individual ou conjuntamente, sendo elas desagregação, transporte e deposição de partículas de solo, ocasionadas pelo impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo e pelo escoamento superficial da água da chuva (HUDSON, 1981).

O solo é considerado um componente vital para os ecossistemas, no qual ocorrem os processos e ciclos de transformações físicas, biológicas e químicas e que, quando mal manejado, pode degradar toda a harmonia ecossistêmica (STRECK et al., 2008). Isso ocorre quando a erosão passa a ser acelerada, ou seja, ocorrendo como uma consequência da ação do homem sobre o solo (BRAGA, 2005).

Para Wilkinson (2005) os seres humanos são os principais agentes causadores da erosão e isso pode resultar em impactos ambientais diversos, além da perda de terras agricultáveis. O uso inadequado e contínuo dos solos agrícolas causa a perda gradual da sua capacidade produtiva e a contaminação dos recursos hídricos por sedimentos e poluentes de origem difusa. A ação antrópica, por meio da utilização de práticas que destroem o equilíbrio das condições naturais, acelera esse processo de maneira intensa (LELIS, 2011).

Dentro deste contexto, Amore et. al. (2004) argumenta que a erosão do solo pode se tornar exagerada no futuro, em muitas partes do mundo, em decorrência das mudanças climáticas, do aumento da população e da intensificação dos processos relacionados ao ciclo hidrológico. De acordo com Amorim (2000) o processo erosivo constitui-se na principal causa da degradação dos solos, trazendo prejuízos ao setor agrícola e ao meio ambiente, com reflexos econômicos e sociais. Tendo como agravante os efeitos das mudanças ambientais globais, uma das incertezas críticas para os próximos anos refere-se às alterações que poderão ocorrer nos processos erosivos.

Tais processos representam um problema, não somente pela perda de solo como meio de suporte às atividades agrícolas, mas também por trazerem consequências negativas relacionadas ao assoreamento e contaminação dos cursos de água em nível local ou mesmo em grandes áreas (LELIS, 2011). Além disso, o desmatamento e a erosão dos solos podem provocar o desaparecimento de mananciais, bem como acentuar os efeitos das inundações. A erosão dos solos causa uma gama de efeitos negativos, desde a própria degradação do solo, passando por problemas ambientais de uma forma geral, em que se verificam sérios impactos no ciclo hidrológico e hidrossedimentológico em bacias (TUCCI, 1998).

As estimativas da perda de solo podem ser realizadas por meio de diversos modelos que permitem identificar processos erosivos mais acentuados, favorecendo a tomada de decisão e facilitando o planejamento da rede de monitoramento sedimentológico (SANTOS et al., 2001). Aliado a estes modelos, tem-se o auxílio dos softwares relacionados ao geoprocessamento, proporcionando maior agilidade e precisão no estudo das áreas problemáticas.

## 2.2 Sensoriamento Remoto

O geoprocessamento pode ser definido como sendo o conjunto de tecnologias destinadas à coleta e tratamento de informações espaciais, assim como o desenvolvimento de novos sistemas e aplicações, com diferentes níveis de sofisticação (ROSA, 2013). Dentro do geoprocessamento encontram-se os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Cartografia Digital,

Sensoriamento Remoto (SR), Sistema de Posicionamento Global (GPS) e a Topografia (ROSA; BRITO, 1996; ROSA, 2005; SOUZA, 2017).

A união do Sensoriamento Remoto (SR) aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tem sido amplamente utilizada e ajuda a realizar um tratamento ou processamento digital preciso das imagens (SOUZA, 2017). Da tradução do termo “Remote Sensing”, segundo Jacintho (2003), surgiu o termo Sensoriamento Remoto, sendo pequenas as variâncias de definição encontradas na literatura. Pode ser considerado como uma atividade que auxilia na obtenção de informações da superfície terrestre sem a necessidade de contato direto (MORAIS, 2002; PENONI et al., 2017).

Essa tecnologia, conforme De Lima et al., (2017), utiliza sensores na obtenção de imagens e outros dados através da captação e registro da energia refletida ou emitida pela superfície da Terra. Para que ocorra a obtenção de dados, o alvo que está na superfície terrestre precisa captar e refletir a energia eletromagnética, proveniente do Sol, para que ocorra uma interação entre alvo e sensor (SANTOS, 2017).

Pode ocorrer a reflexão, absorção ou transmissão de energia radiante (em objetos com transparência) quando há interação da radiação com um objeto. Em geral, a parte absorvida é transformada em calor ou em algum outro tipo de energia e a parte refletida se espalha pelo espaço. A refletância, absorância e transmitância costumam ser expressas em percentagem ou por um número entre 0 e 1 (MOREIRA, 2001). Caria de Moraes (2002) exemplifica que os objetos interagem de maneira diferenciada espectralmente, pois apresentam diferentes propriedades físico-químicas e biológicas. Estas diferentes interações é que possibilitam a distinção e o reconhecimento dos diversos objetos terrestres imageados remotamente, conhecida como assinatura espectral, devido à variação da porcentagem de energia refletida em cada comprimento de onda.

Já os Sistemas de Informação Geográfica podem ser definidos como sistemas destinados à aquisição, armazenamento, manipulação, análise, simulação, modelagem e apresentação de dados referidos espacialmente, ou seja, através de suas coordenadas geográficas na superfície terrestre, integrando diversas tecnologias (INPE, 2011). Os quais surgiram em meados

da década de 60, e de acordo com Rosa (2013), têm automatizado tarefas até então realizadas manualmente e facilitado a realização de análises complexas, através da integração de dados de diversas fontes.

### 2.3 Imagens *RapidEye*

A empresa alemã *RapidEye* AG lançou, em 2008, um conjunto de cinco satélites – INPE, 2008 – com sensores capazes de adquirir imagens coloridas com resolução espacial de cinco metros. Devido ao número de satélites, a quantidade de imagens existentes em acervo e a capacidade de aquisição de imagens mediante programação dos satélites, tornam o *RapidEye* a melhor alternativa para aplicações com demandas de imagens de média resolução (RAPIDEYE, 2012).

O sistema é capaz de produzir imagens de qualquer ponto do globo, todos os dias, e permite assumir uma postura proativa ao capturar imagens de regiões relevantes e torná-las disponíveis mais rapidamente e com maior eficácia (FELIX, 2009). A Tabela 1 mostra as características dos satélites *RapidEye*.

Tabela 1. Características do satélite *RapidEye*

Características	Informações
Número de Satélites	5
Órbita	Heliosíncrona com 630 km de altitude
Hora de Passagem no Equador	11:00 h (aproximadamente)
Velocidade	27.000 km/h
Tamanho da Imagem	Aproximadamente 77 km de largura com comprimento entre 50 e 300 km
Tempo de Revisão	Diariamente fora do nadir / 5,5 dias (no nadir)
Datum Horizontal	WGS84
Tipo do Sensor	Imageador multiespectral <i>pushbroom</i>
Bandas Espectrais	Azul, Verde, Vermelho, <i>Red-Edge</i> , Infravermelho Próximo
Tamanho do Pixel (ortorretificada)	5,0 metros
Expectativa de tempo de vida do satélite	7 anos <sup>1</sup>

Fonte: Adaptada de *RapidEye* (2012)

As imagens *RapidEye* possuem cinco bandas distintas, conforme Tabela 2, o que de acordo com Felix (2009) é o primeiro sistema orbital a incluir a banda *Red-Edge*, específica para o monitoramento da atividade fotossintética

<sup>1</sup> Mesmo com expectativa do tempo de vida útil em 7 anos, o satélite estava em operação até a finalização do projeto.

da vegetação, que mede variações nos tons, permitindo a separação de espécies e monitoramento da saúde da vegetação.

Tabela 2. Bandas *RapidEye*

<b><i>Bandas espectrais dos satélites do sistema RapidEye.</i></b>		
440 – 510 µm	Azul	Banda 1
520 – 590 µm	Verde	Banda 2
630 – 685 µm	Vermelho	Banda 3
690 – 730 µm	<i>Red-Edge</i>	Banda 4
760 – 850 µm	Infravermelho próximo	Banda 5

Fonte: Adaptado de Li et. al. (2017).

Assim, podem atender uma escala de dados segundo Antunes et. al. (2013) compatíveis com a classe A na escala de 1/20.000 conforme as regras adotadas pela Comissão Nacional de Cartografia.

## 2.4 Modelagens para Erosão de Solo através de Geoprocessamento

Com a finalidade de equacionar os problemas ambientais causados pela erosão, surgiram diferentes modelos matemáticos, para a compreensão e controle desse processo (PAIVA, 2003). Estes modelos são subdivididos em modelos empíricos e conceituais. Os primeiros, mais comuns, são baseados puramente na experimentação, através de métodos estatísticos. Já, os segundos descrevem matematicamente as características estruturais, bem como os processos que interferem na erosão (CECATTO, 2014). Neste trabalho, apenas os modelos empíricos foram utilizados, pois apresentam maior objetividade e praticidade na obtenção de resultados.

O surgimento dos modelos empíricos para estimar as perdas de solo por erosão ocorreu nos Estados Unidos, com a publicação do trabalho de Wischmeier e Smith (1978) intitulada *Universal Soil Loss Equation* (USLE), que relacionava a taxa de perda de solo ao grau e comprimento do declive (PAIVA, 2003). A partir deste modelo, o estudo dessas equações aumentou gradativamente.

Dentre os modelos que surgiram após a USLE, têm-se dentre os mais amplamente utilizados, a *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE), a *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE), *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) e o *Kinematic Runoff and Erosion Model* (KINEROS). De acordo

com Gomide (2012), os modelos que foram ramificados do USLE são o MUSLE e RUSLE, apenas.

A USLE modela a perda de solo média para longos períodos que ocorrem a partir da erosão laminar e também por sulcos; desprezando voçorocas, além da deposição e produção de sedimentos por erosão das margens e fundo do canal (WISCHMEIER e SMITH, 1978). Segundo Silva et. al. (2007), dentre as muitas equações que se propõem quantificar a ação dos principais fatores que influenciam nas perdas de solo, a USLE é a que aborda o assunto de forma mais dinâmica, uma vez que supera parcialmente restrições climáticas e geográficas, além de possuir aplicação generalizada.

A equação possibilita predizer a perda média anual de solo por erosão hídrica, com base em seis fatores locais que influenciam a erosão. A multiplicação destes fatores, obtidos isoladamente, fornece o valor quantitativo da erosão estimada (CECATTO, 2014). São eles erodibilidade e erosividade do solo, declive do terreno, rampa de inclinação, cobertura do solo e práticas conservacionistas.

Conforme citado por Cecatto (2014), a USLE sofreu com o passar dos anos algumas alterações onde, na década de 1990, foi substituída pela “Equação Universal de Perda de Solo Revisada” (RUSLE). Na RUSLE manteve-se a mesma estrutura da equação da USLE, no entanto, as formas de determinação dos fatores mudaram expressivamente, apresentando um algoritmo computacional para calcular ou estimar todos estes fatores. Nela, também, o fator de práticas conservacionistas (P) foi expandido para considerar as condições de pastagens, plantio em contorno, plantio em faixa e terraceamento (GALDINO e WEILL, 2011). Outro diferencial, conforme Da Silva (2008) é a união dos fatores topográficos e de cobertura do solo, que eram tabulados e calculados separadamente na USLE.

É muito comum encontrar a aplicação do modelo RUSLE associado a um SIG. Isso ocorre, principalmente, em função da sua possibilidade de trabalhar com interface algorítmica (Gomide, 2012) além de potencializar o desempenho de imagens orbitais para a discriminação de classes e acompanhamento de modificações de uso do solo (DA SILVA, 2008).

Posto isso, a utilização conjunta da RUSLE com um Sistema de Informação Geográfica foi a escolha para este trabalho, pois além de ser uma equação contextualizada, consoante Uhde et. al. (2009), permite dividir espacialmente os fatores que determinam a perda de solo e, consequentemente, diminuir a complexidade espacial destes fatores na realização do cálculo da RUSLE.

### 3 Metodologia

A aplicação dos modelos para previsão da perda de solo depende da obtenção de parâmetros ou dados relativos às características de clima, solo, topografia e manejo das culturas do local a ser estudado. Nesta seção, são descritas as características da área de estudo e extenuados os processos para quantificação da perda de solo.

#### 3.1 Caracterização da Área de Estudo

O município de São Lourenço do Sul situa-se a uma distância aproximada de 195 km da capital do estado, Porto Alegre, e 70 km do município de Pelotas. Os principais acessos viários para o município podem ser feitos pelas BR-116 e RS-265. Segundo dados do IBGE (2010) a área total do município é de, aproximadamente, 2036 km<sup>2</sup> e possui uma população de 43.111 mil habitantes. A área de estudo segue identificada na Figura 1.

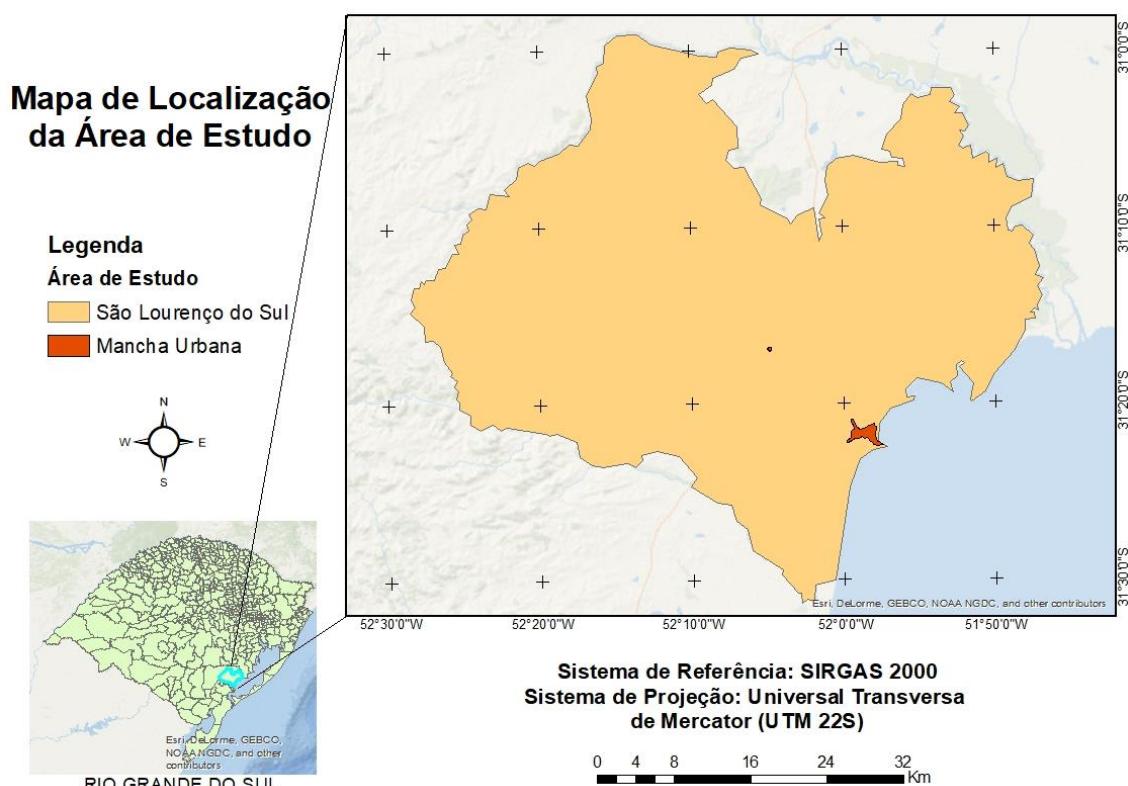


Figura 1 – Área de estudo.  
Fonte: Zanchin, M (2017)

O município já sofreu uma série de eventos de desastres, tais como enxurradas, inundações e alagamentos desde o ano de 1932 (CEPED/RS, 2015), segundo dados disponibilizados pela Coordenadoria Municipal de Defesa Civil de São Lourenço do Sul. Conforme a Tabela 3, foram 14 registros de desastres naturais.

Tabela 3. Desastres naturais registrados em São Lourenço do Sul

Ano	Ocorrência	Observação
1932	Inundação	
1937	Inundação	
1941	Inundação	
1954	Inundação	50 famílias desabrigadas
1977	Inundação	300 pessoas desabrigadas
1984	Inundação	
1986	Inundação	800 pessoas desabrigadas
1995	Inundação	Decreto Situação de Emergência ou Estado de Calamidade Pública
Abril/1998	Inundação	
Maio/1998	Inundação	
Junho/1998	Inundação	
2009	Inundação	Danos em várias vias e pontes. 13.210 pessoas atingidas.
2011	Enxurrada	20.000 pessoas atingidas. 7 mortes. Decreto de Situação de Emergência ou Estado de Calamidade Pública
2013	Alagamento	

Fonte: CEPED/RS (2015)

Um dos fatores diretamente correlacionados a esses eventos extremos, conforme citado por Falcão et al. (2013), é o uso excessivo e sem planejamento do solo – seja relacionado a áreas agrícolas ou a instalações irregulares por parte da população nas margens de cursos hídricos – gerando degradação dos recursos naturais existentes e, consequentemente, problemas ambientais associados, contribuindo para erosão local do solo.

### 3.1.1 Classificação dos solos da área de estudo

Para melhor compreendermos os diferentes tipos de solos do município de São Lourenço do Sul, necessita-se descrever suas classificações conforme proposto pela Embrapa (2013), expressas na Tabela 4.

Tabela 4. Classificação dos Solos proposta pela Embrapa (2013)

Relevo	Classificação do Solo
Planalto de Serra	Argissolo acinzentado distrófico + Argissolo vermelho-amarelo eutrófico
Escarpa de Serra	Cambissolo háplico + Argissolo amarelo distrófico
Serra Não Rochosa	Argissolo acinzentado eutrófico
Colina Interserrana	Argissolo acinzentado eutrófico + Neossolo regolítico eutrófico
Coxilha	Argissolo vermelho distrófico + Gleissolo melânicas
Colina	Argissolo amarelo distrófico
Planície Lombada	Planossolo háplico eutrófico
Planície Alta	Planossolo háplico eutrófico + Gleissolo háplico
Planície Média	Gleissolo melânicas Tb eutrófico + Planossolo háplico eutrófico
Planície Baixa Aluvial	Neossolo flúvico eutrófico
Planície Baixa Lagunar (Duna)	Planossolo háplico eutrófico
Planície Baixa Lagunar (Banhado)	Gleissolo melânicas
Planície Baixa Lagunar (Traço de praia)	Neossolo flúvico

Fonte: Embrapa (2013)

Observa-se que os solos presentes no município de São Lourenço do Sul, em sua maioria, podem ser divididos em decorrência da forma de relevo existente. Onde se apresentam as maiores altitudes, referentes aos relevos de serra e colinas, predominam os argissolos que apresentam textura argilosa abaixo do horizonte A, sendo este geralmente arenoso. Podem ser distróficos, possuindo maior suscetibilidade a erosão, ou eutróficos, onde essa suscetibilidade torna-se reduzida por se apresentarem mais porosos (DA CUNHA et al., 2006).

Nas formas de relevo denominadas planícies predominam os planossolos, neossolos e gleissolos. Os planossolos apresentam segundo Da Cunha et al. (2006), processo de desargilização (perda de argila), sendo responsável pela predominância da textura arenosa no horizonte A destes solos. Possuem, conforme Almeida et al. (2011) permeabilidade lenta, por conta do adensamento (acúmulo nas camadas inferiores) de argila e, consequentemente, são solos suscetíveis a erosão.

Neossolos flúvicos são formados por sobreposição de camadas de sedimentos aluviais, apresentam baixa fertilidade natural, risco de inundação, além de suscetíveis a erosão (DA SILVA, NETO; 2011). Os gleissolos são solos com horizonte superficial de coloração acinzentada até preta, hidromórficos (condições naturais de saturação por água) e com lençol freático

elevado. Os gleissolos melânicos eutróficos possuem alta fertilidade e, pela proximidade a cursos hídricos tem suas áreas indicadas para preservação da mata ciliar (DOS SANTOS; ZARONI, 2011).

A Figura 2 determina a localização dos relevos presentes na área de estudo.

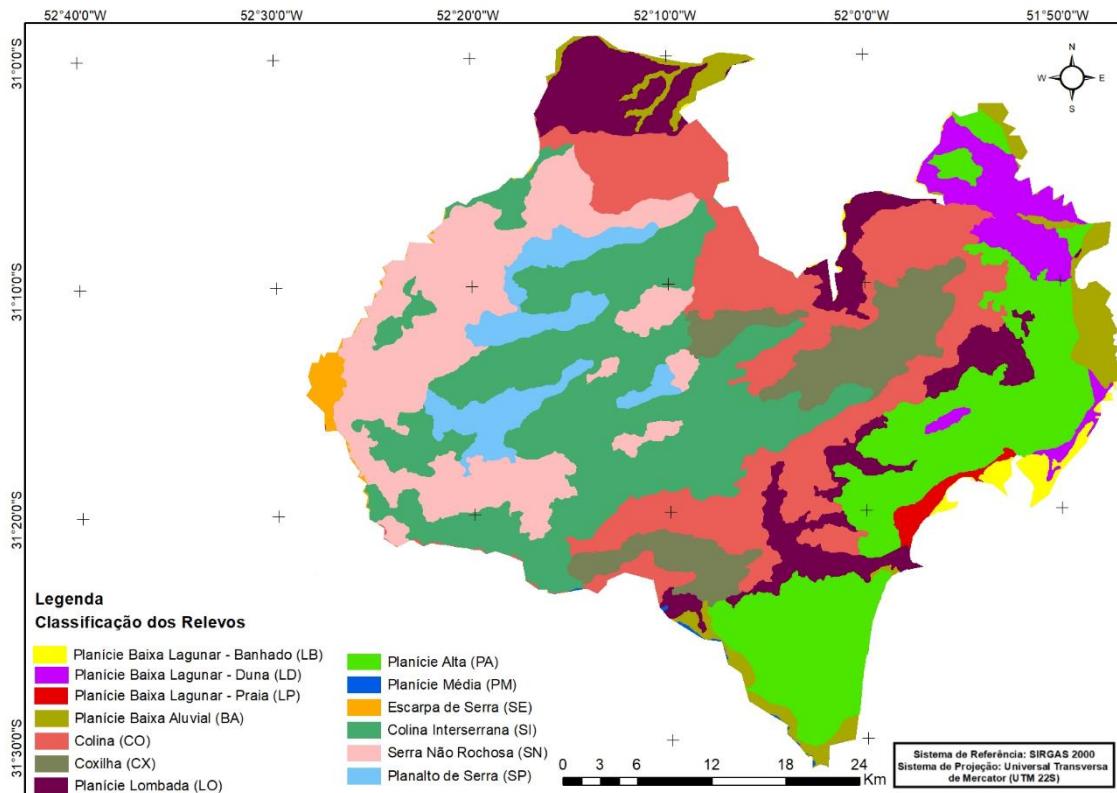


Figura 2 – Classificação da Geomorfologia presente no município de São Lourenço do Sul  
Fonte: Zanchin (2017)

Atrelado a classificação dos solos presentes no município de São Lourenço do Sul, Da Cunha et al. (2006)<sup>2</sup> também propôs uma classificação para áreas próprias e impróprias para cultivo na região, totalizando oito classes diferentes, conforme Tabela 5.

<sup>2</sup> Apesar de existirem classificações mais atualizadas para uso e cobertura da terra, como a proposta pelo IBGE (2011), esta não possui uma escala tão precisa quanto a proposta por Da Cunha et al., (2006) em parceria com a Embrapa (2013).

Tabela 5. Classes próprias e impróprias para cultivo

Classes	Características	Relevo correspondente
IIIsd	Solo profundo e úmido (permite cultivo)	Planície Lombada
IIIIsd	Solo raso argiloso (permite cultivo)	Planície Alta e Média
IIIse	Solo profundo argiloso (permite cultivo)	Colina Interserrana
IVse	Solo pouco profundo com susceptibilidade moderada de erosão (permite cultivo moderado)	Serra não rochosa e Coxilha
Vd	Solos aluviais inundados (não permite cultivo)	Planície Baixa Aluvial
VIse	Solos rasos com susceptibilidade moderada de erosão (não permite cultivo)	Planalto de Serra e Colina
VIIse	Solos rasos com susceptibilidade muito forte de erosão (não permite cultivo)	Escarpa de Serra
VIIsc	Solo arenoso com forte falta de água (não permite cultivo)	Planície Baixa Lagunar (Duna e Traço de Praia)
VIIIsd	Solos inundados com limitação muito forte de drenagem e mecanização (não permite cultivo)	Planície Baixa Lagunar (Banhado)

Fonte: Elaborado por Da Cunha et al. (2006) e disponibilizado pela Embrapa (2013)

Conforme a original classificação do uso da terra na área de estudo, percebe-se que das Classes I a IV não existem limitações da capacidade de uso do solo, entretanto das Classes V a VIII não se permite o uso na área agrícola, por apresentar características desfavoráveis como solos rasos, déficit hídrico e suscetibilidade a erosão.

### 3.2 Caracterização de escalas, programas utilizados e fonte de dados

Os arquivos digitais para uso em SIG foram retirados da base cartográfica digital da ANA – Agência Nacional de Águas (2010), da FEPAM (2005) e da Embrapa (2013) e seguem indicados na Tabela 6.

Tabela 6. Caracterização dos dados utilizados

Dados utilizados	Escala	Fonte
Pedologia	1:50000	Embrapa
Geologia	1:250000	Embrapa
Mancha Urbana	1:250000	FEPAM
Topografia	1:50000	Embrapa
Pluviométricos	-	ANA

Fonte: Zanchin (2017)

Os dados fornecidos pela Embrapa (2013) para solos foram gerados por Da Cunha et al. (2006), publicados no documento Solos e Terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e Planícies Costeiras, no mesmo ano. Posteriormente, estes dados foram transpostos no formato de livro por Flores et al. (2009).

As imagens *RapidEye* foram obtidas através do Geo Catalogo do Ministério do Meio Ambiente (MMA) e são de uso exclusivo para instituições públicas. O conjunto de cenas orbitais utilizadas para compor o município de

São Lourenço do Sul datam do período de 2014/2015, estão na escala 1:25000 e seguem identificadas na Tabela 7. Estas possuem todos os direitos reservados, conforme anexo A.

Tabela 7. Cenas orbitais RapidEye que recobrem o município de São Lourenço do Sul

<b>Sensor</b>	<b>Nome da Imagem</b>	<b>Data da Imagem</b>
RapidEye	Órbita 2224510	09/11/2014
RapidEye	Órbita 2224609	22/10/2014
RapidEye	Órbita 2224610	05/01/2014
RapidEye	Órbita 2224611	29/08/2014
RapidEye	Órbita 2224709	05/07/2015
RapidEye	Órbita 2224710	29/11/2014
RapidEye	Órbita 2224711	09/11/2014
RapidEye	Órbita 2224810	28/09/2014

Fonte: Geo Catálogo (MMA)

Todos os temas disponibilizados estão apresentados na extensão Shapefile e, indiferente do sistema de referência inicial, todos os dados foram alocados no banco de dados em um sistema de referência único, Datum SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – 2000), projetados em UTM (Universal Transversa de Mercator) no fuso 22 S.

Os softwares utilizados para o tratamento dos dados e modelagem foram: QGIS versão 2.18.10 – Las Palmas, software livre com código aberto; e o ENVI – 4.7. Utilizou-se, também, o software ArcGis versão 10.2.2 (concedido pela Embrapa Clima Temperado) para confecção dos mapas temáticos presentes no trabalho.

### 3.3 Classificação de Imagens

No presente trabalho, para realizar a classificação das imagens *RapidEye* no programa ENVI, buscou-se o auxílio da assinatura espectral da vegetação, pois a cobertura de vegetação, de acordo com Karaburun (2010), é o indicador biofísico mais importante para a erosão do solo. E o mesmo autor, ainda cita que a cobertura vegetal pode ser estimada usando índices de vegetação derivados de imagens de satélite.

Para tanto, utilizou-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada ou NDVI (sigla de *Normalized Difference Vegetation Index*), uma vez que este permite discriminar assinaturas espectrais com base nas mudanças do bioma (SMIT, 2014). O NDVI é um elemento importante para o estudo de mudanças

climáticas, utilizando a vegetação como índice de cálculo, atribuindo à área estudada um determinado valor que dependerá do estado em que se encontra essa vegetação (LOPES et al., 2010).

Para imagens *RapidEye*, as bandas 3 (vermelho) e 4 (infravermelho próximo) atuam nas faixas de 630 a 690 nm para a vermelha e de 760 a 880 nm para a infravermelha. A medição é feita através da Equação 1 (DEERING et al., 1975; FERREIRA; MAGALHÃES, 2015; GAMARRA et al., 2016).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$$

Onde:

*NIR*: resposta espectral do pixel na banda do infravermelho próximo

*RED*: resposta espectral do pixel na banda do visível (vermelho)

O cálculo resulta em um índice que varia entre -1 e 1. Na prática, o índice representa a presença de vegetação onde, quanto maior seu valor, maior será a quantidade vegetativa do local (sendo assim, maior será a refletância e mais próxima da cor branca a imagem). Valores negativos ou próximos a zero indicam áreas de água, ou solo nu, onde existe pouca atividade clorofílica e, consequentemente, baixa quantidade de vegetação (GURGEL, 2003), logo, mais escura a representação na imagem.

A Figura 3 representa os mapas gerados para a bacia experimental do Córrego Sarandi, Planaltina (DF) em composição colorida e por Índices Espectrais de Vegetação - NDVI, no ano de 2014.

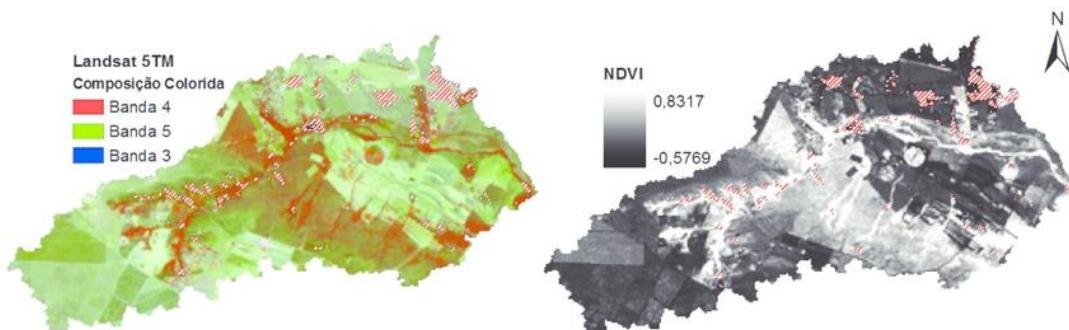


Figura 3 – Representação de imagem em composição colorida e por índices espectrais de vegetação (NDVI)  
Fonte: Santos et al., 2014.

Para a posterior classificação de imagens no programa ENVI, relacionadas a temática uso x cobertura do solo, optou-se pela classificação digital supervisionada pelo método de máxima verossimilhança (MaxVer) – escolhida por ser a mais utilizada em objetos de estudo para classificação – obtida em função do conhecimento prévio de padrões espectrais das áreas amostrais (FARIA; FILHO, 2013; MENESES; ALMEIDA, 2012). Isso permitiu a seleção de áreas confiáveis, de forma manual, definindo-se que o algoritmo classificador operasse com base na probabilidade de um dado pixel pertencer a uma classe específica (INPE, 2008), realizada em função dos cinco temas de interesse.

Sendo assim, nas imagens *RapidEye* disponíveis, foram definidas as seguintes classes: (a) água, (b) ocupação urbana, (c) vegetação, (d) cultivos/pastagem; e (e) solo exposto. Cada classe necessitou de 20 amostras de classificação, ao longo de toda imagem, e 5 amostras para verificação (tidas como reais). Logo, como são cinco classes, foram 100 amostras de classificação e 25 amostras de verificação.

Cabe destacar que a qualidade das classificações realizadas é definida pela matriz de confusão, ou matriz de erros, que é obtida após a comparação dos pontos de verificação com os referentes a classificação supervisionada. Sendo assim, a partir do cruzamento destas informações pode-se calcular a exatidão global e o índice Kappa (HENTZ et al., 2015).

Busca-se que, os valores obtidos na exatidão global sejam altos, pois a quantidade de pixels classificados corretamente está diretamente relacionada ao seu valor, sendo assim, quanto maior o valor da exatidão global, maior o índice de acurácia da análise (CECCONELLO, 2017; HENTZ et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2016). Em relação ao índice Kappa, proposto por Landis e Koch (1977), este varia de 0 a 1 e segue expresso conforme a Tabela 8.

Tabela 8. Faixa de classificação do Índice Kappa

Coeficiente Kappa	Classificação
< 0,00	Ruim
0,00 – 0,20	Fraco
0,21 – 0,40	Razoável
0,41 – 0,60	Boa
0,61 – 0,80	Muito Boa
0,81 – 1,00	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977)

De acordo com Landis e Koch (1977) o coeficiente Kappa igual ou inferior a zero determina uma classificação como ruim, devendo esta ser refeita. Já, índices próximos a um, identificam uma classificação como excelente, com dados estimados de forma precisa, que representam a verdade de campo.

Sendo assim, todos os dados são fornecidos pelo *software* ENVI, como a matriz de confusão, a exatidão global e o índice Kappa. Após verificação dos dados gerados, por parte do analista, apenas a classificação que não se apresentar adequada deverá ter suas amostras de treinamento revisadas, e sua classificação refeita (CARDOSO; CENTENO, 2015; CECCONELLO, 2017).

### 3.4 Obtenção da RUSLE

O modelo RUSLE foi desenvolvido, segundo Mays (2001), prevendo uma média de perda de solo, para o controle da erosão em áreas de plantações, mas nos últimos anos tem sido utilizado também para estudos de bacias hidrográficas e áreas de floresta. Sua fórmula está descrita pela Equação 2.

$$A = R \times K \times LS \times CP \quad (2)$$

Onde,

A – Erosão hídrica, ou seja, perda de solo por unidade de área ou de tempo (ton/ha.ano);

R – Erosividade de chuva combinada com o escoamento superficial (MJ.mm/ha.h.ano);

K – Susceptibilidade natural do solo à erosão (ton.ha.h/ha.MJ.mm);

LS – Associação entre comprimento de rampa (L) e percentual de declividade (S) e

CP – Associação da cobertura do solo (C) com as práticas conservacionistas (P).

Segundo Tomaz (2008), para utilização no RUSLE é necessário um mínimo de 20 anos de dados pluviométricos, e não uma única tormenta, para análise precisa da perda de solo na área de estudo.

### 3.4.1. Fator de Erosividade (R)

O fator de erosividade da chuva (R) é um índice que representa o potencial de chuva e enxurrada para provocar erosão em uma área sem proteção. A perda de solo provocada por chuvas numa área cultivada é diretamente proporcional ao produto da energia cinética da chuva pela sua intensidade máxima em 30 minutos (I30). Entretanto, esse dado é complexo de se obter e optou-se por calcular o fator erosividade por valores de precipitação.

A Equação 3, desenvolvida por Bertoni e Lombardi Neto (2008), permite calcular o valor do fator através dos dados de estações pluviométricas existentes na região de estudo. A média dos valores anuais do índice de erosão (EI) de um longo período de tempo (mínimo de vinte anos) é o valor do fator de erosividade da chuva (TOMAZ, 2008).

$$(EI) = 67,355 \times \left( \frac{Pm^2}{P} \right)^{0,85} \quad (3)$$

Sendo:

P – Precipitação média anual (mm)

Pm – Precipitação média mensal (mm)

(EI) – Média mensal do índice de erosão em (MJ.mm/ha.h.ano)

R –  $\Sigma (EI)^3$

Para realização dos cálculos, foram coletados dados da ANA – Agência Nacional de Águas – referente a estação pluviométrica Lomba, com código 03151003 e coordenadas 31°22'3" S e 51°59'12" W. Assim, foi calculado de uma série histórica, desde 1967 até 1986, as precipitações mensais e anuais de cada dado, bem como os seus índices mensais de erosão. O período foi escolhido por não apresentar falhas pluviométricas, logo não foi necessário estimar dados de chuva e conseguiu-se trabalhar com os valores reais de campo.

---

<sup>3</sup> A erosividade final do solo é a soma dos valores mensais dos índices de erosão.

### 3.4.2 Fator Erodibilidade do Solo (K)

O fator de erodibilidade do solo é a taxa de perda do solo por unidade de erosividade da chuva em um local de referência, correspondente a um determinado solo e a uma área, sendo assim, a suscetibilidade natural desse solo à erosão. O método escolhido para calcular a erodibilidade dos solos presentes em São Lourenço do Sul foi proposto por Bouyoucos (1926) e é utilizado ainda hoje, conforme Arraes et al., (2010), Grigolon (2013) e Franceschini (2014), através da Equação 4.

$$Fator\ K = \left( \frac{\%areia + \%silte}{\%argila} \right) \times 0,01 \quad (4)$$

Onde:

Fator K: erodibilidade do solo de cada horizonte (ton.ha.h/ha.MJ.mm), e (% areia, % silte e % argila): respectivas frações para os horizontes selecionados.

O método possibilita a determinação das diferentes texturas presentes no solo, sendo tradicional seu uso para análises granulométricas (SOUZA JUNIOR, 2011).

### 3.4.3 Fator Topográfico (LS)

O fator topográfico (LS) combina dois fatores, em função do comprimento da rampa o fator L e, em função da declividade média o fator S. Existem variados métodos para definição do fator topográfico. O método escolhido para definição do fator topográfico foi proposto por Domingos (2006), que determina o valor médio de LS correlacionado com a declividade (e o relevo) existente no local de estudo, conforme Tabela 9.

Tabela 9. Fator topográfico definido por declividade

Classes de Declividade	Fator LS
Plano (0 - 3%)	0,863
Suavemente Ondulado (3 - 8%)	2,882
Ondulado (8 - 20%)	5,400
Fortemente Ondulado (20 - 45%)	8,322
Montanhoso (45 - 75%)	11,611
Escarpado (Acima de 75%)	16,318

Fonte: Domingos (2006)

### 3.4.4 Fator Cobertura do Solo (C) e Práticas Conservacionistas (P)

A vegetação é a proteção natural do solo contra a ação erosiva da água. Quando a chuva precipita em um terreno coberto por vegetação espessa, a gota de água tem seu impacto reduzido. Quando não há nenhuma cobertura, a gota faz desprender e salpicar as partículas de solo, que posteriormente são facilmente transportadas pela água até o ponto mais baixo do terreno (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

A cobertura do solo está relacionada a qualquer forma de vegetação presente no solo, sejam florestas, campos, pastagens, ou mesmo cultivo agrícola, sendo um aspecto de grande relevância como fator que influencia a erosão, pois o solo sem – ou com pouca cobertura - possibilita maiores índices de processos erosivos (DA SILVA, 2008). Entretanto, para combater a erosão faz-se necessário, em união a cobertura de solo, as práticas conservacionistas. Estas têm por finalidade preservar, manter e restaurar, ou recuperar, os recursos naturais, mediante o manejo integrado do solo, da água e da biodiversidade, segundo Denardin et al., (2014) podendo ser terraceamento, curvas de nível, culturas em faixa, entre outras (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2005).

Os autores Bertoni e Lombardi Neto (2005) trabalham os dois fatores de maneira dissociada, atribuindo valores para cada um dos fatores. Todavia, para Wischmeier e Smith (1978), os fatores C e P estão significativamente relacionados, por isso não devem ser analisados separadamente. O efeito combinado das variáveis de cobertura do solo, juntamente com práticas conservacionistas, é representado pelo fator CP.

No presente trabalho utiliza-se a metodologia proposta por Tomaz (2008). Entretanto, os valores de cobertura da terra (C) são elencados

individualmente, não trazendo os valores do fator P correlacionados. Devido à dificuldade em obter o fator P com detalhamento em grandes áreas, admite-se adotar P=1, que representa a pior situação possível de práticas conservacionistas e permite utilizar os fatores em correlação (PEREIRA et al., 2015; STEIN et al., 1987).

Tabela 10. Fator de práticas do uso da terra e técnicas conservacionistas

<b>Uso geral da terra</b>	<b>C</b>	<b>P</b>
Plantações (cultivo)	0,080	1,0
Florestas virgens	0,0001	1,0
Pastagens	0,01	1,0
Vegetação nativa	0,1	1,0
Florestas	0,005	1,0
Agricultura de café	0,2	1,0
Solo Exposto	1	1,0
Áreas urbanas	0,03	1,0

Fonte: Tomaz (2008)

Conforme sugerido por Tomaz (2008) estão expressos na Tabela 10 os valores de práticas do uso da terra, correlacionado as práticas conservacionistas, permitindo-se assim trabalhar com as duas variáveis de forma conjunta.

Depois de delimitados os seis fatores principais do modelo RUSLE conseguiu-se calcular o potencial da perda de solo do município de São Lourenço do Sul, através da Equação 2.

## 4 Resultados e Discussão

Para mensurar a quantidade de perda de solo, utilizando o modelo RUSLE faz-se necessário o levantamento de cada fator que o compõem.

### 4.1 Fator de Erosividade (R)

As precipitações anuais de uma série histórica de 20 anos (1967 a 1986), para posterior determinação do fator erosividade no município de São Lourenço do Sul, foram calculadas através da precipitação média mensal de cada ano, medida pela Estação Pluviométrica Lomba. Apesar de existirem duas estações pluviométricas no município, um deles foi instalado somente em 2016 não possuindo, assim, a quantidade de dados históricos necessários para análise. Portanto, apenas uma das estações foi utilizada para realizar os cálculos determinantes do fator de erosividade, generalizando-os para a totalidade municipal.

Através dos dados de precipitação mensal e anual fornecidos pela Agência Nacional de Águas – ANA – e utilizando-se da Equação 3, conseguiu-se definir o índice de erosão mensal de cada ano em análise, bem como a erosividade total anual. Posto isso, realizou-se o somatório dos índices de erosão anuais e obteve-se o fator de erosividade médio para o município de São Lourenço do Sul, conforme a Tabela 11.

Tabela 11. Erosividade média para uma série histórica de 20 anos

<b>Índice de erosividade (R) para o município de São Lourenço do Sul = 6742,22</b> <b>MJ.mm/ha.h.ano</b>			
<b>Ano</b>	<b>R</b>	<b>Ano</b>	<b>R</b>
1967	5930,54	1977	8134,13
1968	5599,01	1978	5313,63
1969	5813,19	1979	6125,26
1970	5286,57	1980	7611,56
1971	5890,56	1981	5949,85
1972	8315,21	1982	6625,93
1973	7200,96	1983	7419,48
1974	6733,71	1984	9296,90
1975	5672,59	1985	6244,85
1976	6454,07	1986	9226,45

Fonte: Zanchin (2017)

O fator de erosividade médio para uma base de dados pluviométricos de 20 anos, para o município de São Lourenço do Sul foi de 6742,22 MJ.mm/ha.h.ano. Conforme estudos de municípios próximos a área de estudo, percebe-se que o valor médio encontrado para o município de São Lourenço do Sul está dentro da faixa de variação dos valores de erosividade para região sul do estado. Segundo estudos de Lago (2000), o valor obtido para região de Pelotas foi 4918,9 MJ.mm/ha.h.ano. Já, conforme estudos de Bazzano et al. (2010) para a região de Rio Grande obteve-se erosividade de 5135 MJ.mm/ha.h.ano.

Percebe-se que os anos de 1972, 1977, 1984 e 1986 apresentaram os maiores valores de precipitação anual e de erosividade. Os valores de precipitação anual (mm/ano) foram, respectivamente, 1771,40; 1779,59; 1951,90 e 2256,40. Os valores de erosividade foram sequencialmente, 8134,13; 8315,21; 9226,45 e 9296,90 MJ.mm/ha.h.ano. Correlacionando com a Tabela 3, disponibilizada pela Defesa Civil de São Lourenço do Sul (2015), destaca-se que estes mesmos anos, com exceção de 1972, sofreram eventos extremos de inundação no município, no qual a inundação referente ao ano de 1986 deixou oitocentos moradores desabrigados.

Tabela 12. Classes de interpretação para índices de erosividade

Intervalo (MJ.mm/ha.h.ano)	Interpretação da Erosividade
R < 300	Muito baixa
300 > R < 2000	Baixa
2000 > R < 4000	Moderada
4000 > R < 8000	Alta
R > 8000	Muito alta

Fonte: Aquino (2005)

De acordo com as classes de interpretação, conforme demonstrado na Tabela 12, para índices de erosividade proposto por Aquino (2005), o valor médio final da erosividade no município de São Lourenço do Sul é considerado alto, apresentando elevado poder de erosão pela chuva.

#### 4.2 Fator Erodibilidade do Solo (K)

O fator erodibilidade foi calculado, para todos os solos presentes no município de São Lourenço do Sul, através da expressão de Bouyoucos

(1926). Os valores foram baseados na Tabela 13, posto que, em sensoriamento remoto, o horizonte A é o único horizonte com reflexão de energia necessária para análise do solo (FIGUEIREDO, 2005).

Tabela 13. Textura dos solos presentes nas formas de relevo existentes na área de estudo

<b>Relevo</b>	<b>Horizonte A</b>	<b>%areia*</b>	<b>%silte</b>	<b>%argila</b>
Planalto de Serra	Sp	72,2	7,1	20,7
Escarpa de Serra	Se	57,6	31,6	10,8
Serra Não Rochosa	Sn	61,1	26,0	12,9
Colina Interserrana	Si	58,1	30,7	11,2
Coxilha	Cx	35,8	7,9	31,4
Colina	Co	44,4	38,2	17,4
Planície Lombada	Lo	63,9	27,2	8,9
Planície Alta	Pa	Só cascalho	18,0	12,0
Planície Média	Pm1	Só cascalho	21,0	26,0
Planície Baixa Aluvial	Ba	27,0	31,0	42,0
Planície Baixa Lagunar	Duna (Ld)	122,0	8,0	2,0
	Banhado (Lb)	7,85	59,15	33,0
	Traço de Praia (Lp)	28,0	60,0	12,0

\*Somatório de areia fina, média e grossa presentes no perfil de solo.

Fonte: Adaptada de Embrapa (2013).

Nos dados fornecidos pelo estudo dos solos de São Lourenço do Sul, pela Embrapa (2013), estavam ausentes os valores referentes ao relevo planície baixa lagunar para Banhado e Traço de Praia. Posto isso, utilizou-se para o traço de praia os dados fornecidos pelo estudo de Carmo e Val (2013), realizado pela UNESP referente aos neossolos, utilizando as características mais condizentes com o relevo da área de estudo.

Para cálculo do banhado, os dados foram fornecidos pelo estudo de Da Cunha et al. (2001) dos solos de Camaquã, visto que ambos possuem igual classificação (gleissolo melânico). Ambos os estudos aparecem nos anexos B e C, respectivamente.

Tabela 14. Fator erodibilidade (ton.ha.h/ ha.MJ.mm)

Relevo	Horizonte A	Fator K
Planalto de Serra	Sp	0,0383
Escarpa de Serra	Se	0,0826
Serra Não Rochosa	Sn	0,0675
Colina Interserrana	Si	0,0793
Coxilha	Cx	0,0139
Colina	Co	0,0474
Planície Lombada	Lo	0,1023
Planície Alta	Pa	0,0150
Planície Média	Pm	0,0081
Planície Baixa Aluvial	Ba	0,0138
Planície Baixa Lagunar (Banhado)	Lb	0,0203
Planície Baixa Lagunar (Praia)	Lp	0,0733
Planície Baixa Lagunar (Duna)	Ld	0,65

Fonte: Zanchin (2017)

Para tanto, foi definido o fator de erodibilidade para cada relevo presente no município, conforme identificado na Tabela 14. Considerando a classificação proposta por Mannigel et al. (2002), utilizada também por Pereira (2014), pode-se classificar a erodibilidade dos solos de São Lourenço do Sul, conforme Tabela 15.

Tabela 15. Classificação para erodibilidade dos solos

Classificação	K (ton.ha.h/ ha.MJ.mm)
Extremamente alta	> 0,06
Muito alta	0,0451 – 0,06
Alta	0,031 – 0,045
Media	0,0151 – 0,03
Baixa	0,009 – 0,015
Muito baixa	< 0,009

Fonte: Mannigel et al. (2002)

Conforme análise dos resultados, percebe-se que aproximadamente 50% dos relevos presentes no município apresentam fator de erodibilidade do solo superior a 0,06 ton.ha.h/ha.MJ.mm, classificando-se como extremamente alto. Dentre eles, dois destacam-se por possuírem valores muito acima do proposto por Mannigel et al. (2002), sendo eles Planície Lombada e Planície Baixa Lagunar (Dunas) que apresentaram, respectivamente, valores de erodibilidade de 0,1023 e 0,65. A Figura 4 representa a classificação da erodibilidade do solo presente no município em estudo.

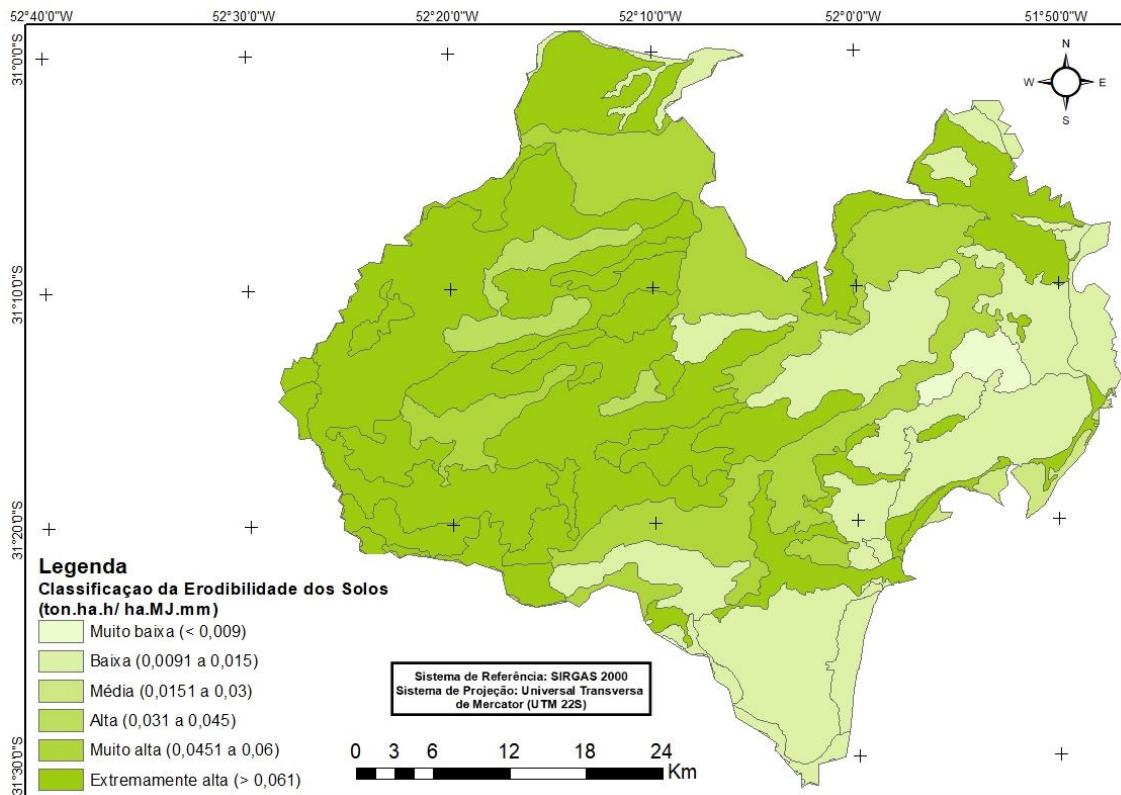


Figura 4 – Classificação da erodibilidade do solo (ton.ha.h/ha.MJ.mm)

Fonte: Zanchin (2017)

O resultado obtido pode-se referir aos tipos de solo presentes nestas regiões do município. A planície lombada caracteriza-se, conforme Da Cunha et al. (2006), pela deposição de sedimentos marinhos e constitui-se de planossolos hápicos e gleissolos. Esse perfil não apresenta estrutura de aeração suficiente no solo, impedindo assim a instalação de vegetação protetora. A planície baixa lagunar (duna) é uma superfície arenosa contínua e apresenta pouca, ou nenhuma, vegetação superficial para proteção do solo.

Em contrapartida, o relevo planície média possui fator de erodibilidade muito baixo. Segundo Da Cunha et al. (2006), isso ocorre devido a elevada presença de elementos siltosos e argilosos no perfil de solo, tornando este mais resistente aos processos erosivos.

#### 4.3 Fator Topográfico (LS)

Através da utilização do método proposto por Domingos (2006) para identificação do fator topográfico, todos os valores presentes contemplam a variedade das declividades existentes na área de estudo, tornando o cálculo

mais preciso e confiável. Com o auxílio do software ArcGis – Versão 10.2.2 conseguiu-se estimar as classes de declividades presentes no município de São Lourenço do Sul, bem como os intervalos de variação em porcentagem, conforme Figura 5.

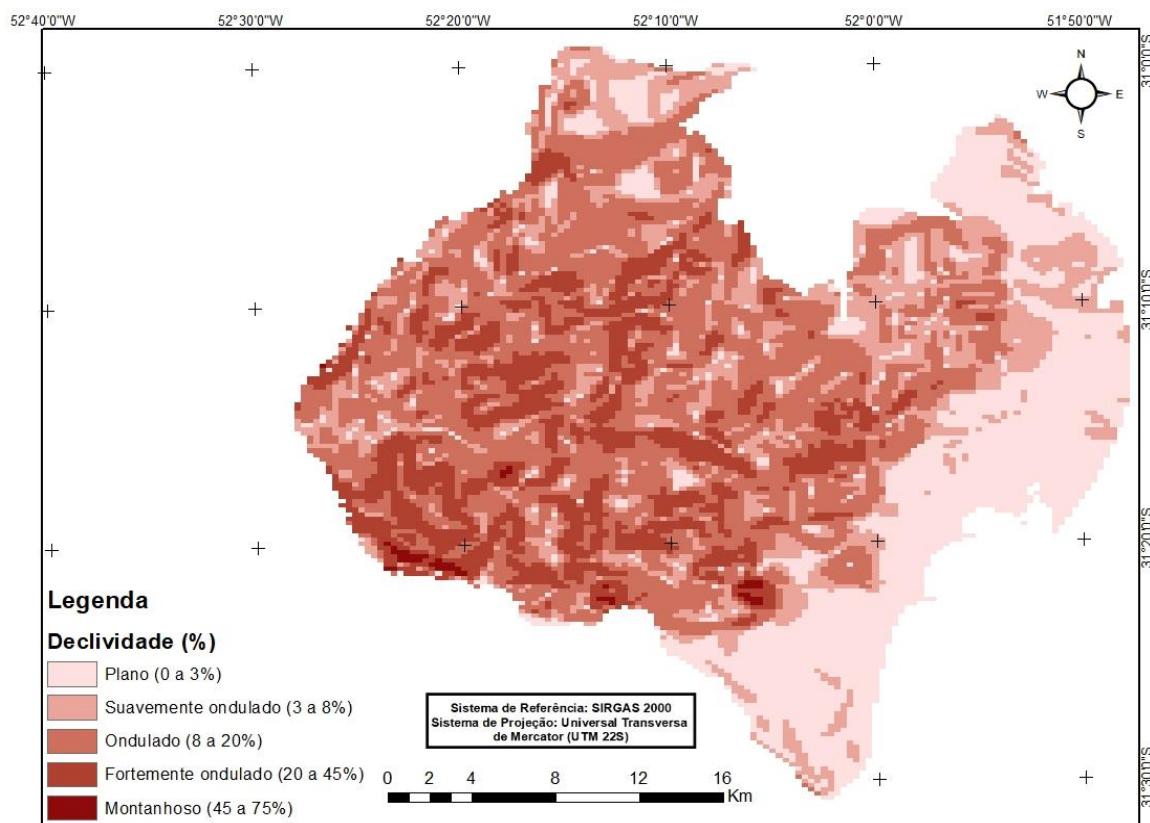


Figura 5 – Modelo de declividade para o município de São Lourenço do Sul.

Fonte: Zanchin, M (2017)

Percebe-se que o município não possui declividades superiores a 75% (classe de declividade escarpada) e, consequentemente, esta classe não está expressa na Figura 5. Após a determinação das classes de declividade presentes na região, pode-se definir o fator topográfico para o município de São Lourenço do Sul.

Tabela 16. Declividade estimada (%) de São Lourenço do Sul

Relevo	Declividade (%)	Fator LS
Plano	0 a 3	0,863
Suavemente Ondulado	3 a 8	2,882
Ondulado	8 a 20	5,44
Fortemente Ondulado	20 a 45	8,322
Montanhoso	45 a 75	11,611

Fonte: Zanchin (2017)

Conforme exposto na Tabela 16 determinaram-se os valores do fator topográfico (LS) para o município de São Lourenço do Sul. Através dos dados levantados percebe-se que quanto menor o intervalo de variação, mais suave é a classe de declividade proposta e menor o valor do fator topográfico associado a ela.

Sendo assim, o maior valor do fator topográfico, de 11,611, foi adotado para as maiores variações de declividade – variando de 45 a 75% e representam uma porcentagem muito pequena dentro do município. Para as variações de declividade medianas, representando as classes ondulada e fortemente ondulada, o valor do fator topográfico foi de 5,44 e 8,322, respectivamente.

Já, para as menores variações encontradas no município, o valor adotado para o fator LS foi de 0,863, para a classe plana e 2,882 para suavemente ondulada. Por não existirem declividades superiores a 75% não foi calculado fator topográfico para esta categoria.

#### **4.4 Fator de Cobertura do Solo (C) e Práticas Conservacionistas (P)**

Através do auxílio das imagens geradas por NDVI, conseguiu-se maior precisão, na coleta amostral, para identificação das classes propostas para estudo (Classe I – Solo exposto; Classe II - Cultivos/Pastagens; Classe III - Vegetação nativa; Classe IV - Área urbana e Classe V – Água).

Todas as imagens utilizadas no trabalho, com sua respectiva transformação NDVI, seguem apresentadas nos Anexos D e E respectivamente. Após finalizada a coleta das amostras, com auxílio das imagens NDVI, utilizou-se o método da verossimilhança (MaxVer) para classificação supervisionada, já descrito no item 3.3 da Metodologia. A Figura 6 representa a classificação MaxVer para a totalidade da área de estudo.

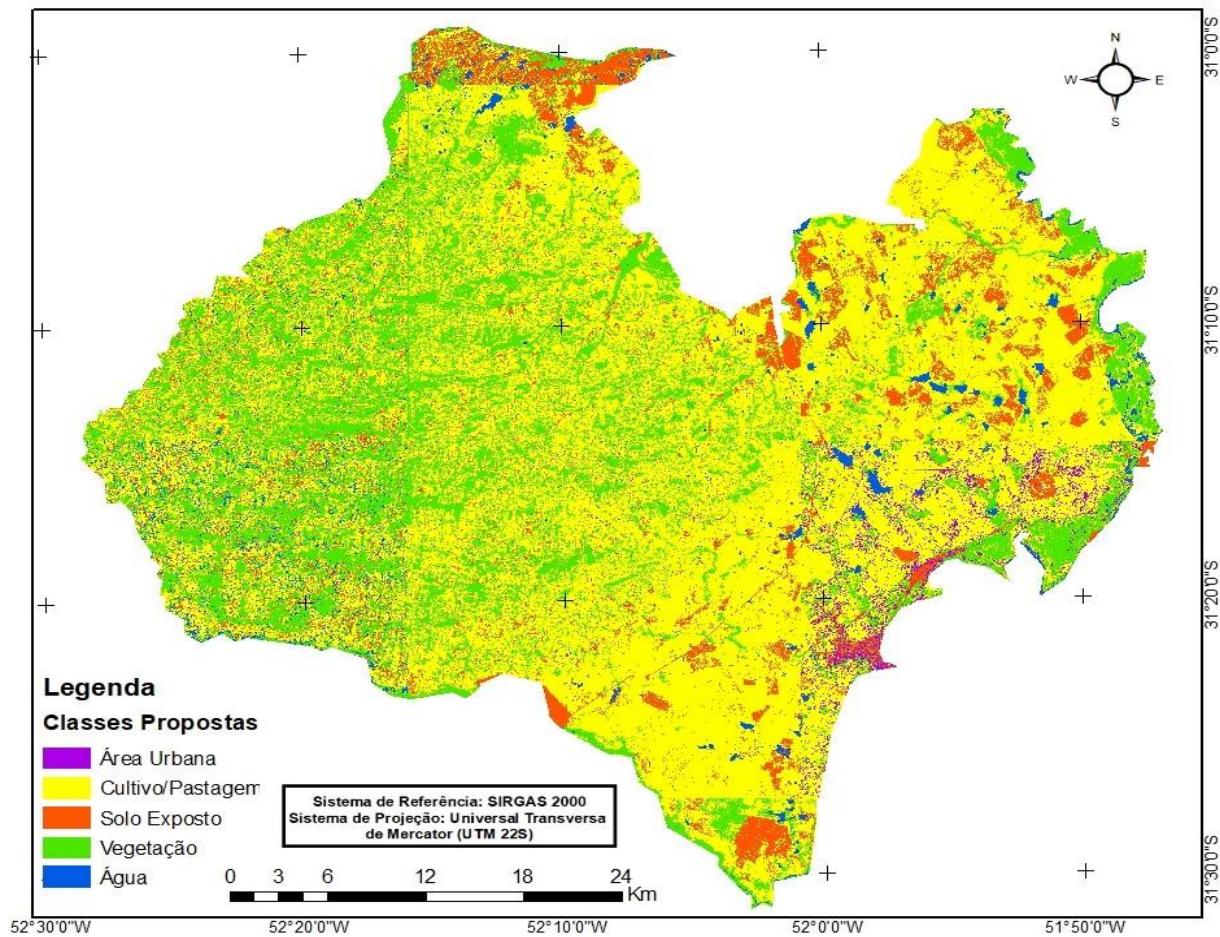


Figura 6 – Classificação MaxVer para o município de São Lourenço do Sul  
Fonte do mapa: Zanchin (2017). Inclui material © (2014/2015) RapidEye AG. Todos os direitos reservados.

Através da classificação supervisionada gerada para a totalidade do município percebe-se que há um predomínio maior de vegetação nativa na porção leste. Já, onde há predomínio de cultivos ou pastagem, consequentemente, ressalta-se maior quantidade de solo exposto. Comparando com a classificação de uso do solo proposta por Cunha et. al. (2006) e disponibilizada pela Embrapa (2013), percebe-se que alguns solos que são classificados como favoráveis ao cultivo não estão sendo utilizados para este fim, sendo o caso da serra não rochosa e coxilha. Em contrapartida, solos suscetíveis a erosão e com baixa disponibilidade hídrica, como as colinas, estão sendo utilizados para cultivo. Fica evidente, também, que quanto mais próximo da mancha urbana, maior a tendência a existir cultivos e/ou pastagem, por conta do desenvolvimento da área.

Entretanto, alguns usos originais do solo estão sendo respeitados. Observa-se que os solos relacionados a qualquer forma de planície baixa

lagunar, seja ela duna, traço de praia ou banhado, não são utilizados para cultivo, conforme estipulado na capacidade original de uso. Também se percebe que, solos que possuem capacidade para receber culturas estão sendo utilizados para este fim, sendo o caso dos tipos de solo relacionados as formas de relevo de planície alta.

Na pós-classificação, gerou-se a matriz de confusão para determinar a qualidade da classificação supervisionada realizada. Nesta, pode-se avaliar os resultados estimados, identificando-se com que frequência o modelo é previsto com precisão, através da quantidade e dos percentuais existentes em cada célula desta matriz.

Na Tabela 17 segue expressa a matriz de confusão, com os valores de exatidão global e índice Kappa gerados para o quadrante 2224610, através da classificação supervisionada para o município de São Lourenço do Sul. As demais matrizes geradas para a totalidade de imagens analisadas seguem no Anexo F.

Tabela 17. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224610

<b>Exatidão Global = (4495/4526) 99,3%</b> <b>Índice Kappa = 0,99</b>				
Classes	Solo Exposto	Vegetação	Água	Cultivos
Solo Exposto	100	0,00	0,00	0,81
Vegetação	0,00	99,85	0,00	0,00
Água	0,00	0,15	99,75	1,26
Cultivos	0,00	0,00	0,25	97,93
Total	100	100	100	100

Fonte: Zanchin (2017)

Analizando-se a matriz de confusão percebe-se que do total de amostras digitais coletadas (4526), 4495 estão correlacionadas corretamente. Para a órbita 2224610, nota-se que do total de pixels classificados para classe vegetação apenas 0,15 % não foram enquadrados na classe correspondente, sendo classificados como água. Na classe água, da totalidade de pixels amostrados apenas 0,25 % apresentou confusão com a classe cultivos.

A classe que apresentou maior índice de confusão foi o cultivo/pastagem. Nela, 0,81 % dos pixels analisados foi confundido com solo exposto e 1,26 % com a classe água. Entretanto, na classe solo exposto a porcentagem de erro foi nula, onde todos os pixels foram amostrados corretamente.

Pode-se perceber que o valor obtido para índice Kappa foi igual a 0,99, identificando que a qualidade da classificação de imagem foi excelente. A exatidão global também apresentou-se satisfatória, pois mais de 99% dos pixels foram classificados corretamente. Posto isso, a classificação supervisionada para esta órbita encontra-se o mais próximo possível do cenário real.

Na Tabela 18 apresenta-se o percentual de exatidão global e do coeficiente Kappa para todas as imagens, através da classificação supervisionada pelo método da verossimilhança.

Tabela 18. Matriz de confusão para o município de São Lourenço

Índice de Acurácia	Órbita 222							
	4510	4609	4610	4611	4709	4710	4711	4810
Exatidão Global (%)	93,2	94,7	99,3	93,7	96,4	97,7	99,6	100
Índice Kappa	0,91	0,93	0,99	0,91	0,94	0,97	0,995	1,0

Fonte: Zanchin (2017)

Conforme análise da matriz de confusão para o município de São Lourenço do Sul, observa-se que todas as classificações possuem exatidão global superior a 93% e índice Kappa superior a 0,9, demonstrando a eficácia do método de classificação. Entretanto, a imagem referente a órbita 2224611, mesmo atingindo uma exatidão global de 93,7% de classificação, confundiu grande parcela da classe “área urbana” com as demais. Posto isso, algumas feições de área urbana precisaram ser alteradas manualmente e, com auxílio do software QGIS, reclassificadas para o correto uso do solo.

Após a classificação supervisionada de todas as imagens que compõem a área de estudo, com resultados satisfatórios e próximos ao cenário real, pode-se definir os valores de CP para cada classe proposta baseando-se na Tabela 10 apresentada no item 3.4.4 da Metodologia.

Segue na Tabela 19 os valores adotados para cada classe proposta.

Tabela 19. Fator CP utilizado para o município de São Lourenço do Sul

Classes Propostas	Fator CP
Cultivos/Pastagem	0,08
Área Urbana	0,03
Vegetação Nativa	0,1
Solo Exposto	1,0
Água	0,0

Fonte: Redefinida por Zanchin (2017)

Deve-se lembrar que a classe água, por não se apresentar como uso da terra, possui valor nulo para a análise do fator CP. Acrescenta-se também, que por conta da expressiva rotatividade no uso do solo do município de São Lourenço do Sul, onde em uma mesma área há presença de pastagem e cultivos, decidiu-se agrupar ambos na mesma classe.

O valor adotado para o fator CP do cultivo/pastagem foi determinado pelo uso de solo que proporciona maior degradação a ele, sendo este o cultivo. Conforme Bertoni e Lombardi Neto (2005), a quantidade de perda de material para uma cobertura de pastagem é de 700 kg/ha.ano enquanto que a maioria das culturas tem perdas variando de 1100 a 38000 kg/ha.ano.

#### 4.5 Perda de Solo no Município de São Lourenço do Sul

Aplicando-se a Equação 2 conseguiu-se estimar o potencial da perda dos solos presente no município de São Lourenço do Sul, conforme Figura 7.

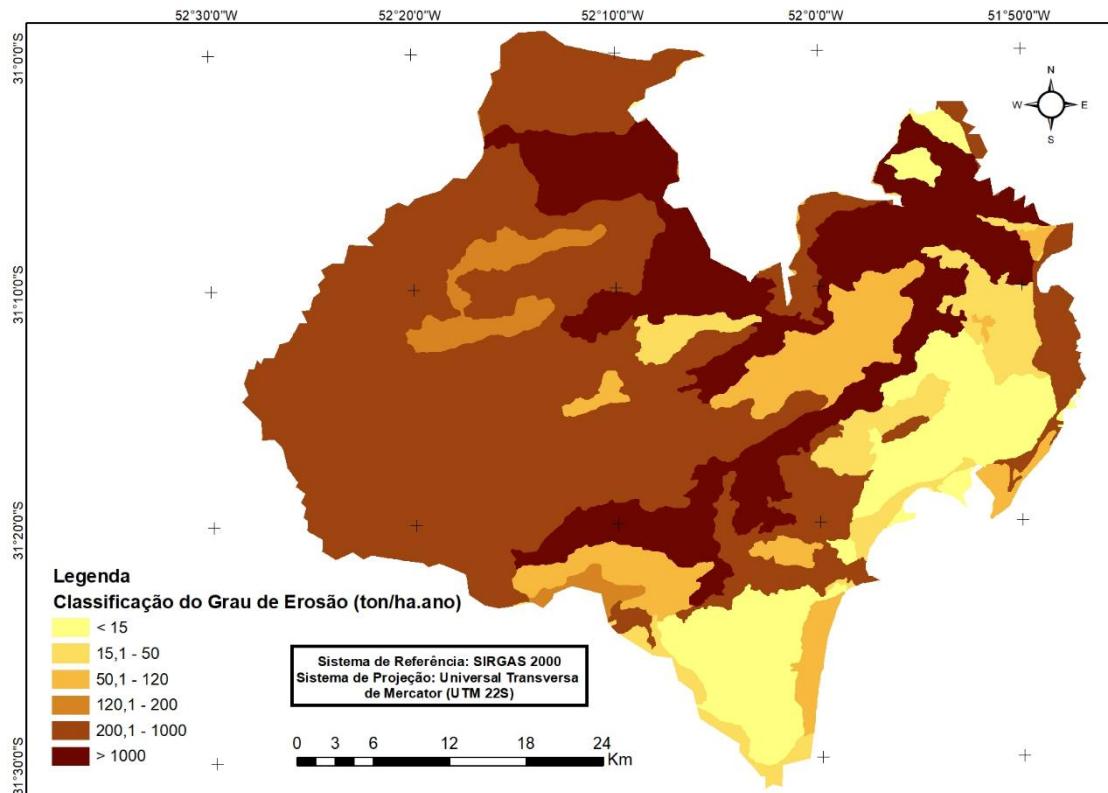


Figura 7 – Grau de Erosão (ton/ha.ano) para o município de São Lourenço do Sul  
 Fonte: Zanchin (2017)

Com o intuito de se obter um parâmetro de comparação para as perdas de solo da área de estudo, utilizou-se a base de análise proposta por Carvalho (2008) *apud* Barbosa et al. (2015) que define cinco classes, variando seu grau de erosão de nulo a muito forte, para classificar a perda de solo no município de São Lourenço do Sul, em (ton/ha.ano), exposto na Tabela 20.

Entretanto, como alguns valores apresentaram-se muito superiores a última classe definida por Carvalho (2008), acrescentou-se a esta classificação um nível extra, denominado “extremamente forte”, para contemplar os valores de perda de solo existentes no município excedentes a mil ton/ha.ano.

Tabela 20. Classificação do Grau de Erosão para o município de São Lourenço do Sul (ton/ha.ano)

Classificação	Grau de Erosão (ton/ha.ano)	Área	
		Área (Km <sup>2</sup> )	Porcentagem (%)
Nula a Moderada	< 15	254,5	12,5
Média	15,1 – 50	115,65	5,68
Média a Forte	50,1 – 120	221,31	10,87
Forte	120,1 – 200	59,86	2,94
Muito Forte	200 – 1000	961,33	47,22
Extremamente Forte	> 1000	423,35	20,79
<b>Total</b>		2036	100

Fonte: Adaptado de Carvalho (2008)

Percebe-se que 12,5% do município apresentam perdas nulas a moderadas de solo, equivalente a 254,5 km<sup>2</sup> do município total. Estão relacionadas as menores declividades existentes no terreno e a apenas uma forma de relevo, a planície alta. Os solos existentes nesse relevo apresentam baixo potencial de erosão, possuindo capacidade para receber culturas e pastagem, conforme proposto pela classificação de uso do solo original e identificado também pela classificação supervisionada. O teor de perda que ocorre na região pode ser atribuído, possivelmente, as manchas de solo exposto presentes no relevo.

Da totalidade do município, apenas 5,68% estão atribuídos a erosão média, representando 115,65 km<sup>2</sup> de área atingida. Apresenta relevo de planície alta e coxilha (que possui maiores declividades) e ambos os solos não apresentam alta suscetibilidade a erosão. O potencial classificado de médio a forte apresenta-se em 221,31 km<sup>2</sup> do município e representa 10,87% da área total. Aqui se caracteriza o relevo de coxilha e se percebe que, conforme capacidade de uso da terra proposta pela Embrapa (2013), o índice de cultivo admitido é o moderado, entretanto na prática o que se observa são altos índices de cultivo nesses locais.

Apenas 2,94% da área total do município caracteriza-se com forte grau de erodibilidade, totalizando 59,86 km<sup>2</sup> de extensão e refere-se ao planalto de serra e as classes de declividade variam de onduladas a fortemente onduladas, além de uma cobertura do solo com alto índice de vegetação e cultivo/pastagem. Os solos presentes nesse formato de relevo são os argissolos distróficos, que sofrem alto impacto erosivo e, combinados a declividades mais onduladas e uso do solo inadequado (estes solos não

permitem cultivo, conforme classificação de capacidade original), acabam por acentuar os processos erosivos. Cerca de 48% do território apresenta grau de erosão superior a 200 ton/ha.ano, sendo classificado como muito forte. Essa porcentagem equivale a 961,33 km<sup>2</sup>, ou seja, quase metade do município apresenta elevado potencial anual de perdas de solo.

Os valores variam de 300,73 a 546,12 ton/ha.ano sendo representados, quase em sua totalidade, por altas declividades (de ondulada a fortemente ondulada) e pelos relevos de serra, apresentando altos valores de erodibilidade natural do solo. Entretanto, essas regiões apresentaram a melhor cobertura do solo, com alta presença de vegetação nativa e baixo índice de solo exposto. Cabe ressaltar que o valor obtido para o fator erosividade foi utilizado para o município inteiro, e possui um alto poder erosivo, contribuindo para os índices finais de perda de solo no município de São Lourenço do Sul.

A classe adicional, proposta para valores superiores a mil ton/ha.ano de perdas de solo, e denominada como extremamente forte, atinge uma extensão de 423,35 km<sup>2</sup> no município de São Lourenço do Sul (cerca de 20,79% da área total), assumindo os valores expostos na Tabela 21.

Tabela 21. Valores das feições classificadas como extremamente fortes

Perda de Solo (ton/ha.ano)	Relevo	Declividade	Cobertura
1893,22	Planície Lombada	Suave a fortemente ondulado	Solo exposto
2457,54	Colina	Suave a fortemente ondulado	Cultivo e Solo exposto
2659,55	Colina	Suave a fortemente ondulado	Cultivo e Solo exposto

Fonte: Zanchin, M (2017)

Apesar de altos, os valores superiores a mil ton/ha.ano vem sendo citados por diversos autores. Domingos (2006) encontrou, para a bacia do Rio São José, no município de Linhares (ES) valores de perda de solo iguais a 2661 ton/ha.ano, referentes ao mesmo tipo de solo encontrado nas formas de relevo colina. Através do estudo realizado por Barbosa et al. (2015) no município de Paraíso das Águas, Mato Grosso do Sul, foram encontrados valores próximos a 1310 ton/ha.ano. Karamage et al. (2016) estimou a erosão do solo em 2178 ton/ha.ano, para a bacia hidrográfica do rio Nyabarongo, em Ruanda.

Os valores superiores a mil ton/ha.ano estão relacionados as seguintes características dos fatores anteriormente calculados: constituem-se nos relevos de planície lombada, com o segundo maior fator de erodibilidade encontrado (0,1 ton.ha.h/ha.MJ.mm) e nas colinas, que também apresentam alto fator erosivo do solo. Conforme exposto na classificação de uso do solo, proposta por Da Cunha et al. (2006), na planície lombada pode ocorrer práticas de cultivo, entretanto, na colina não. Quando verificamos o atual uso do solo na região, percebe-se que existe alto índice de áreas com cultivo e solo exposto em ambas formas de relevo; bem como a não existência de práticas conservacionistas no município. Quanto a declividade, suas classes variam de planas a fortemente onduladas.

Posto isso, possivelmente os altos valores de perda de solo podem ser atribuídos, principalmente, ao tipo de solo presente nestes terrenos e seu alto grau de suscetibilidade a erosão, combinados com a ausência de práticas conservacionistas e o alto índice de solo exposto, além do uso inadequado do solo, para cultivo, na colina. Conforme Moser (1990) *apud* De Marchi (2005) os planossolos são típicos de áreas baixas com excesso de água e a presença de horizonte superficial aluvial de textura arenosa ou média, que contrasta abruptamente com o horizonte secundário, de elevada concentração de argila. Os argissolos distróficos também possuem, conforme Embrapa (2013), alta suscetibilidade a erosão pela mudança brusca de textura nos horizontes superiores.

## 5 Conclusão

Apesar do município de São Lourenço do Sul possuir uma classificação para o seu uso do solo, constatou-se que essa capacidade não caracteriza completamente o cenário real, não havendo cumprimento por parte dos moradores nem fiscalização do poder público. Através da classificação supervisionada MaxVer pode-se definir o uso do solo para o município, referente aos anos de 2014/2015 e, baseando-se nele, definir o uso do solo atual. Sendo assim, com o auxílio das imagens de satélite foi realizada a caracterização do uso do solo com alto índice de precisão, representando a verdade em campo.

Para definição dos estimadores da equação de perda de solo revisada (RUSLE) encontrou-se algumas limitações, como a utilização de apenas uma estação pluviométrica para o fator erosividade, não representando a totalidade das chuvas em cada parcela do município. Outra limitação refere-se a dificuldade de identificar as práticas conservacionistas com detalhamento, por satélite, em grandes áreas adotando-se, assim, o pior cenário possível para análise. Apesar das limitações encontradas, foi possível a determinação dos estimadores necessários para o cálculo de perda de solo.

Após a determinação dos estimadores presentes na RUSLE foi possível estimar o potencial de perda de solo no município de São Lourenço do Sul. Dos resultados, pode-se classificar a perda de solo anual como muito forte, totalizando 47,22% da área total de estudo. Identificou-se que 20,79% do município apresenta grau de erosão extremamente forte, atingindo valores de 2659,55 ton/ha.ano. Os dados finais obtidos, referentes à análise da perda de solo, mostram-se preocupantes. Uma das medidas necessárias para redução do alto grau erosivo no município, através de incentivos e fiscalização do poder público, é a criação de planos e programas que facilitem a identificação da área ideal a ser cultivada, bem como as corretas técnicas de plantio e manejo a serem utilizadas por parte do agricultor, mitigando as perdas e conservando o solo.

A utilização do modelo matemático RUSLE mostrou-se satisfatória para estimar a perda de solo. O uso das tecnologias de geoprocessamento,

destacando-se neste trabalho o SIG, tornaram a execução da análise eficaz e prática. Sabe-se, porém, que a aplicação da metodologia RUSLE apresenta algumas limitações, bem como qualquer outra modelagem matemática, não conseguindo determinar (nem quantificar) a deposição de sedimentos, por exemplo.

Entretanto, a modelagem da perda de solo torna-se uma ferramenta suporte, de grande importância, para as tomadas de decisão frente alternativas de correto manejo e conservação do solo, bem como a implantação de práticas conservacionistas que exerçam resultados positivos no controle e redução das perdas de solo.

## Referências

- ALMEIDA, E. P de. C.; ZARONI, M. J.; DOS SANTOS, H. G. **Planossolos Háplicos**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. 2011. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONT000gn362j9y02wx5ok0liq1mq86zqh78.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn362j9y02wx5ok0liq1mq86zqh78.html)> Acesso em 2017.
- AMORE, E.; MODICA, C.; NEARING, M. A.; SANTORO, V. C. 2004. **Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins**. Journal of Hydrology, v. 293, p. 100-114.
- AMORIM, R. S. S. 2000. **Desprendimento e arraste de partículas de solo decorrentes de chuvas simuladas**. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. 74pg.
- ANTUNES, M. A. H.; SIQUEIRA, J. C. S. **Características das imagens RapidEye para mapeamento e monitoramento e agrícola e ambiental**. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, v. 16, p. 547-554, 2013.
- ARRAES, C. L.; BUENO, C. R. P.; PISSARA, T. C. T. **Estimativa da Erodibilidade do solo para fins conservacionistas na microbacia Córrego do Tijuco, SP**. Biosci, Uberlândia, v. 26, n. 6, p. 849-857, Nov./Dez. 2010
- AQUINO, R.F. **Padrões de chuva e variabilidade espacial da erosividade para o sul do Estado de Minas Gerais**. Dissertação para título de Mestre. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2005. 98p.
- BARBOSA, A. F.; DE OLIVEIRA, E. F.; MIOTO, C. L.; FILHO, A. C. P. **Aplicação da Equação Universal de Perda do Solo (USLE) em Softwares Livres e Gráutitos**. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. Vol. 38. P. 170 – 179. 2015.
- BARRET, E.C.; CURTIS, L.F. 1992. **Introduction to environmental remote sensing**. Chapman & Hall. 3<sup>a</sup> Ed. London, UK. 426 pg.
- BAZZANO, M. G. P.; ELTZ, F. L. F.; CASSOL, E. A. **Erosividade e características hidrológicas das chuvas de Rio Grande (RS)**. Rev. Bras. Ciênc. Solo [online]. Vol.34, n.1, pp.235-244. ISSN 1806-9657. 2010.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. L. **Conservação do solo**. São Paulo. Ícone. 5<sup>a</sup> Edição. 2005. 355p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. L. **Conservação do solo**. São Paulo. Ícone. 2008.

BOUYOUCOS, G. J. **Estimation of the colloidal material in soils**. Science, v.64, p.362, 1926.

BRAGA, B. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005, 318 p.

CARDOSO, F. B.; CENTENO, J. A. S. **Análise da dinâmica do uso e cobertura do solo em Blumenau (SC), utilizando ferramentas de geoprocessamento**. Caminhos de Geografia: Online, Uberlândia, v. 16, n. 56, p.173-184, out. 2015

CARIA DE MORAES, ELISABETE. 2002. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. INPE – São José dos Campos (SP).

CARMO, D.A.B.; VAL, B.H.P. **Classificação dos neossolos e nitossolos quanto a natureza física, química e morfológicas**. FAZU em Revista, Uberaba, n.10, p. 17-26, 201

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. CPRM, Rio de Janeiro, 1994.

CECATTO, C. A. **Modelagem das perdas de solo e água por erosão hídrica pluvial**. 130 p.: il. 21 cm. Tese (doutorado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveteinárias, Programa de Pós-Graduação em Manejo do Solo, Lages, 2014.

CECCONELLO, S. T. **Análise ambiental dos processos dinâmicos do uso e cobertura da terra sobre as áreas de preservação permanente no município de pelotas entre os anos de 1985 e 2015**. 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Territorial e Sistemas Agroindustriais, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2017.

CEPED/RS. CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES. **Mapeamento de vulnerabilidade de áreas suscetíveis a deslizamentos e inundações – São Lourenço do Sul/RS**. Relatório. Porto Alegre, 2015.

COSTA, J. **Dicionário rural do Brasil**. Rio de Janeiro: Campos, 2003. UFRJ, IGEO, Dep. Geografia, LAGEOP, Rio de Janeiro, 1999, Volume 2, Mídia CD.

COSTA, K. V. M; BARRETO, A. C.; FONTENELE, S. de B.; MENDONÇA, L. A. R. **Estimativa de perda de solo distribuída em uma bacia hidrográfica de pequeno porte através de técnicas de geoprocessamento**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

DA CUNHA, N. G.; PINTO, L. F. S; SILVEIRA, R. J. C. da.; MÜLLER, V; LIMA, A. C. R. de.; LIMA, C. L. R. de.; SANTOS, E. L. dos; MENDES, R. G; SILVA, M. G; PEREIRA, M. R; **Estudo dos solos do Banhado do Colégio**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2001. 68p. (Embrapa Clima Temperado. Circular Técnica, 29).

DA CUNHA, N. G.; SILVEIRA, J. C de.; SEVERO, C. R. S. **Solos e Terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e Planícies Costeiras**. Circular Técnica 55. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Embrapa Clima Temperado. Pelotas, RS. 2006.

DA SILVA, V. D. **Analise de perda de solo, utilizando o modelo (RUSLE) Revised Universal Soil Loss Equation, aplicado com auxílio das técnicas de geoprocessamento na bacia do Ribeirão Reis, Maringá – PR**. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina, em cumprimento aos requisitos necessário à obtenção do grau acadêmico de Mestre em Geografia. Florianópolis-SC, março de 2008.

DA SILVA, M. S. L.; NETO, M. B. O de. **Neossolos Flúvicos**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. 2011. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio\\_mata\\_sul\\_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7k02wx7ha087apz246ynf0t.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000gt7eon7k02wx7ha087apz246ynf0t.html)>. Acesso em 2017.

DEERING, D.W.; ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A. **Measuring "forage production" of grazing units from Landsat MSS data**. In: International Symposium on Remoting Sensing of Environment, 10, Ann Arbor, Proceedings. Ann Arbor, MI: ERIM, 1975. v.2, p. 1169-1178.

DE LIMA, D., DE CARVALHO, D. A., DE MORAIS, R. J., GONÇALVES, T. V., DE MENDONÇA PRADO, V. H. **Levantamento cienciométrico do uso de sensoriamento remoto nas análises que envolvem os impactos**

**ambientais na vegetação brasileira.** In: Anais do Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão da UEG (CEPE). (ISSN 2447-8687). 2017.

DE MARCHI, T.C. **Estudo do componente arbóreo de mata ribeirinha no rio Camaquã, Cristal, RS.** Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Botânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Botânica. Porto Alegre, 2005.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; COGO, N. P. **Agricultura conservacionista no Brasil – uma análise do conceito e adoção.** 1ed., Brasília, DF: Embrapa, 2014. Volume 1. p. 23-41.

DOMINGOS, L. J. **Estimativa de perda de solo por erosão hídrica em uma bacia hidrográfica.** Vitória 2006: 67 f. Monografia (Bacharel em Geografia), Universidade Federal do Espírito Santo.

DOS SANTOS, H.G.; ZARONI, M. J. **Gleissolos: Definições e Características em Geral.** Agência Embrapa de Informação Tecnológica. 2011. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos\\_tropicais/arvore/CONTAG\\_01\\_10\\_2212200611540.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG_01_10_2212200611540.html)> Acesso em 2017.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de Classificação de solos.** Brasília: Embrapa Produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 412 p.

FARIA, M. M.; FILHO, E. I. F. **Avaliação dos algoritmos SVM e Maxver para a classificação de sistemas florestais monodominantes de candeia (Eremanthus sp.).** Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE

FELIX, I. M.; KAZMIERCZAK, M. L.; ESPINDOLA, G. M. **RapidEye: a nova geração de satélite de Observação da Terra.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14, 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. Artigos, p. 7619-7622. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8.

FERREIRA, V. O.; MAGALHÃES, M. V. P. **Aplicação do Índice da Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) à Análise Multitemporal da Dinâmica de Áreas Agrícolas no Alto Curso da Bacia do Rio Uberabinha, MG.** ISSN 2318-2962 Caderno de Geografia, v.25, n.44, 2015.

**FIGUEIREDO, D. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto.**  
Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. Brasília - DF, 2005.

**FIORIO, P. R.; BARROS, P. P. S.; DE OLIVEIRA, J. S., NANNI, M. R.**  
**Estimativas de perda de solo em ambiente SIG utilizando diferentes fontes de dados topográficos.** Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais V.12 N.1 jan. /abr. 2016

**FLORES, C. A.; FILIPPINI-ALBA, J. M.; WREGE, M. S.** **Zoneamento agroclimático do eucalipto para o Estado do Rio Grande do Sul e edafoclimático na região do Corede Sul - RS.** Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 87p. ISBN 978-85-85941-34-5. 2009.

**FRANCESCHINI, M. H. D.; DEMATTÊ, J. A. M.; SATO, M. V.; VICENTE, L. E.; GREGO, C. R.** **Abordagens semiquantitativa e quantitativa na avaliação da textura do solo por espectroscopia de refletância bidirecional no VIS-NIR-SWIR.** Pesq. agropec. bras., Brasília, v.48, n.12, p.1569-1582, dez. 2014. DOI: 10.1590/S0100-204X2014001200006.

**GALDINO, S.; WEILL, M. A. M.** **Estimativa do fator topográfico (LS) da RUSLE para a bacia do alto Taquari – MS/MT, utilizando algoritmo do ângulo de inclinação limite para erosão/deposição.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.4813.

**GAMARRA, R. M.; TEIXEIRA-GAMARRA, M. C.; CARRIJO, M. G. G.; PARANHOS FILHO, A. C.** **Uso do NDVI na análise da estrutura da vegetação e efetividade da proteção de unidade de conservação no cerrado.** Ra'EGa, Curitiba, v.37, p. 307-332, ago/2016. ISSN: 2177-2738

**GOMIDE, I. S.** **Modelagem da perda de solo de pequenas bacias hidrográficas da Amazônia via modelo USLE.** Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, em cumprimento às exigências para a obtenção do Grau de Mestre. Belém/Pará. 2012.

**GRIGOLON, G. B.** **Curva de retenção de água no solo determinada a partir de um número de pares de umidade e tensão na câmara de Richards.** Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem. Piracicaba, SP. 2013.

GURGEL, R. G. A. **Principais variedades e espécies de gramas**. In: SIMPÓSIO SOBRE GRAMADOS, v.1., 2003, Botucatu. Anais... Botucatu: Universidade Estadual Paulista, 2003. 1 CD-ROM.

HENTZ, A.M.K. et al. **Técnicas orientadas ao objeto para levantamento da fragmentação florestal na sub-bacia Alto Iguaçu, Paraná**. Geociências, São Paulo, v. 34, n. 4, p.883-896, jan. 2015.

HUDSON, N. W. **Soil conservation**. 2. ed. Ithaca: Cornell University Press, 1981. 324p.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA **Censo demográfico 2010. Famílias e domicílios. Resultados da amostra**. 2010. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em 2017.

INPE. **Manuais: tutorial de geoprocessamento SPRING**. 2008.

INPE. **Manuais: tutorial de geoprocessamento SPRING**. 2011.

KARABURUN, A. **Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed**. Ozean Journal of applied sciences, v. 3, n. 1, p. 77-85, 2010.

KARAMAGE, F.; ZHANG, C.; KAVIRANGA, A.; SHAO, H.; FANG, X.; NDAYISABA, F.; NAHAYO, L.; MUPENZI, C.; TIAN, G. **USLE-Based Assessment of Soil Erosion by Water in the Nyabarongo River Catchment, Rwanda**. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2016. Doi: 10.3390/ijerph13080835. Disponível em: <[www.mdpi.com/journal/ijerph](http://www.mdpi.com/journal/ijerph)>

LAGO, J. C. **Erosividade das chuvas na metade Sul do Rio Grande do Sul**. 2000. 138f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

LANDIS, J.R.; KOCH, G. G.. **The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data**. Biometrics, [s.l.], v. 33, n. 1, p.159-174, mar. 1977.

**BRASIL. LEI Nº 8.171. DE 17 DE JANEIRO DE 1991**. Dispõe sobre a política agrícola. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L8171.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8171.htm)> Acesso em 2017.

LELIS, T.A. **Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do ribeirão São Bartolomeu, zona da mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT.** Universidade Federal de Viçosa, fev/2011.

LI, X., CHEN, W., CHENG, X., LIAO, Y., CHEN, G. (2017). **Comparison and integration of feature reduction methods for land cover classification with RapidEye imagery.** Multimedia Tools and Applications, 1-17.

LILLESAND, T.M.; KIEFFER, R.W. 1994. **Remote sensing and image interpretation.** John Wiley & Sons. 3<sup>a</sup> ED. New York, eua. 750 pg.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. **Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solos em Campinas.** SP. Bragantia, Campinas, v.51, n.2, p.189-196, 1992.

LOPES, A.S.; SILVA, H.P.; ARAUJO, I.R.; ALENCAR, B.P.B.; MELO, A.L. **Utilização de imagens de satélites e dados meteorológicos visando o monitoramento de mudanças climáticas.** In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, PE. 2010, p. 001-004.

MACIEL, M. M. **Aplicação da equação universal de perdas de solo (USLE) em ambiente de geoprocessamento e sua comparação com aptidão agrícola.** Dissertação apresentada como requisito parcial a obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-Graduação em Agronomia - Área Concentração Ciência do Solo - Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2000.

MANNIGEL, A. R. et. al. **Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo.** *Acta Scientiarum.* V. 24, n. 5, Maringá. P 1335-1340, 2002. Disponível em: <<http://eduemojs.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/viewFile/2374/1787>>. Acesso em nov. 2017.

MAYS, L. W. **Water Resources Engineering**/Larry W. Mays. — 1st ed. ISBN 0-471-29783-6. Printed in the United States of America. 2001. 753 pg.

MELO, R. O. de; CANTALICE, J. R. B.; ARAUJO, A. M.; CUNHA FILHO, M. **Produção de sedimento suspenso de uma típica bacia hidrográfica semiárida.** Anais. Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 8f, Gravatá-PE, 2008.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB, 2012. 266 p.

MIGUEL, P. **Caracterização pedológica, uso da terra e modelagem da perda de solo em áreas de encosta do rebordo do planalto do RS**. Santa Maria, 2010. 112 f.; il. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, 2010.

MOREIRA, M.A. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 1<sup>a</sup> edição, São José dos Campos, SP, 2001.

MOSER, J. M. Solos. In: Geografia do Brasil. Rio de Janeiro IBGE, v. 2, p. 85-111. 1990.

NASCIMENTO, I.S. et al. **Avaliação da exatidão dos classificadores MaxVer e iso cluster do software Arcgis for desktop, com uso de imagem LANDSAT 8 do município de Cáceres/MT**. Revista Continente, Rio de Janeiro, v. 5, n. 8, p.48-62, jan. 2016.

NOVO, E. M. L. M.; **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4<sup>a</sup> edição. São Paulo. Editora Blucher. 2010.

PAIVA, E.M.C.D. **Métodos de Estimativa da Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH/UFSM, 2003. cap. 13, pp.365-394.

PENONI, L. H., GONÇALVES, F. P. R., SILVA, J. R., SILVA, C. F. A., FRANÇA, F. M., CAVALCANTI, R. S. **Utilização do sensoriamento remoto na avaliação do antropismo no parque nacional da serra da canastra – MG**. Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento, v. 1, n. 2017, p. 5126-5136, 2017.

PEREIRA, J. S. **Avaliação das perdas de solo por erosão laminar na área de influência da UHE Amador Aguiar**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Geografia. 170f. 2014.

PEREIRA, T. S. R.; SANTOS, K. A.; SILVA, B. F.; FORMIGA, K. T. **Determinação e Espacialização da Perda de Solo da Bacia Hidrográfica do Córrego Cascavel – GO.** Rev. Geogr. Acadêmica v.9, n.2, (76- 93) ISSN 1678-7226 (2015).

RAPIDEYE. **Satellite Imagery Product Specifications.** Disponível em: < [www.rapideye.com](http://www.rapideye.com) >. 2012. Acesso em 2017.

RIGHETTO, A.M. **Hidrologia e recursos hídricos.** São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998. 840p.

ROSA, R. **Introdução ao Geoprocessamento.** Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Geografia. Jun/2013. Vol. 1. Pg. 142.

ROSA, R.; BRITO, J. L. S. **Introdução ao Geoprocessamento: Sistema de Informações Geográficas.** EDUFU. Uberlândia, p: 104. 1996.

ROSA, R. **Geotecnologias na geografia aplicada.** Revista do Departamento de Geografia, Uberlândia, v. 16, p. 81-90, jul. 2005.

SANTOS, C. A dos. **Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo da evolução espaço-temporal da dinâmica vegetal do manguezal em Barra de Guaratiba – RJ.** 52 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em ciência ambiental) pela Universidade Federal Fluminense. 2017.

SANTOS, F.; RAMALHO, L. S.; MARQUES, T. A.; SENA-SOUZA, J. P.; REATTO, A.; MARTINS, E. S.; COUTO JR, A. F.; NARDOTO, G. B. **Teor de Carbono Orgânico do Solo e Aspectos Biofísicos da Cobertura Vegetal da Bacia do Córrego Sarandi, Planaltina, DF.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Embrapa Cerrados, 2014.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. S.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. C. **Hidrometria Aplicada.** LACTEC-Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 372p. 2001.

SILVA, A.M.; SCHULZ, H.E.; CAMARGO, P.B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas.** 2. Ed. São Carlos-SP: RiMa, 2007. 158 p.

SILVA, G. J. F.; MARCOLA, M. B. **Avaliação espaço-temporal da cobertura vegetal na bacia hidrográfica do Rio Miriri-PB.** Anais... Simpósio Brasileiro

de Sensoriamento Remoto, 15, Curitiba PR. abr./maio 2011, INPE, p. 1803-1810.

**SIMÕES, S.J.C.; COIADO, E.M. Processos Erosivos. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH/UFSM, 2003. cap. 10, pp.283-293.

**SMIT, S. Observation of the change in vegetation density in degraded areas, of the Baviaanskloof catchment. Based on remote sensing techniques that estimate the relation between vegetation density and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).** University of Applied Science Van Hall Larenstein, The Netherlands. 2014.

**SOUSA JUNIOR, J. G.; DEMATTÊ, J. AM.; ROMEIRO ARAÚJO, S. Modelos espectrais terrestres e orbitais na determinação de teores de atributos dos solos: potencial e custos.** Bragantia, v. 70, n. 3, 2011.

**SOUZA, J.R. de. Mapeamento de manhas de óleo e graxa na zona portuária de Natal-RN utilizando técnicas de geoprocessamento e análise química de água / Jairo Rodrigues de Souza.** – 2017. 91 f: il. Color. Dissertação (Mestrado Profissional em Uso Sustentável de Recursos Naturais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Natal, 2017.

**STEIN, D. P.; DONZELLI, P. L.; GIMENEZ, A . F. PONÇANO, W. L. LOMBARDI NETO, F. Potencial de erosão laminar, natural e antrópico na Bacia do Peixe-Paranapanema.** Anais do IV Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Marília, SP, 1987. P. 105-135.

**STRECK, E. V. et al. Solos do Rio Grande do Sul.** 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS: UFRGS, 2008.

**TOMAZ, P. 2008. Curso de Manejo de águas pluviais através do RUSLE - Equação revisada universal de perda de solo.** Disponível em: <[http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo23\\_rusle.pdf](http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo23_rusle.pdf)>.

**TUCCI, C. E. M. 1998. Modelos Hidrológicos.** Porto Alegre. UFRGS; Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 943 pg.

**VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L. J. Planície Costeira do Rio Grande do Sul: gênese e paisagem atual.** In: Becker, F.G.; Ramos, R. A.; Moura, L. A. (Org.).

Biodiversidade. Regiões da Lagoa do Casamento e dos Butiazaís de Tapes, planície costeira do Rio Grande do Sul. 1<sup>a</sup>ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente/SBF. p. 1-388. 2007.

UHDE, L. T.; BONUMÁ, N. B.; DALBIANCO, L.; MINELLA, J. P. G.; REICHERT, J. M.; VOLGELMANN, E. S.; BARROS, C. A. P.; RODRIGUES, R. **Aplicação da RUSLE combinada ao SIG para estimativa de perdas de solo em uma vertente na depressão central do RS.** Universidade Federal de Santa Maria. In: XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Fortaleza. 2009.

WILKINSON, B. H. 2005. **Humans as geologic agents: a deep-time perspective.** Geology, v. 33, n. 3, p. 161-164.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Agricultural Handbook, n.537, Washington-D.C: USDA, 1978. 57 p.

YUE-QING, X.; XIAO-MEI, S.; XIANG-BIN, K.; JIAN, P.; YUN-LONG, C. **Adapting the RUSLE and GIS to model soil erosion risk in a mountains karst watershed, Guizhou Province, China.** Environmental Monitoring and Assessment, v.141, p.275-286, 2008.

**Anexos**

## ANEXO A - Contrato de Licença para Usuário Final da RapidEye



## Anexo B - Características físicas neossolo flúvico

**TABELA 1 - Característica fisica do perfil radambrasil ce - 110, representativo do NEOSSOLO LITÓTICO Distróficos.**

PROFUNDIDADE (CM)	HORIZONTE	ARGILA %	SILTE %	AREIA %	
				FINA	GROSSA
0-20	A	26	55	9	10
20-50	C	27	57	7	9

Fonte: Adaptado de PRADO, 2007.

**TABELA 2 - Característica fisica do perfil, representativo do NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Distrófico, NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Mesoálico.**

PROFUNDIDADE (CM)	HORIZONTE	ARGILA %	SILTE %	AREIA %	
				FINA	GROSSA
0-16	Ap1	9	1	33	57
16-25	Ap2	11	0	39	50
25-48	C1	11	1	38	50
48-70	C2	14	1	37	48
70-150	C3	14	2	29	55
150-200	C4	14	1	35	50

Fonte: Adaptado de PRADO, 2007.

**TABELA 3 - Característica fisica do perfil radambrasil129, representativo do NEOSSOLO FLÚVICO Eutrófico.**

PROFUNDIDADE (CM)	HORIZONTE	ARGILA %	SILTE %	AREIA %	
				FINA	GROSSA
0-10	A	12	60	28	0
40-45	C1	10	41	49	0
45-80	C2	10	43	47	0
80-110	IIC3	18	50	32	0
110-125	IIC4	6	28	66	0

Fonte: Adaptado de PRADO, 2007.

## ANEXO C – Características físicas gleissolo melânico

TABELA 25 – Informações do perfil: B - 23 da unidade Ba;

a) Classificação: SBCS – GLEISSOLO MELÂNICO Eutrófico incéptico (húmico); Soil Taxonomy – Cumulic Fluvaquentic Humaquept. B) Localização: estrada para Pacheca, borda da estrada. C) Geologia regional: sedimentos pleistocênicos e holocênicos. D) Material de origem: sedimentos argilosos holocênicos sobre sedimentos argilosos pleistocênicos. E) Geomorfologia: planície deprimida. f) Situação do perfil: borda de planície. g) Declividade: 0%. h) Erosão: não há. i) Relevo: plano. J) Suscetibilidade à erosão: nula. l) Pedregosidade: não há. M) Rochosidade: não há. n) Drenabilidade: muito mal drenado. o) Vegetação: campestre. p) Descrição do perfil:			
(hz)	(cm)		(solo)
A <sub>1</sub>	0-20		Preto (2,5 Y 2/0) úmido, cinzento muito escuro (5 Y 3/1) seco; mosqueado bruno-amarelado-escuro (10 YR 4/4) pouco, pequeno e distinto; franco-siltoso; blocos angulares muito grandes, moderada; pegajoso, plástico, muito firme, muito duro; raízes abundantes e finas; poros poucos e pequenos; transição gradual plana.
AB	20-40		Preto (2,5 Y 2/0) úmido, cinzento muito escuro (5 Y 3/1) seco; mosqueado bruno-amarelado-escuro (10 YR 4/4) pouco, pequeno e distinto; franco-siltoso; maciço com fendas que limitam blocos angulares grandes, moderada; muito firme, extremamente duro; pegajoso, plástico, raízes poucas e finas; poros poucos e pequenos; transição abrupta plana.
2 BC <sub>1</sub>	40-60		Cinzento (5 Y 6/1) úmido, cinzento (5 Y 6/2) seco; mosqueado bruno-amarelado-escuro (10 YR 4/4) pouco, pequeno e distinto; argilo-siltoso; maciço com fendas que limitam blocos subangulares médios, moderada; deposições de siltite nas faces das unidades estruturais; muito duro, muito firme, muito plástico, muito pegajoso; poros abundantes pequenos e grandes; raízes poucas e finas; transição gradual e plana.
2 BC <sub>2</sub>	60-80		Cinzento (5 Y 6/1) úmido, cinzento (5 Y 6/2) mosqueado bruno-amarelado-escuro (10 YR 4/4) pouco, pequeno e distinto; argilo-siltoso; maciço com fendas que limitam blocos subangulares médios, moderada; deposições de siltite nas faces das unidades estruturais; muito duro, muito firme, muito plástico, muito pegajoso; poros abundantes pequenos e grandes; raízes poucas e finas.

TABELA 26 – Resultados de análises físicas e químicas do perfil: B - 23 da unidade Ba;

Fatores	Horizontes			
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	2 BC <sub>1</sub>	2 BC <sub>2</sub>
Espessura (cm)	0-20	20-40	40-60	60-80
C. orgânico (g kg <sup>-1</sup> )	62,68	43,49	5,77	2,88
M. O. %	10,78	7,48	1,00	0,50
P (mg kg <sup>-1</sup> )	-	-	-	-
pH (H <sub>2</sub> O)	5,57	5,41	5,54	5,57
pH (KCl)	4,54	4,29	4,25	4,13
Ca (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	9,71	5,21	3,49	2,67
Mg	3,10	2,20	2,09	1,85
K	0,18	0,19	0,12	0,10
Na	0,33	0,37	0,42	0,04
S	13,32	7,97	6,12	5,02
Al <sup>3+</sup>	0,23	0,10	0,27	0,27
H + Al <sup>3+</sup>	10,78	7,48	3,07	1,80
T	24,10	15,45	9,19	6,82
T(arg)	90	54	38	30
V %	55	52	66	74
Sat. Al	2	8	4	5
Cascalho (g kg <sup>-1</sup> )	3	6	9	10
Areia grossa	63	74	109	108
Areia fina	194	214	280	310
Siltite	475	423	356	348
Argila	265	284	247	226
Textura	-	CL	L	L

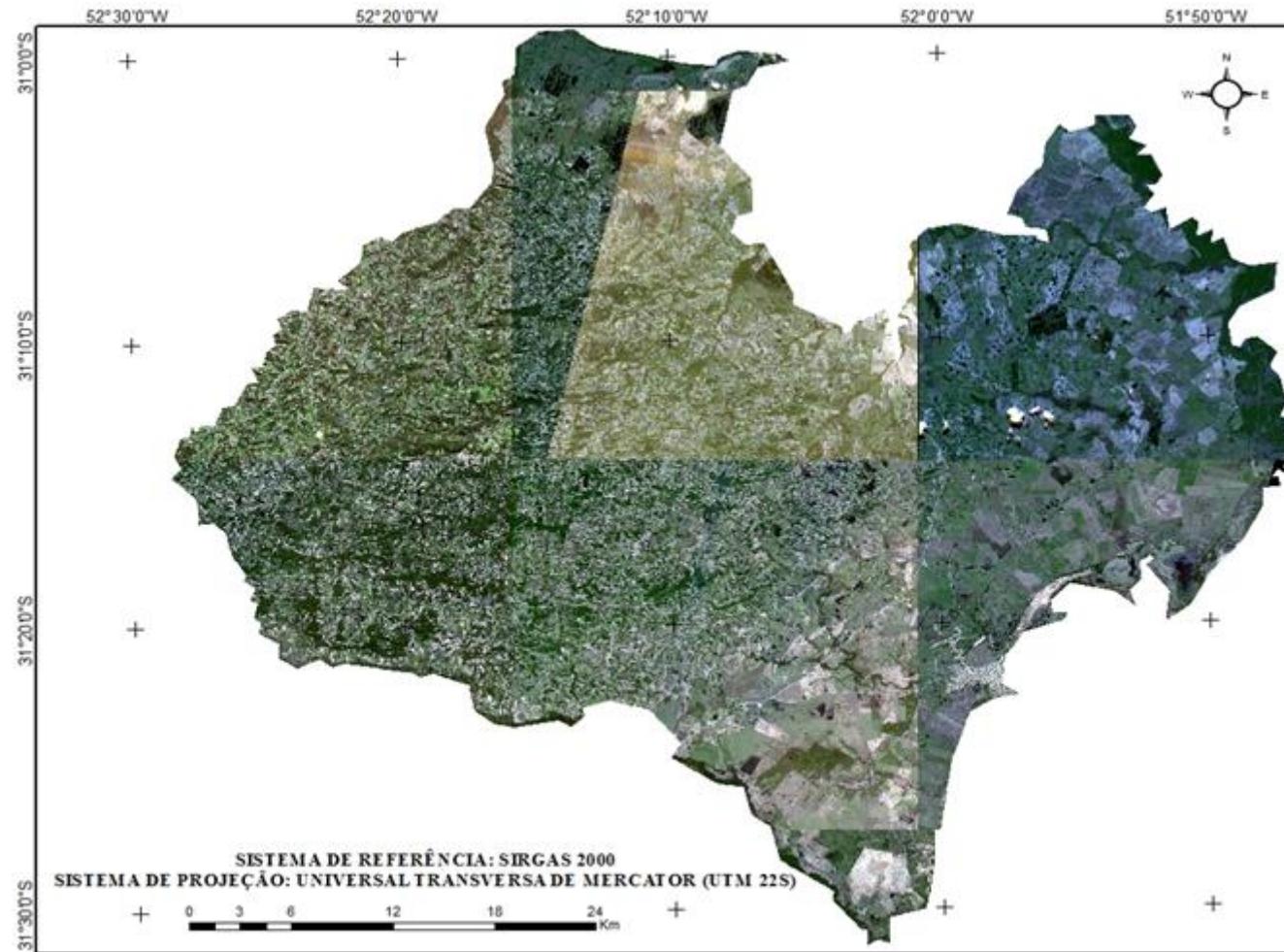
**ANEXO D – Mapa das imagens *RapidEye* utilizadas para classificação de uso do solo**

Figura 8 – Imagens *RapidEye* São Lourenço do Sul

Fonte: Inclui material © (2014/2015) RapidEye AG. Todos os direitos reservados.

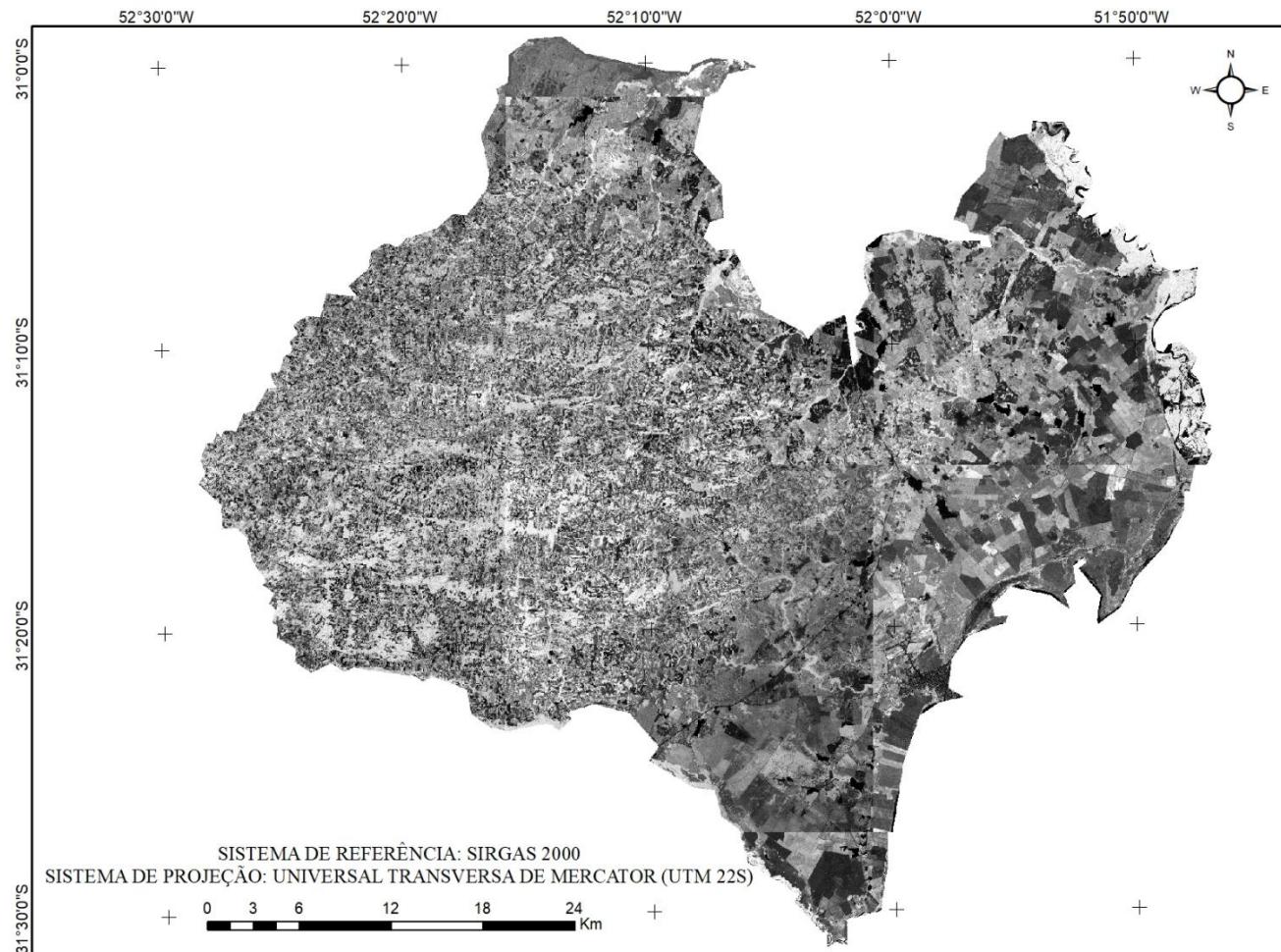
**ANEXO E – Imagens *RapidEye* transformadas para NDVI**

Figura 9 – Índices Espectrais de Vegetação (NDVI) para São Lourenço do Sul  
Fonte: Zanchin, M (2017). Inclui material © (2014/2015) RapidEye AG. Todos os direitos reservados.

**ANEXO F – Matriz de Confusão para cada imagem analisada no município de São Lourenço do Sul**

Tabela 22. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224510

<b>Exatidão Global = (7073/7563) 93,2%</b> <b>Índice Kappa = 0,91</b>				
Solo Exposto	Solo Exposto	Vegetação	Água	Cultivos
99,47	0,00	0,00	0,00	0,71
Vegetação	0,00	91,40	0,60	7,25
Água	0,00	3,59	97,77	5,97
Cultivos	0,53	5,01	1,63	86,07
Total	100	100	100	100

Fonte: Autora (2017)

Tabela 23. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224609

<b>Exatidão Global = (6383/6738) 94,73%</b> <b>Índice Kappa = 0,93</b>				
Classes	Solo Exposto	Vegetação	Água	Cultivos
Solo Exposto	100	0,00	0,00	1,65
Vegetação	0,00	99,25	0,00	0,00
Água	0,00	0,00	81,02	7,76
Cultivos	0,00	0,12	18,93	90,59
Total	100	100	100	100

Fonte: Autora (2017)

Tabela 24. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224611

<b>Exatidão Global = (2888/3082) 93,73%</b> <b>Índice Kappa = 0,91</b>					
Classes	Solo Exposto	Vegetação	Água	Cultivos	Área Urbana
Solo Exposto	100	0,00	0,00	0,00	3,30
Vegetação	0,00	97,85	0,00	1,19	0,62
Água	0,00	0,00	98,44	0,00	0,00
Cultivos	0,00	1,07	0,00	91,41	18,14
Área Urbana	0,00	1,07	1,56	7,41	77,94
Total	100	100	100	100	100

Fonte: Autora (2017)

Tabela 25. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224709

<b>Exatidão Global = (1754/1820) 96,4%</b> <b>Índice Kappa = 0,94</b>				
Solo Exposto	Solo Exposto	Vegetação	Água	Cultivos
100	0,00	0,00	0,00	0,31
Vegetação	0,00	95,53	0,00	2,16
Água	0,00	0,00	97,07	1,54
Cultivos	0,00	4,47	2,44	95,99
Total	100	100	100	100

Fonte: Autora (2017)

Tabela 26. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224710

<b>Exatidão Global = (2802/2867) 97,73%</b> <b>Índice Kappa = 0,97</b>				
Solo Exposto	Solo Exposto	Vegetação	Água	Cultivos
100	0,00	0,00	3,23	
Vegetação	0,00	99,82	0,00	0,00
Água	0,00	0,00	96,26	5,31
Cultivos	0,00	0,18	3,74	91,45
Total	100	100	100	100

Fonte: Autora (2017)

Tabela 27. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224711

<b>Exatidão Global = (7693/7721) 99,63%</b> <b>Índice Kappa = 0,995</b>				
Solo Exposto	Solo Exposto	Vegetação	Água	Cultivos
100	0,00	0,00	0,00	0,00
Vegetação	0,00	98,3	0,00	0,00
Água	0,00	1,57	99,91	0,00
Cultivos	0,00	0,13	0,09	100
Total	100	100	100	100

Fonte: Autora (2017)

Tabela 28. Matriz de confusão por MaxVer para órbita 2224810

<b>Exatidão Global = (2500/2500) 100%</b> <b>Índice Kappa = 1,00</b>				
Solo Exposto	Solo Exposto	Vegetação	Água	Cultivos
100	0,00	0,00	0,00	0,00
Vegetação	0,00	100	0,00	0,00
Água	0,00	0,00	100	0,00
Cultivos	0,00	0,00	0,00	100
Total	100	100	100	100

Fonte: Autora (2017)