

SARA MACIEL PENACHIO

**POTENCIAL DE PERMEABILIDADE DO SOLO POR MEIO DE ÍNDICES DE
VEGETAÇÃO NA FAZENDA LAGEADO, BOTUCATU (SP)**

Botucatu

2017

SARA MACIEL PENACHIO

**POTENCIAL DE PERMEABILIDADE DO SOLO POR MEIO DE ÍNDICES DE
VEGETAÇÃO NA FAZENDA LAGEADO, BOTUCATU (SP)**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador(a): Prof.^a Dr^a Célia Regina Lopes Zimback

Coorientador(a): Dr. Fábio Ávila Nossack

Botucatu

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

P397p Penachio, Sara Maciel, 1986-
Potencial de permeabilidade do solo por meio de índices de vegetação na fazenda Lageado, Botucatu (SP) / Sara Maciel Penachio.- Botucatu: : [s.n.], 2017
73 p.: il., color., grafs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2017
Orientador: Célia Regina Lopes Zimback
Coorientador: Fábio Ávila Nossack
Inclui bibliografia

1. Física do solo. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Análise Multicritério. I. Zimback, Célia Regina Lopes. II. Nossack, Fábio Ávila. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


“POTENCIAL DE PERMEABILIDADE DO SOLO POR MEIO DE ÍNDICES
TÍTULO: DE VEGETAÇÃO NA FAZENDA LAGEADO, BOTUCATU (SP)”

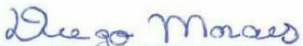
AUTORA: SARA MACIEL PENACHIO


ORIENTADORA: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

COORDENADOR: FABIO AVILA NOSSACK

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA
(ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Profa. Dra. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK
FCA / UNESP/Botucatu (SP)


Prof. Dr. DIEGO AUGUSTO DE CAMPOS MORAES
Depto de Análise e Desenvolvimento de Sistemas / Faculdade Eduvale de Avaré


Prof. Dr. LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA
Depto de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Botucatu, 27 de julho de 2017.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, Arnaldo e Solange, minha irmã Flora e meu namorado Samuel,
por todo apoio e amor infinito em todas as escolhas da minha vida.*

AGRADECIMENTOS ESPECIAIS

A minha orientadora, Prof. Dr^a. Célia Regina Lopes Zimback, que me proporcionou a oportunidade de desenvolver um mestrado, oferecendo todo o suporte necessário para a realização deste trabalho.

Ao meu companheiro Samuel Almeida Santos de Oliveira pelo apoio no âmbito profissional e pessoal.

AGRADECIMENTOS

A Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu e à Coordenadoria do Programa de Pós Graduação em Agronomia – Energia na Agricultura pela oportunidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de estudo.

Ao Departamento de Solos e Recursos Ambientais (Docentes e Funcionários) e estrutura para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Grupo GEPAG – Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas, pelo apoio técnico e pelo convívio.

Ao professor Roberto Lyra Villas Boas pela disponibilidade em emprestar o equipamento de medição de resistência à penetração do solo.

Ao meu coorientador Fábio Ávila Nossack pela disponibilidade em ajudar.

Aos participantes das bancas examinadoras de Qualificação e Defesa pelo enriquecimento deste trabalho.

Aos meus amigos de Pós Graduação pela parceria e companheirismo.

RESUMO

Com o aumento da população e a concentração desta em áreas urbanas, assim como o aumento de cultivo de grandes culturas em áreas agrícolas, cresce a impermeabilidade do solo e a diminuição de água infiltrada no mesmo. Um exemplo disso são os casos de enchentes relatados em grandes centros urbanos em épocas chuvosas e a compactação do solo advinda da ausência de planejamento no uso de máquinas agrícolas e pecuária. O estudo tem por objetivo avaliar a eficácia de Índices de Diferença Normalizada por meio de análise multicritério na discriminação do potencial de permeabilidade da Fazenda Experimental Lageado, objeto de estudo do presente trabalho, que possui uma área de 940,4 ha compreendendo departamentos, administração e área agrícola. A permeabilidade do solo é influenciada principalmente pela porosidade total, macro e microporosidade do solo. Além desses fatores, a resistência à penetração é um fator de grande importância para determiná-la. O atributo físico macroporosidade é o fator que mostra maior correlação com a permeabilidade do solo. Pelo sensoriamento remoto (SR) existem diversos índices que permitem a visualização de diferentes materiais na superfície da terra, que são aplicados utilizando a refletância da luz do sol nesses alvos, assim como a emissão de ondas eletromagnéticas por esses. Não só os índices associados ao uso do solo, como também outros fatores estão correlacionados com o potencial de permeabilidade (PP) do solo e podem ser processados e visualizados dentro de um ambiente de Sistemas de Informação Geográfica. A análise multicritério é a avaliação que combina diversos critérios, facilitando a tomada de decisão. Existem vários modelos dentro dessa análise os quais podem ser combinados com o sistema de informação geográfica. Neste trabalho a análise foi elaborada pelo processo hierárquico e o resultado final implicou em dados de potencial de permeabilidade mostrando viabilidade dos índices de vegetação, associados ao uso do solo, para estimar de maneira indireta a permeabilidade do solo da Fazenda Experimental Lageado.

Palavras-chave: Física dos solos. Sensoriamento Remoto. Análise Multicritério. Análise hierárquica

ABSTRACT

The population augmentation, and its concentration in urban sites as well as the expansion in agricultural areas of major crops reduce the soil hydraulic conductivity and the soil's infiltration water. In example of the consequences of those facts, there are the occurrences of floods in great cities, and the compaction of the soils due to the bad agricultural and livestock operational planning. This Study aims to verify the efficiency of vegetation index with multicriteria analysis in the discrimination of the hydraulic conductivity potential on The Fazenda Experimental Lageado (Lageado Experimental Farm), the present study object, which has an area of 940.4 ha, and includes departments, administration buildings and agriculture areas. The soil hydraulic conductivity is mainly affected by the total, macro and micro porosity; beside these factors, the penetration resistance is a factor of great importance to determine it. The macroporosity is the soil physical property that shows the most correlation to the soil hydraulic conductivity. Several indexes in the remote sensing allow the visualization of different earth surface materials, which are made by the sun emittance in different wavelengths reflected onto Earth's surface as well as its own emittance. The vegetation index, and other factors might correlate to the hydraulic conductivity, and a Geographic Information System (GIS) can process, and show its data. The multicriteria analysis uses different factors to ease the decision taking, and it has different models a GIS can process. In this essay the analysis used the Analytic Hierarchic Process (AHP), which the results displayed the hydraulic conductivity potential demonstrating the efficiency of vegetation index jointly land use land cover to indirectly estimate the Fazenda Experimental Lageado's soil hydraulic conductivity.

Keywords: Soil Physics. Remote Sensing. Multicriteria Analysis. Analytic Hierarchic Process. Hydraulic Conductivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fazenda Experimental Lageado/Botucatu-SP.....	37
Figura 2 – Pontos Amostrais.....	42
Figura 3 – Anéis Volumétricos Saturados.....	43
Figura 4 – Mesa de Tensão.....	44
Figura 5 – Macroporosidade nos Respectiveos Usos do Solo e Profundidades.....	53
Figura 6 – Dados Médios de Resistência à Penetração.....	55
Figura 7 – Altimetria da Fazenda Experimental Lageado.....	56
Figura 8 – Declividade da Fazenda Experimental Lageado.....	57
Figura 9 – Índices de Vegetação e Usos do Solo.....	59
Figura 10 – NDVI.....	60
Figura 11 – NDWI.....	61
Figura 12 – NDBI.....	62
Figura 13 – Comparação entre as análises multicriteriais dos dois grupos de variáveis.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de comparação das variáveis.....	49
Tabela 2 – Escala e descrições.....	49
Tabela 3 – Índice aleatório de consistência em relação ao número de variáveis analisadas.....	50
Tabela 4 – Valores de macroporidade em duas profundidades.....	52
Tabela 5 – Valores médios de resistência à penetração em duas profundidades.....	54
Tabela 6 – Dados de usos do solo e declividade.....	58
Tabela 7 – Valores médios dos índices de vegetação por diferença normalizada.....	59
Tabela 8 – Primeira matriz pareada.....	63
Tabela 9 – Segunda matriz pareada.....	64
Tabela 10 – Metodologia da normalização das variáveis estudadas.....	65
Tabela 11 – Potencial de Permeabilidade.....	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1	Solo.....	23
2.1.1	Propriedades físicas do solo.....	23
2.1.1.1	<i>Estrutura do Solo.....</i>	<i>23</i>
2.2	A água e o solo.....	24
2.2.1	Permeabilidade e infiltração de água no solo.....	26
2.3	Uso do solo.....	27
2.4	Sensoriamento remoto.....	28
2.4.1	Satélite sentinel 2A.....	29
2.4.2	Índices de vegetação.....	29
2.4.2.1	<i>Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI).....</i>	<i>30</i>
2.4.2.2	<i>índice de umidade por diferença normalizada (NDWI).....</i>	<i>31</i>
2.4.2.3	<i>índice de diferença normalizada para áreas construídas (NDBI).....</i>	<i>32</i>
2.5	Análise multicritério.....	32
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1	Área de estudo.....	35
3.1.1	Clima.....	35
3.1.2	Geologia.....	35
3.1.3	Relevo.....	36
3.1.4	Solos.....	38
3.2	Material.....	39
3.2.1	Cartas.....	39
3.2.2	Imagens.....	39
3.2.3	Geotecnologias.....	40
3.2.4	Equipamentos utilizados para análise física do solo.....	40
3.3	Metodologia.....	41
3.3.1	Dados de campo.....	41
3.3.1.1	<i>Coleta de dados para análise física do solo.....</i>	<i>43</i>
3.3.1.2	<i>Dados de resistência à penetração.....</i>	<i>45</i>
3.3.2	Aquisição de imagens.....	45
3.3.3	Processamento das imagens.....	45
3.3.4	Variáveis para análise multicritério.....	46
3.3.4.1	<i>Macroporosidade.....</i>	<i>46</i>
3.3.4.2	<i>Resistência a penetração.....</i>	<i>46</i>
3.3.4.3	<i>Uso do solo.....</i>	<i>46</i>
3.3.4.4	<i>Declividade.....</i>	<i>47</i>
3.3.4.5	<i>índices de vegetação.....</i>	<i>47</i>
3.3.5	Análise multicritério.....	47
3.3.5.1	<i>Ponderação das variáveis.....</i>	<i>48</i>
3.3.5.2	<i>Combinação linear ponderada.....</i>	<i>51</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1	Banco de dados.....	52
4.1.1	Macroporosidade.....	52

4.1.2	Resistência à penetração.....	53
4.1.3	Declividade e uso do solo.....	55
4.1.4	Índices de vegetação.....	58
4.2	Matrizes de dados.....	63
4.3	Normalização dos dados e obtenção do PP.....	64
5	CONCLUSÃO.....	68
	REFERÊNCIAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da população e sua concentração em áreas urbanas, assim como o aumento de cultivo de grandes culturas em áreas agrícolas, cresce a impermeabilização do solo e a diminuição de água infiltrada no mesmo. Como exemplo têm-se os casos de enchentes relatados em grandes centros urbanos em épocas chuvosas e a compactação do solo advinda da ausência de planejamento no uso de máquinas agrícolas e pecuária.

A resistência à penetração e a permeabilidade do solo à água são fatores indicativos de qualidade de solo sendo que a permeabilidade é influenciada principalmente pela densidade, porosidade total, macro e microporosidade. Além desses fatores a resistência à penetração é um fator de grande importância para estimar a permeabilidade. O atributo físico macroporosidade é o fator que mostra maior relação com a mesma, ao passo que a densidade é o fator com menor relação.

Os métodos tradicionais de medição de permeabilidade são feitos por meio de permeômetros de campo ou laboratório, que passam constantemente por processos de descalibração, além de serem processos trabalhosos para a obtenção da permeabilidade.

A Fazenda Experimental Lageado, local para fins didáticos e de pesquisa, necessita de um levantamento quantitativo bastante detalhado do solo, além do que estão presentes áreas construídas e locais com tráfego intenso. Pelo fato de ser uma fazenda experimental, o local esta sujeito a diferentes usos e manejos em curtos períodos de tempo. O acompanhamento sistemático das condições dos solos pode ser feito de maneira presencial e de maneira remota.

O Sensoriamento Remoto (SR) possui diversos índices que servem para visualização de diferentes materiais na superfície da Terra, ao passo que eles são aplicados utilizando a refletância da luz do sol nesses materiais e sua emissão. Os índices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*) e NDBI (*Normalized Difference Build Index*) são índices aplicados para o levantamento de área vegetal, levantamento de água presente em um vegetal e área construída, respectivamente. Os três índices trabalham com diferentes relações entre bandas com comprimentos de ondas diferentes na obtenção de imagens, que contrastam as diferentes superfícies em que a radiação

solar é incidida (vegetal, vegetal úmido e área construída). Não só os índices, como também outros fatores estão correlacionados com o potencial de permeabilidade do solo e podem ser trabalhados, processados e visualizados dentro de um ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) utilizando a ferramenta de Análise Multicritério.

Tendo como hipótese que índices de vegetação e uso do solo possuem correlação com a permeabilidade do solo, este trabalho tem por objetivo avaliar a eficácia de Índices de Diferença Normalizada (NDVI, NDWI E NDBI) por meio de análise multicritério na discriminação do potencial de permeabilidade (PP) do solo na Fazenda Experimental Lageado.

Os objetivos específicos foram:

- a) Aquisição de dados de macroporosidade, resistência à penetração e declividade;
- b) confecção dos índices de vegetação aplicados em imagem de satélite;
- c) análise multicritério para avaliação da macroporosidade, resistência à penetração e declividade, fatores reconhecidamente influentes na literatura, quanto ao potencial de permeabilidade do solo;
- d) análise multicritério para a avaliação dos índices de vegetação e do uso do solo no potencial de permeabilidade do solo;
- e) comparação entre as análises multicriteriais dos dois grupos de variáveis estudados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Solo

Segundo Freire (2006), o solo pode ser visto como um corpo natural composto por material mineral e matéria orgânica, com diferentes horizontes, sendo ele o substrato natural dos diferentes ecossistemas. Do ponto de vista físico, o solo é composto por material sólido, líquido e gasoso no qual a fase sólida compreende o material mineral e orgânico, a fase líquida é a solução que preenche a porosidade do solo e a fase gasosa é a parte da porosidade do solo que não estiver preenchida por água mesmo apresentando alta umidade relativa.

2.1.1 Propriedades físicas do solo

Existem inúmeras propriedades físicas no solo, como por exemplo a textura, estrutura, entre outras (FREIRE, 2006). Segundo Klein (2008), a textura do solo é um atributo pouco variável e majoritariamente uma característica quantitativa do mesmo, sendo muito importante na descrição, identificação e classificação do solo, o qual pode ser composto por três frações texturais, sendo elas: areia, silte e argila. Segundo o mesmo autor, a estrutura corresponde ao modo em que as partículas estão dispostas na massa de solo.

2.1.1.1 Estrutura do solo

De acordo com Kiehl (1979), existem diversas classificações quanto ao diâmetro dos poros do solo, no qual a maneira mais simples divide os poros em duas classes sendo os macroporos com diâmetro maior que 0,06 mm e microporos com diâmetro menor que 0,06 mm.

Klein e Libardi (2002) sugeriram uma classificação onde os poros podem ser separados em macroporos, microporos e criptoporos. Os macroporos são os poros que perdem água quando é aplicado uma tensão de 0,6 mca (6kPa) referente à capacidade de campo e com diâmetro de poros maior que 0,05 mm. Os microporos tem diâmetro entre 0,05 e 0,0002 mm perdendo água com uma tensão de 150 mca (15 atm ou 1500 kPa) referente ao Ponto de Murcha Permanente. Já, os criptoporos

possuem diâmetro inferior à 0,0002 mm, que mesmo com uma tensão de 150 mca, não perdem água. Freire (2006) definiu também que os microporos são os poros que retêm água quando o movimento descendente de água cessar, e os macroporos são os poros vazios que sofreram drenagem da água pela força da gravidade. Este estado é conhecido como Capacidade de Campo.

O volume total de solo é composto pelo volume de grãos minerais e partículas de matéria orgânica somados ao volume de poros entre os grãos e as partículas. O volume de poros é comumente preenchido por ar e água. Geralmente poros maiores são preenchidos por ar e poros menores por água. É proporcional o decréscimo do tamanho do poro e o volume de água retido neste poro (CHANCELLOR, 1994).

Conforme o mesmo autor, o método mais direto e mais utilizado de medição de distribuição de sólidos por espaço poroso é o da densidade do solo, que é a massa de solo seco pelo volume total do solo, descrita em g/cm^3 . A porosidade do solo é a razão do volume de poros pelo volume total do solo e normalmente expressada em porcentagem. Uma vez obtida a densidade do solo e a densidade de partículas do solo, é possível calcular a porosidade total. A densidade de partículas do solo pode variar de 2,55 até 2,70 g/cm^3 . Na escassez de dados a densidade dos grãos é utilizado o valor de 2,65 g/cm^3 .

2.2 A água e o solo

Quando a água atinge o solo ela pode ter diferentes destinos, pode escorrer pela superfície e encontrar um curso d'água, pode ser retida no solo ou drenada para o lençol freático. A água retida volta para a atmosfera pela evaporação e evapotranspiração (FREIRE, 2006).

As geometrias complexas dos espaços de poros no solo criam diversas combinações de interfaces, capilaridade e fatias, nas quais são formadas películas de água, resultando em uma variedade de ângulos entre ar-água e sólido-água. A água é assim arrastada para dentro e/ou mantida por estes interstícios proporcionalmente às forças capilares resultantes. Além disso, a água é adsorvida pelas superfícies sólidas com força considerável a distâncias curtas. Não é feita qualquer distinção entre os vários mecanismos que afetam a água em matrizes porosas. O modelo conceitual comum para retenção de água em meio poroso e

potencial matricial baseia-se no desenho dos espaços de poros como um feixe de capilares. A representação dos poros do solo é equivalente a capilares cilíndricos que simplificam bem o modelo e parametrizam os espaços de poros do solo (OR; WRAITH, 2002).

O movimento da água no solo acontece em condições saturadas e insaturadas. Em solos saturados ele deixa de sofrer maior influência vertical e passa a receber maior influência horizontal, seguindo o fluxo do lençol freático. O solo saturado ocorre quando os poros do solo são completamente preenchidos com água, neste caso o conteúdo de água é igual a porosidade total (RADCLIFFE; RASMUSSEN, 2002).

De acordo com os mesmos autores, o gradiente hidráulico, força motriz por trás do fluxo de água, é um vetor que descreve a declinação da distribuição de energia no solo. O principal parâmetro necessário para prever o fluxo saturado é a condutividade hidráulica saturada [K_s]. Para prever fluxo insaturado é necessário a condutividade hidráulica insaturada [$K(h)$] e a curva de retenção do solo [$\theta(h)$]. O termos K_s , $\theta(h)$ e $K(h)$ são todos influenciados pela textura e estrutura do solo. Enquanto a textura do solo é de fácil medição e em muitos casos não varia tanto no espaço, a estrutura do solo é de difícil quantificação e altamente variável no espaço e no tempo, entretanto existem métodos desenvolvidos para medir o K_s e o $K(h)$, cada um com suas limitações.

Segundo Freire (2006), a estrutura pode ser estudada por meios diretos macro e microscópicos e por meios indiretos, sendo eles a agregação, porosidade, permeabilidade, entre outros. Mesmo que a maioria dos solos de textura fina, por exemplo, sejam mais estruturados do que os de textura grossa, a textura em si não tem efeito direto sobre a porosidade, ao passo que é a estrutura que influencia no volume total de poros.

De acordo com Reichert (2016), as propriedades físicas de um solo degradado com textura muito arenosa não possuem agregação de partículas e demonstram alta condutividade hidráulica em solo saturado.

Para Radcliffe e Rasmussen (2002), medidas acuradas de parâmetros hidráulicos, tanto por laboratório quanto por métodos de campo, são essenciais para prever o movimento de água no solo. Diversos métodos de laboratório e métodos de campo foram desenvolvidos para fornecer parâmetros de entrada para modelos preditivos pois, a medição precisa dos parâmetros hidráulicos, é importante para

uma previsão confiável do movimento da água em solos. Contudo, incertezas nos parâmetros estimados surgem por conta de variações espaciais, acurácia na medição e efeito de escala.

2.2.1 Permeabilidade e infiltração de água no solo

Para Alam (2015), permeabilidade é a capacidade que uma massa de solo tem para permitir a passagem do fluxo de líquido através de seus espaços vazios interligados, onde estes vão depender do tamanho e da forma das partículas. Em condições naturais, a passagem do fluxo líquido pode ser paralelo, inclinada e vertical ao plano. Cada camada pode ter o seu próprio valor de permeabilidade dependendo do sentido do fluxo. O valor observado de coeficiente de permeabilidade do depósito estratificado depende do sentido do fluxo no que diz respeito à orientação do plano do extrato. O fenômeno mais simples e frequentemente observado ocorre quando o fluxo é perpendicular ao depósito estratificado.

A condutividade hidráulica saturada pode ser obtida pela forma física dos poros de um solo e pelo preenchimento destes por água, sendo dependente da quantidade, forma e distribuição desses poros, assim como a relação destes com a água. Alguns atributos físicos do solo podem assumir relações matemáticas e correlações com a condutividade hidráulica, sendo: densidade do solo, porosidade total, macroporos, microporos, influenciando a permeabilidade do solo (MESQUITA; MORAES, 2004).

Segundo Sampaio (2006), a permeabilidade está relacionada às características físicas do solo; a relação entre permeabilidade e macroporosidade, resistência à penetração e microporosidade segue, respectivamente, os valores de 0,960, -0,813 e -0,801, ao passo que os valores negativos representam uma correlação inversa e os valores positivos mostram uma correlação direta.

A permeabilidade não é uma constante no solo, ela é uma função relacionada com atributos do solo e com seu grau de saturação de água, o qual um solo saturado tem a permeabilidade praticamente constante. Quando um solo não se encontra saturado, tem-se uma função matricial de sucção definida pela curva característica água – solo (ZHAI; RAHARDJO, 2015).

Para Martins et al. (2002), a resistência à penetração e a permeabilidade do solo

à água são fatores indicativos de qualidade de solo.

A infiltração é a quantidade de água de chuva ou irrigação que entra no solo em um determinado período de tempo (taxa de infiltração) e é o que separa a água que flui sobre a superfície do solo e a que percola em profundidade (LIBARDI, 2005). A infiltração pode ter valores enganosos por conta de um horizonte B com baixa permeabilidade, pois em chuvas prolongadas, a taxa de infiltração pode ser alta no início e por conta do horizonte B, a camada superficial satura de água, reduzindo a taxa de infiltração (BARROS, 2014).

De acordo com Corsini (1991), durante o processo de expansão do café no Brasil, os fazendeiros faziam o uso frequente de arado de aiveca no preparo do solo. Essa operação começou processos que envolvem a translocação de argila no perfil do solo, compactação, dispersão coloidal, uso inapropriado de fertilizantes, mudanças adversas nas propriedades do solo e conseqüente queda na produção. Um dos efeitos mais notáveis é a compactação das camadas subsuperficiais observadas no perfil do solo e conseqüentemente a taxa de infiltração é reduzida e a erosão do solo é aumentada.

A substituição da cultura original do solo por culturas agrícolas, somados a práticas inadequadas de manejo do solo, alteram o escoamento superficial e a infiltração da água das chuvas, resultando em outros problemas ambientais (VETTORAZZI, 2006).

2.3 Uso do solo

Solos em seu estado natural, sob vegetação nativa, apresentam grande volume de solo explorado pelas raízes, apresentando características físicas como permeabilidade, estrutura do solo, densidade e porosidade do solo, favoráveis à agricultura (ANDREOLA et al., 2000).

Figueiredo et al. (2009) mostraram que áreas sob cerrado nativo apresentaram maiores valores de macroporosidade e porosidade total em comparação com áreas cultivadas. Flowers e Lal (1998) ainda afirmaram que o tráfego de máquinas em lavouras aumenta a compactação do solo e reduz a qualidade física do mesmo.

Segundo Dantas et al. (2012), áreas sob cultivo anual mostraram maior degradação física quando comparadas com áreas sob cultivo perene, pois ocorreu redução na condutividade hidráulica do solo, diminuição na estabilidade de

agregados maiores que 2,00 mm e aumento na densidade do solo.

Para Lanza et al. (2007), o sistema de pastejo ocasionou aumento de compactação do solo em camadas superficiais (0 a 15 cm), observado pela diminuição de macroporos e pelo aumento da resistência à penetração (0 a 20 cm) no solo.

Pela ação antrópica é possível executar grandes modificações no meio ambiente em um curto espaço de tempo, sendo necessárias ferramentas para mensuração e monitoramento de grandes áreas para acompanhar essas modificações e assim avaliar os impactos, bem como as mudanças na vegetação e nas condições climáticas globais (SHIMABUKURO, 2009), entre elas o Sensoriamento Remoto.

2.4 Sensoriamento remoto

Sensoriamento Remoto (SR) é uma forma de captação e quantificação de informações baseadas nos atributos de campo que circundam um objeto, sendo eles eletromagnéticos, acústicos ou potenciais. Por diversas razões, o termo SR, tornou-se restrito ao uso de sensores de radiação eletromagnética, sendo que o principal fator é que não necessita de um meio de propagação, possibilitando uma distância maior entre sensores e os objetos. Sendo assim, SR é um conjunto de sensores com equipamentos para o processamento e transmissão dos dados, a fim de estudar acontecimentos que ocorrem na superfície da Terra, por meio da resposta das substâncias presentes na mesma com a radiação eletromagnética (NOVO, 2008).

Uma das vantagens do SR é que com seu monitoramento pode-se cobrir áreas extensas com menor custo, possibilitando o acompanhamento de mudanças temporais no meio ambiente (BATISTELLA, 2008). Shimabukuro (2009) também afirmou ser uma ótima ferramenta para avaliação de fatores relacionados às atividades antrópicas.

Os satélites que disponibilizam imagens para posterior processamento são um exemplo de ferramentas do SR de grande importância, pois possibilitam o estudo de uma determinada área remotamente com baixo custo, já que existem inúmeros conteúdos disponibilizados gratuitamente.

2.4.1 Satélite Sentinel 2A

O desenvolvimento da missão Sentinel 2A visou um sistema de observação multiespectral da superfície terrestre que complementa as observações do Landsat (satélite de observação da Terra) e SPOT (satélite de alta resolução) e melhora a disponibilidade de dados para usuários. A obtenção de imagens, com frequência de 5 dias na linha do Equador, requer dois satélites Sentinel 2 idênticos operando simultaneamente a fim de um baixo custo efetivo e baixo risco de operação. A órbita tem sincronia com o sol a 786 km de altitude. Os locais de imageamento são próximos aos do Landsat e sincronizam com as imagens do SPOT permitindo combinações do Sentinel 2A com imagens históricas para construção de séries temporais de um longo período (DRUSCH et al., 2012).

Segundo o mesmo autor, o satélite foi planejado para adquirir imagens de latitudes entre -56° e 84° incluindo ilhas maiores que 100 km^2 , ilhas da União Europeia, ilhas a menos de 20km da costa, todo o mar mediterrâneo, todas os corpos d'água de ilhas e todos os mares fechado. O Sentinel 2 foi feito para trabalhar com os 2 satélites em lados opostos da órbita. As 13 bandas espectrais se encontram desde o visível e infravermelho próximo até o infravermelho de ondas curtas (infravermelho médio), em diferentes resoluções espaciais de 10 a 60 m; As quatro primeiras de 10 m são utilizadas para uso e cobertura da terra, as bandas de 20 m são utilizadas como requisitos para outros parâmetros de segundo nível (índices). As bandas de 60 m são utilizadas principalmente para correção atmosférica, sendo que a resolução de 60 m é suficiente para capturar a variabilidade de parâmetros geofísicos e atmosféricos.

2.4.2 Índices de vegetação

De acordo com Kay e Angers (2002), a estrutura do solo tem importância significativa na capacidade do solo de sustentar o crescimento de plantas devido à fatores como ciclo de carbono, nutrientes, recarga, armazenamento e transporte de água no solo, assim como a resistência do solo à erosão e a dispersão de substâncias químicas de origem antrópica.

Dentro do SR, os índices de vegetação são utilizados para a identificação da vegetação, sabendo assim sua localização e sua característica, podendo distingui-la

de outros elementos da paisagem. Para isso, foram utilizados radiação eletromagnética e razões matemáticas geradas entre as refletâncias em diferentes faixas espectrais (LIU, 2007).

Pela visualização do comportamento da vegetação por meio dos índices, baseado no regime de chuvas, é possível verificar a sensibilidade hídrica para práticas agrárias (ALBUQUERQUE, 2014). O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e o NDWI (*Normalized Difference Water Index*) são utilizados para mensurar o vigor vegetativo de uma superfície vegetada e a verificação das características hídricas desta superfície, respectivamente (LEIVAS et al., 2013).

Por se tratar de uma diferença normalizada, os valores finais dos índices estão entre -1 e 1, no qual para o NDVI os valores mais altos referem-se aos Números Digitais (ND) mais elevados, que correspondem às áreas de vegetação com maior vigor. Os valores mais baixos equivalem aos ND menores, que representam as áreas de vegetação estressada, menos densas ou até áreas sem vegetação (BORATTO; GOMIDE, 2013).

Para o NDWI, os valores negativos representam uma vegetação seca ou uma área de solo exposto, ao passo que os valores positivos representam a água presente no vegetal (GAO, 1996).

No NDBI (*Normalized Difference Build Index*) que é um índice de levantamento de áreas construídas, tem os valores próximos de zero quando representam florestas ou culturas agrícolas e os valores positivos representam áreas construídas (ZHA et al., 2003).

A vegetação depende, portanto, da estrutura do solo para ter um bom desenvolvimento, assim índices de vegetação, que possuem a capacidade de mensurar a taxa fotossintética de uma área, devem ser testados como meio de avaliar as condições físicas do solo de modo indireto.

2.4.2.1 Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)

O NDVI, desenvolvido por Rouse et al. (1973), utiliza a relação entre as refletâncias do infravermelho próximo e do visível, as quais variam dentro do espectro que vai de 0,725 a 1,10 micrômetros para o infravermelho próximo e de 0,4

a 0,7 micrômetros para o visível (Equação 1). As duas bandas do NDVI trabalham em diferentes profundidades na parte aérea das vegetações (LIU, 2007).

$$NDVI = \frac{(\rho_{0,725 \text{ a } 1,10 \mu m} - \rho_{v0,4 \text{ a } 0,7 \mu m})}{(\rho_{0,725 \text{ a } 1,10 \mu m} + \rho_{0,4 \text{ a } 0,7 \mu m})} \quad (1)$$

Onde: ρ é a refletância na superfície da Terra que corresponde ao comprimento de onda especificado acima.

2.4.2.2 Índice de umidade por diferença normalizada (NDWI)

Segundo Gao (1996), o NDWI é menos sensível ao efeito da atmosfera e não remove completamente o efeito de fundo do solo.

O NDWI, diferente do NDVI, utiliza duas bandas de infravermelho próximo, localizadas nos comprimentos de onda de aproximadamente 0,86 micrômetros e 1,24 micrômetros, exemplificado na Equação 2:

$$NDWI = \frac{(\rho_{0,86 \mu m} - \rho_{1,24 \mu m})}{(\rho_{0,86 \mu m} + \rho_{1,24 \mu m})} \quad (2)$$

Onde: ρ é a refletância na superfície da Terra que corresponde ao comprimento de onda especificado acima.

Devido ao fato que ambos comprimentos de onda utilizados no NDWI são sensíveis a diversas camadas de folhas na cobertura vegetal, esse índice é capaz de medir a quantidade total de água líquida na planta. Com a utilização de comprimentos de ondas diferentes, o NDWI, proposto por Gao (1996), é complementar ao NDVI e não o substitui. O sensor de infravermelho próximo tem capacidade de medir de maneira imprecisa até 8 camadas de folhas, enquanto o

sensor de vermelho tem capacidade de medir somente uma camada, por conta da grande absorção da clorofila neste comprimento de onda (GAO, 1996).

2.4.2.3 Índice de diferença normalizada para áreas construídas (NDBI)

Zha et al. (2003) desenvolveram o Índice por Diferença Normalizada para construções capaz de distinguir áreas urbanas.

O NDBI é utilizado para a rápida identificação de áreas urbanas e ilhas de calor baseados na refletância do infravermelho próximo e infravermelho médio, como é demonstrado pela Equação 3 (FRANÇA et al., 2012).

Zha et al. (2003) definiram a banda 5 do Landsat TM 5 correspondente ao comprimento de onda do infravermelho próximo médio e a banda 4 do mesmo satélite correspondente ao comprimento de onda do infravermelho próximo. Esses comprimentos de onda correspondem respectivamente a um intervalo de 1,55 a 1,75 e 0,76 a 0,9 micrômetros.

$$NDBI = \frac{(\rho_{1,55 \text{ a } 1,75 \mu m} - \rho_{0,76 \text{ a } 0,90 \mu m})}{(\rho_{1,55 \text{ a } 1,75 \mu m} + \rho_{0,76 \text{ a } 0,90 \mu m})} \quad (3)$$

Onde: ρ é a refletância na superfície da Terra que corresponde ao comprimento de onda especificado acima.

Índices são aplicados a fim de obter informações à respeito da vegetação ou de qualquer material presente na superfície da Terra. Uma tentativa é que sejam utilizados de maneira indireta para se ter informações a respeito de outras variáveis do meio ambiente, variáveis estas que estão diretamente relacionadas com o objeto de estudo. A análise multicritério é uma ferramenta que possibilita a conexão dessas variáveis e tem a capacidade de mensurar a relação e as diferentes influências de cada uma na tomada de decisão ou classificação final, baseada em fundamentos conceituais pertinentes ao assunto.

2.5 Análise multicritério

A análise multicritério é uma avaliação que combina diversos critérios, facilitando

a tomada de decisão. Existem vários modelos dentro da análise os quais são combinados com o Sistema de Informação Geográfica, facilitando a análise de diversas informações em um determinado local, que influencia uma tomada de decisão e distribui os resultados e avaliações espacialmente (SILVA, 2004).

Segundo o mesmo autor, para avaliação de pesos dos critérios, existem quatro métodos, sendo eles: métodos baseados no ordenamento de critérios, na escala de pontos, na distribuição de pontos e na comparação de critérios par a par, o qual em outras literaturas é conhecido como AHP (Processo de Análise Hierárquica) (CAPILLA, et al. 2015; KÜÇÜKDOĞAN, et al. 2015). Em seguida é feita a normalização dos critérios, para que possam ser comparados em uma mesma escala de influências. A normalização, em sua essência, é igual ao processo utilizado na lógica *fuzzy*.

Para Capilla et al. (2015), os métodos de análise multicritério aplicados pelo processo de análise hierárquica são ferramentas fundamentais para selecionar a localização ótima de qualquer tipo de infraestrutura, onde pode ser difícil ou mesmo impossível de conhecer as relações existentes entre diferentes critérios ou, fatores influentes sem o uso de um estudo espacial sob esta mesma análise, que ao ser introduzida em um SIG permite a visualização da distribuição espacial em áreas mais ou menos aptas para a construção de uma determinada infraestrutura.

De acordo com Kremer (2016), a combinação de uma abordagem da paisagem para o serviço do ambiente com o procedimento de análise multicritério pode informar uma decisão holística que leva em conta diversos fatores de um sistema, sendo uma ferramenta para avaliar e melhorar o planejamento urbano de forma interativa.

Como exemplo, Küçükdoğan (2015) afirmou que, com relação ao uso de antibióticos em animais de pastagem, embora exista inconsistência entre o resultado da análise e a realidade do sistema natural, a capacidade de monitoramento, análise espacial e dados de atributo das técnicas de análise multicritério, mesmo que subjetivas, quando associadas a um Sistema de Informação Geográfica podem ser sugeridas como um método eficiente para a criação de mapas de risco ao meio ambiente. Walke (2012) concorda que a geração de um banco de dados geoespacial de parâmetros do solo em SIG, sobreposta a uma análise multicritério, demonstrou eficácia na análise integrada de aptidão da terra para a cultura do algodão.

Dentro de uma natureza espacial, são utilizados dois procedimentos, sendo eles

a Combinação Linear Ponderada (CLP) e a Média Ponderada Ordenada (MPO). A CLP faz uso de todos os critérios a fim de obter uma classificação final compensatória onde os critérios terão sua influência mais próxima do real, permitindo também o cruzamento de influências dos diversos critérios e seus respectivos pesos. A MPO é uma extensão da CLP onde sua aplicação depende da ordenação dos fatores que agregam do mais baixo para o mais alto (SILVA, 2004).

Diversos sistemas de apoio à tomada de decisão para diferentes finalidades têm sido desenvolvidas ou adaptadas para operarem em ambiente SIG, destacando-se os que tem por base a Análise Multicritério, como por exemplo Análise Booleana, Combinação Linear Ponderada e Média Ponderada Ordenada (VETTORAZZI, 2006).

Outro exemplo é na determinação de áreas prioritárias para restauração/recomposição florestal, que segundo Nossack (2012), a Combinação Linear Ponderada determinou áreas potencialmente importantes para a conquista dos objetivos e a Média Ponderada Ordenada se mostrou uma ótima ferramenta de suporte à decisão, sendo um método recomendado para a definição de áreas prioritárias pois se adéqua as problemáticas sociais envolvidas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A Fazenda Experimental Lageado situa-se no município de Botucatu, nas coordenadas de Datum SIRGAS 2000, projeção em UTM zone 22 7469171 m e 7477203 m e 762937 m e 764798 m. A área possui 940,4 ha que inclui os departamentos e administração, como também os locais de atividades agrícolas (Figura 1). A estrada de ligação ao distrito de Vitoriana corta a Fazenda de Norte a Sul, com uma extensão aproximada de 8 Km (CARVALHO; ESPÍNDOLA; PACCOLA, 1983).

3.1.1 Clima

Segundo a classificação climática de Koppen, o clima da região é Cwa (Clima subtropical de inverno seco e verão quente), com temperatura média anual de 20,7 °C e 1358,6 mm anuais de chuva pelo Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI, 2015).

3.1.2 Geologia

Segundo Instituto Geográfico e Geológico, citado por Carvalho, Espíndola e Paccola (1983), baseado no mapa geológico do estado de São Paulo, na Fazenda Experimental Lageado ocorrem, principalmente, terrenos de Formação Serra Geral, onde os basaltos, por conta do intemperismo, vão originar diferentes solos, sendo que esses materiais se encontram misturados com materiais mais grosseiros (sedimentos neocenozóicos).

Os basaltos da Formação Serra Geral junto com os arenitos da Formação Botucatu sustentam a chamada Cuesta de Botucatu. A Formação Serra Geral, Grupo São Bento, é predominantemente composta por rochas vulcânicas sob a forma de derrames basálticos (PETRI; FÚLFARO, 1983) que afloram, no estado de São Paulo, na parte superior das escarpas das cuestas basálticas e em morros testemunhos isolados por conta da erosão. Também podem emergir nos planaltos que bordeiam as cuestas e em locais onde os cursos d'água desgastaram as

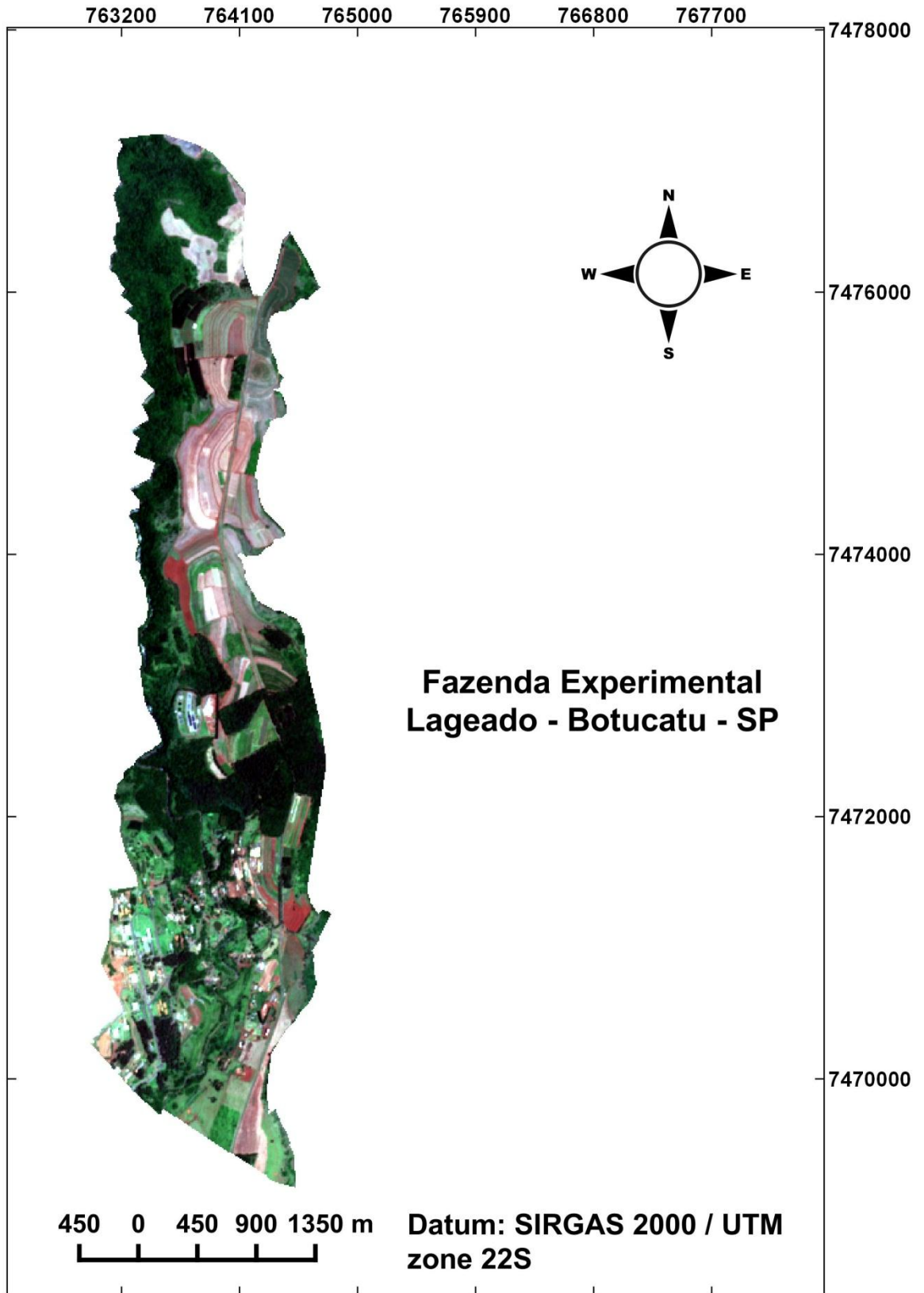
formações areníticas superiores (IPT, 1981).

As Formações Cenozóicas ocorrem com maior evidência em cotas mais elevadas. Os sedimentos neocenozóicos são formados a partir de retrabalhamento, no cenozóico, de materiais de áreas circunvizinhas, em geral com grande contribuição de arenitos (CARVALHO; ESPÍNDOLA; PACCOLA, 1983).

3.1.3 Relevo

A Fazenda Experimental Lageado localiza-se sobre o Planalto Ocidental ,em relação à cuesta basáltica, principalmente em locais que ocorrem sedimentos neocenozóicos, onde também existe uma área de baixada a 150 metros a noroeste (CARVALHO; ESPÍNDOLA; PACCOLA, 1983).

Figura 1 – Fazenda Experimental Lageado/Botucatu – SP



Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

3.1.4 Solos

Para Carvalho et al. (1983), existem oito tipos de solo na Fazenda Experimental Lageado, sendo estes atualizados segundo a classificação da Embrapa (2013):

- a) NVd₁ – NITOSSOLO VERMELHO Distrófico textura argilosa ou muito argilosa – Unidade de Mapeamento Lageado – Solos com saturação por bases baixa na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B;
- b) RLd – NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico substrato basalto – Unidade de Mapeamento Litossolo Lageado – Solos com horizonte A diretamente sobre a rocha ou sobre horizonte C ou Cr ou sobre material com 90% ou mais de sua massa constituída por cascalhos, calhaus e matacões;
- c) LVd – LATOSSOLO VERMELHO Distrófico textura média – Unidade de Mapeamento Patrulha - Solos com saturação por bases baixa na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B
- d) LVdf₁ – LATOSSOLO VERMELHO Distroférico textura argilosa – Unidade de Mapeamento Túnel - Solos com saturação por bases baixa e alto teor de Ferro, ambos na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B.
- e) LVdf₂ – LATOSSOLO VERMELHO Distroférico textura média/argilosa – Unidade de Mapeamento Venda Seca - Solos com saturação por bases baixa e alto teor de Ferro, ambos na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B.
- f) LVdf₃ – LATOSSOLO VERMELHO Distrófico transição para NVd- NITOSSOLO VERMELHO Distrófico textura média – Unidade de Mapeamento Boca da Serra;
- g) NVd₂ – NITOSSOLO VERMELHO Distrófico transição para LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, textura média/argilosa – Unidade de Mapeamento Experimental;
- h) RYbd - NEOSSOLO FLÚVICO Distrófico – mal drenado – Unidade de Mapeamento Lavapés – Solos derivados de sedimentos aluviais com horizonte A ausente sobre camada ou horizonte C e que apresentam caráter flúvico dentro de 150 cm de profundidade;

Segundo EMBRAPA (2013), Latossolo vem do latim *lat*, “material muito alterado”,

conotativo de solos intemperizados, horizonte B latossólico, normalmente são solos profundos e tem sequência de horizontes com pouca diferenciação de sub-horizontes e transições difusas ou graduais. De um modo geral o teor de argila aumenta ou se mantém constante com a profundidade e são tidos como solos ácidos; Nitossolo vem do latim *nitidus*, “brilhante”, conotativo de superfícies brilhantes nas unidades estruturais, textura argilosa ou muito argilosa; Neossolo vem do grego *Neo*, “novo”, conotativo de solos com pouco desenvolvimento pedogenético, são constituídos por material mineral ou material orgânico com menos de 20 cm de espessura, não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico.

3.2 Material

3.2.1 Cartas

As cartas utilizadas são matérias - primas fundamentais para o georreferenciamento das imagens de satélites, pois essas resultam de um trabalho de fotogrametria capaz de estimar curvas de nível com relativa precisão em grandes áreas. Essas cartas foram obtidas no site do IGC (Instituto Geográfico e Cartográfico) e possuem escala de 1:10.000, com distância vertical de cinco metros entre as curvas. Além do georreferenciamento, a carta foi a base para o cálculo de declividade e altitude, pela confecção do modelo digital de elevação.

3.2.2 Imagens

As imagens foram obtidas por sensores de satélites capazes de captar ondas eletromagnéticas com comprimentos de ondas específicos, dentro ou não do espectro visível, advindas da refletância da superfície terrestre.

Nesta pesquisa foram utilizadas imagens do satélite Sentinel 2A, lançado em 23 de Junho de 2015, cujo sensor é o MSI (*Multi-Spectral Instrument*) o qual possui 13 bandas. Sua resolução espacial é de 10 metros para as bandas do visível e infravermelho próximo, 20 metros para as bandas vermelho de onda longa/infravermelho de onda curta e 60 metros para três bandas de correção atmosférica, a resolução temporal é de vinte dias. A imagens utilizadas foram de 06

de Dezembro de 2016.

3.2.3 Geotecnologias

As imagens de satélites, assim como as cartas, foram trabalhadas nos programas de computador de livre acesso QGIS e SNAP. Esses programas são denominados geotecnologias.

O QGIS, que foi o programa mais utilizado, é um Sistema de Informações Geográficas livre e colaborativo. É um projeto oficial da OSGeo (*Open Source Geospatial Foundation*) funcionando nos sistemas operacionais Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android, que suporta arquivos vetor, raster e formatos de banco de dados, tendo também outras funcionalidades (OSGEO, 2017).

3.2.4 Equipamentos utilizados para análise física do solo

Os dados de análise física do solo foram obtidos de amostras coletadas em campo com o auxílio de retroescavadeira, um castelo (instrumento que auxilia a penetração do anel no solo) e anel volumétrico de 50 cm³ para a coleta indeformada do solo. Dentro do laboratório foram utilizadas bandejas, água para saturação das amostras, balanças, mesa de tensão e estufa. Os valores de resistência à penetração de cada ponto amostral foram obtidos por meio de um penetrômetro da Falker, cujo modelo é semelhante ao PLG5300, que é um medidor eletrônico de compactação dotado de ponteira cônica metálica e sistema informatizado de coleta e armazenamento de dados em campo. Existem dois tipos de cone para este equipamento, dos quais foi utilizado apenas o cone do tipo 2. Para a transferência de dados de resistência à penetração foi utilizado o programa “Falker – Compactação do solo”.

Todos os pontos de amostragem foram coletados em coordenadas obtidas por meio de um GPS da marca Garmin, com precisão aproximada de 3 metros.

3.3 Metodologia

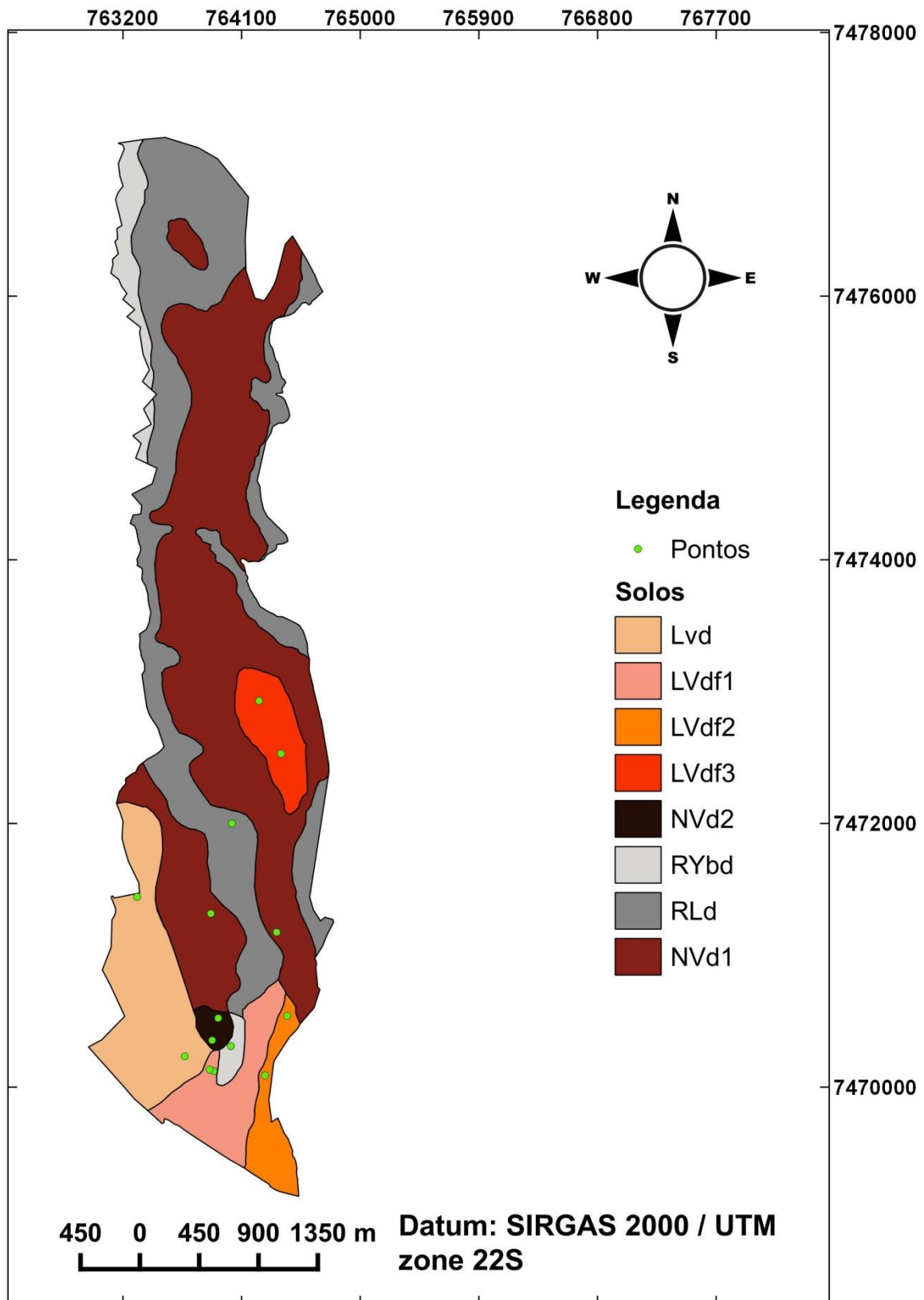
3.3.1 Dados de Campo

Foram coletadas amostras de solo georreferenciadas para análise física em pontos indicados na Figura 2 da Fazenda Experimental Lageado, que serviram para estimar o potencial de permeabilidade. Além da coleta de solo para análise física, foram coletados dados de resistência à penetração para cada ponto.

Para a seleção dos pontos amostrais, foram utilizados como critério dois pontos por classe de solo da Fazenda Experimental Lageado, assim como a acessibilidade à estes locais.

Na Figura 2 está apresenta a dispersão espacial dos pontos amostrais na área da Fazenda Experimental Lageado.

Figura 2 – Pontos Amostrais



3.3.1.1 Coleta de dados para análise física do solo

As amostras para análise física do solo foram coletadas nos dias 04, 05, 08 e 09 de Setembro de 2016, para posterior análise no laboratório de física do solo do Departamento de solos e recursos ambientais da Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu. O critério para a data de coleta foi a disponibilidade de equipamento (retroescavadeira), mão de obra (tratorista) e condições temporais. Em cada ponto com coordenadas conhecidas foram retiradas duas amostras, uma a 20 cm de profundidade e outra a 60 cm de profundidade. Com o auxílio de um castelo, foram utilizados anéis de 50 cm³ para a coleta indeformada de solo.

Segundo a metodologia de Leamer e Shaw, em 1941, citado por Embrapa (1997), os anéis foram saturados em uma bandeja com água durante um período de 24 horas (Figura 3) e posteriormente pesados. Após pesados foram levados para uma mesa de tensão onde as amostras receberam uma tensão de 6 kPa (referente a uma coluna d'água de 60 cm) por um período de 24 horas (Figura 4). Na mesa de tensão o solo perdeu água dos macroporos e não perdeu água dos microporos. Após pesadas, as amostras de solo foram levadas a uma estufa, onde ficaram por um período de 24 horas a 105°C e novamente pesados quando retirados. Na estufa, o solo perdeu a água retida em seus microporos e água higroscópica. A partir destes dados obtiveram-se os valores de macroporosidade do solo (cm³/cm³).

Figura 3 – Anéis Volumétricos Saturados



Figura 4. Mesa de Tensão



Por meio da metodologia citada acima, com as Equações 4, 5 e 6 foram obtidos os valores de porosidade total, microporosidade e macroporosidade em cm^3/cm^3 .

$$P_t = \frac{(P_{sat} - P_s)}{V_a} = V_{Pt}/V_s \quad (4)$$

Onde: P_t = Razão volumétrica de Porosidade Total; P_{sat} = Peso da amostra saturada; P_s = Peso da amostra após estufa; V_a = Volume do anel; V_{Pt} = Volume de total de poros; V_s = Volume da amostra de solo.

$$Mi_p = \frac{(P_t - P_s)}{V_a} \quad (5)$$

Onde: Mi_p = Razão volumétrica de microporos; P_t = Peso da amostra após mesa de tensão; P_s = Peso da amostra após estufa; V_a = Volume do anel.

$$Ma_p = P_t - Mi_p \quad (6)$$

Onde: Ma_p = Razão volumétrica de macroporos; P_t = Razão volumétrica de Porosidade Total; Mi_p = Razão volumétrica de microporos.

3.3.1.2 Dados de resistência à penetração

Estes dados foram coletados em data diferente das datas de amostras de solo pois, no mês de setembro, o solo estava muito seco e a penetração do cone tornou-se inviável, sendo assim a coleta de dados de resistência à penetração foi realizada no dia 06 de dezembro de 2016. Para cada coordenada foram coletados 3 pontos dentro de um raio de 2 metros, onde foram feitas as médias desses valores.

Por meio da coleta de dados em campo obteve-se uma tabela com os dados de resistência à penetração em Kpa para cada intervalo de 5cm de profundidade, no qual o equipamento estava configurado para uma leitura até a profundidade de 60 cm.

3.3.2 Aquisição de imagens

As imagens foram adquiridas por meio da European Space Agency (ESA) que é uma plataforma que possui sua sede em Paris e um portal de acesso possível para fazer o *download* das imagens em formato (.safe) no nível 1C, que é uma nomenclatura da ESA para identificar imagens que já tiveram algum tipo de correção, ou seja, seus números digitais foram transformados para refletância, assim como outras correções primárias, correção topográfica, por exemplo.

3.3.3 Processamento das Imagens

Com o uso do programa de computador próprio da ESA, o SNAP (Sentinels Applications Platform) foram confeccionadas as correções atmosféricas utilizando as bandas específicas para este fim (bandas de resolução espacial de 60 metros). Dentro deste programa foi utilizada uma ferramenta denominada Sen2Cor que transformou a refletância no topo da atmosfera em refletância na superfície da Terra.

Além das correções atmosféricas foram aplicados, dentro de um ambiente SIG, os índices de vegetação, de construção e de água (NDVI, NDBI e NDWI, respectivamente) com o uso do programa de acesso livre, QGis, no qual foi utilizada uma calculadora raster para a aplicação dos índices nas imagens já corrigidas.

3.3.4 Variáveis para análise multicritério

3.3.4.1 Macroporosidade

Os dados adquiridos em campo sustentaram a tomada de decisão e a ponderação dentro da análise multicritério, que segundo Sampaio (2006), a macroporosidade possui correlação de 96% com a permeabilidade do solo. Para a macroporosidade foram analisadas duas profundidades, uma a 20 cm e outra a 60 cm, sendo que as duas são variáveis distintas para a análise do potencial de permeabilidade do solo.

3.3.4.2 Resistência a penetração

Assim como a macroporosidade, os dados de resistência à penetração sustentarão a tomada de decisão na análise multicritério, que possui uma relação inversa de 81% com a permeabilidade do solo (SAMPAIO, 2006). Para os dados de resistência à penetração foram utilizadas duas médias de profundidade, sendo uma variável a média entre 0 e 30 cm e outra variável a média de 25 a 55 cm.

3.3.4.3 Uso do solo

Baseado na literatura (Andreola et al., 2000; Dantas et al., 2012; Figueiredo et al., 2009; Flowers e Lal, 1998; Lanzaova et al., 2007;) e na caracterização dos usos do solo por visitação a campo, foi realizado uma ordem de influência na permeabilidade de acordo com uso do mesmo, ao passo que cada uso tem um peso de influência no potencial de permeabilidade na análise multicritério. Os dados de uso de solo são correspondentes aos pontos georreferenciados usados anteriormente.

3.3.4.4 Declividade

Baseado na carta do Instituto Geográfico e Cartográfico, com escala 1:10.000, foi processado o mapa de declividade para a Fazenda Experimental Lageado. O mapa foi realizado dentro do programa QGIS através de um modelo digital de elevação, seguido da interpolação dos dados. Cada valor de declividade, que teve como base a separação em plano, suave ondulado, ondulado, forte ondulado, montanhoso e escarpado (LEPSCH et al, 1991), tem uma classificação de potencial de permeabilidade na análise multicritério que, segundo Nicolete (2015), no estudo da bacia do rio Pardo – Pardinho/SP, quanto maior a declividade de um terreno menor é seu potencial de infiltração de água.

3.3.4.5 Índices de vegetação

Os mapas de cada índice foram gerados a partir da aplicação das equações em imagens referente a data de 06 de Dezembro de 2016. Em cada mapa e em cada coordenada conhecida foram feitas as médias dos oito pixels mais próximos do pixel referente ao ponto georreferenciado, totalizando uma média de nove pixels, seguindo a metodologia do filtro passa-baixa para a atenuação do contraste (DPI-INPE, 2017). Cada índice tem um peso de influência no potencial de permeabilidade do solo na análise multicritério.

3.3.5 Análise multicritério

Segundo Saaty (1987), a análise hierárquica é uma teoria geral de mensuração que trabalha com a classificação de pesos para cada variável, ao passo que essa ponderação baseia-se no entendimento teórico conceitual (intangível), assim como no conhecimento tangível e mensurável das diferentes influências que cada variável possui em relação às outras para um determinado objetivo. Um aspecto importante desta análise é a ideia de consistência, ou seja, se uma comparação par a par for mutuamente proporcional e não for contraditória, existe consistência na ponderação.

Antes da comparação par a par de todas as variáveis para posterior verificação da permeabilidade do solo, estas foram normalizadas, deixaram de ter suas unidades particulares para poderem ser comparadas e interpretadas.

Todas as variáveis utilizadas foram enquadradas em uma escala que variou de 0 a 1, ao passo que 0 a permeabilidade é baixa e 1 a permeabilidade é alta, ou seja, elas se tornaram padronizadas e deixaram de ter cada uma sua unidade característica. Para a normalização dos índices de vegetação foram coletados valores discriminatórios de cada uso do solo observados no histograma de cada mapa para o enquadramento na nova classificação.

Para iniciar a análise foi necessário hierarquizar as variáveis para posterior comparação par a par. Esta comparação é processada por meio da construção de uma matriz de dados onde o número de colunas e linhas corresponde ao número de variáveis analisadas, na qual as células são preenchidas com a comparação da importância relativa de cada par de variáveis dentro de uma escala de nove níveis numéricos de importância para o objetivo de estudo, que é o potencial de permeabilidade do solo.

Por meio de processos intermediários (cálculos com valores derivados da matriz) chegou-se ao valor de CI (Índice de Consistência). O valor de CI, segundo Saaty (1987), deve ser inferior a 10% do RI (Índice de Consistência de Aleatoriedade), valor este tabelado, que varia de acordo com o número de variáveis a serem analisadas. Por fim o CR (Taxa de Aleatoriedade), que é o CI/RI deve, portanto, ser inferior a 0,1, que mensura a coerência e efetividade da análise.

A análise da permeabilidade foi elaborada baseada na metodologia do processo hierárquico, criado por Saaty (1977).

3.3.5.1 Ponderação das variáveis

A ponderação dos dados é feita por meio da construção de uma Matriz Inversa de dados, preenchida com o peso das comparações par a par (o número de linhas e colunas corresponde ao número de variáveis a serem analisadas). A Tabela 1 exemplifica a distribuição dos pesos na matriz.

Tabela 1 - Matriz de comparação das variáveis

	A ₂	A ₂	...	A _n
A ₁	W ₁ /W ₁	W ₁ /W ₂	...	W ₁ /W _n
A ₂	W ₂ /W ₁	W ₂ /W ₂	...	W ₂ /W _n
.	.	.		.
.	.	.		.
.	.	.		.
A _n	W _n /W ₁	W _n /W ₂		W _n /W _n

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

Para a comparação par a par das variáveis que compõe a matriz foi utilizado a escala de valores proposta por Saaty (1977), que está exemplificada na tabela 2.

Após o preenchimento da matriz de dados foi calculado o vetor de pesos, onde cada variável n recebe um peso w . A Equação 7 proposta por Silva et al (2004) foi utilização para a obtenções dos pesos

Tabela 2 - Escala e descrições.

Níveis de Importância	Definição	Descrição
1	Importância equivalente	As variáveis contribuem de maneira igualitária
3	Um pouco mais importante	Variável suavemente mais importante
5	Fortemente mais importante	Variável muito mais importante
7	Importância Comprovada	Variável fortemente mais importante
9	Importância Extrema	Variável Extremamente mais importante
2,4,6,8	valores intermediários	Quando um ajuste maior é necessário

Fonte: Adaptado de Saaty (1977).

$$w_i = \left(\prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{1/n} / \sum_{k=1}^n \left[\left(\prod_{j=1}^n a_{kj} \right)^{1/n} \right] \quad (7)$$

Onde W_i representa o peso de cada variável e n representa o número de variáveis.

Após a obtenção dos pesos foi calculado o valor de w' (Equação 8), que é expresso pela multiplicação da Matriz $A = [a_{ij}]$ pelo vetor e pesos w encontrado na Equação 7, para posterior cálculo do máximo *eigenvalue* (SILVA et al.,2004), que segundo Saaty (1977) pode ser encontrado pela Equação 9.

$$w' = A.w \quad (8)$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{1}{n} \left(\frac{w'_1}{w_1} + \frac{w'_2}{w_2} + \dots + \frac{w'_n}{w_n} \right) \quad (9)$$

Para a verificação da consistência do preenchimento da matriz de dados, Saaty (1977) propõe a aplicação da Equação 10, que indica o índice de consistência da matriz.

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n-1} \quad (10)$$

Posteriormente ao índice de consistência é necessário encontrar o CR (Razão de Consistência) (Equação 11), que é a razão entre o CI encontrado a Equação 10 e o RI (índice de aleatoriedade), que é um valor tabelado (Tabela 3) e que também foi proposto por Saaty (1977;1987).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (11)$$

Tabela 3 - Índice aleatório de consistência em relação ao número de variáveis analisadas

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty (1987).

Saaty (1987) afirmou que se o valor de CR encontrado na Equação 11 for superior a 0,1, houveram contradições no preenchimento da matriz de dados, sendo

necessário um novo preenchimento com novas ponderações na mesma. Valores inferiores a 0,1 indicam que a matriz foi corretamente preenchida (menor probabilidade de os dados da matriz terem sido gerados aleatoriamente) e os pesos podem ser utilizados.

3.3.5.2 Combinação linear ponderada

Por fim aplicou-se a combinação linear ponderada (CLP), na análise multicritério, obtendo-se os dados de potencial de permeabilidade para cada ponto de coordenada conhecida.

Para a aplicação da CLP aplicou-se a Equação 12, adaptada de (EASTMAN et al., 1995).

$$PP = \sum_i w_i x_i \quad (12)$$

Onde: PP é o potencial de permeabilidade, w_i é peso de cada variável x_i

Neste trabalho a metodologia citada acima foi aplicada em duas matrizes de dados, ao passo que a primeira é composta por parâmetros indiretos com maior embasamento e correlações já comprovadas com a permeabilidade do solo, enquanto a segunda matriz de dados é composta por parâmetros indiretos com menor ou nenhum embasamento na correlação com a permeabilidade do solo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos por meio da metodologia aplicada estão expostos nos itens abaixo.

4.1 Banco de Dados

O banco de dados foi composto pelo armazenamento de todos os mapas gerados durante o processamento das imagens, assim como dados adquiridos e dados brutos de campo. Por meio desse conjunto de informações foram efetuadas as análises, discussão e conclusão da metodologia aplicada.

4.1.1 Macroporosidade

Tabela 4 – Valores de macroporosidade em duas profundidades

Coordenadas		Macrop. (%)	
Longitude	Latitude	20 cm	60 cm
763867	7471317	10,63	6,66
764366	7471175	14,87	11,26
764073	7472083	25,77	14,83
764073	7472083	20,76	13,18
763669	7470234	9,35	11,84
763307	7471443	14,83	17,34
763927	7470101	12,08	22,67
763897	7470112	9,25	13,71
764353	7470692	13,81	19,09
764240	7470127	10,02	17,74
764375	7472592	7,96	18,86
764231	7472990	10,76	11,24
763931	7470577	7,52	8,58
763821	7470356	7,94	5,85
763869	7470228	30,70	15,18
763869	7470228	28,38	12,71

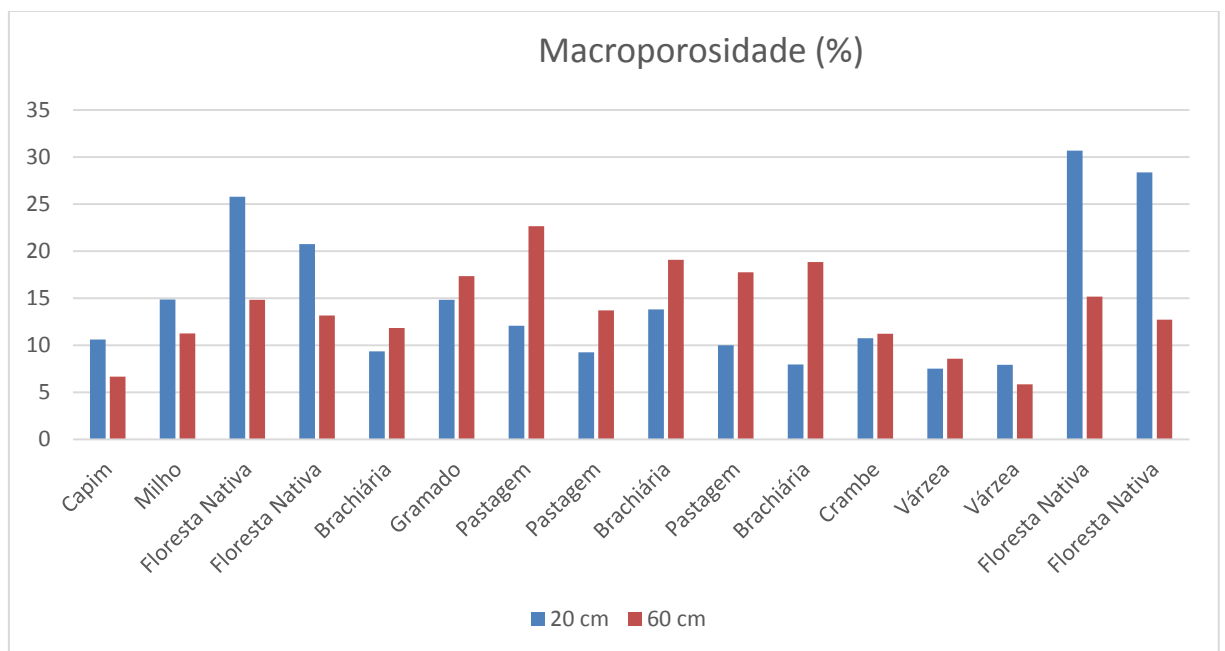
Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

Por meio dos dados de análise física do solo obteve-se a Tabela 4 com os dados médios de macroporosidade para duas profundidades diferentes, ao passo que a macroporosidade a 20 cm é uma variável e a macroporosidade a 60 cm é

outra variável.

Os maiores valores de macroporosidade foram alcançados na profundidade de 20 cm nos usos de Floresta nativa em comparação com 60 cm. Não só o uso de mata nativa, como para capim e milho a macroporosidade a 20 cm foi maior. Para a Braquiária, Pastagem e Gramado os valores à 60 cm foram superiores. Por fim, para o Crambe e a Várzea, a diferença foi insignificante para as duas profundidades. Outra maneira de analisar dados de macroporosidade do solo é por meio de termografia do infravermelho em laboratório, que é um metodologia rápida e de baixo custo (LIMA L.M.P.J et al., 2014). A Figura 5 representa as observações pontuadas.

Figura 5. Macroporosidade nos Respective Usos do Solo e Profundidades



Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

4.1.2 Resistência à Penetração

Os dados de resistência à penetração, que foram coletados nas mesmas coordenadas dos dados de análise física do solo, estão representados na Tabela 5, ao passo que os dados foram organizados com médias de duas profundidades, médias dos valores de resistência no intervalo de 0 a 30 cm e 25 a 55 cm, ambos

em KPa. A profundidade máxima de leitura foi configurada para 60 cm, contudo nos últimos 5 cm a força do equipamento foi excedida não tendo leitura para essa profundidade (para esta situação a média foi feita apenas com os dados de leitura sem exceder a força do equipamento).

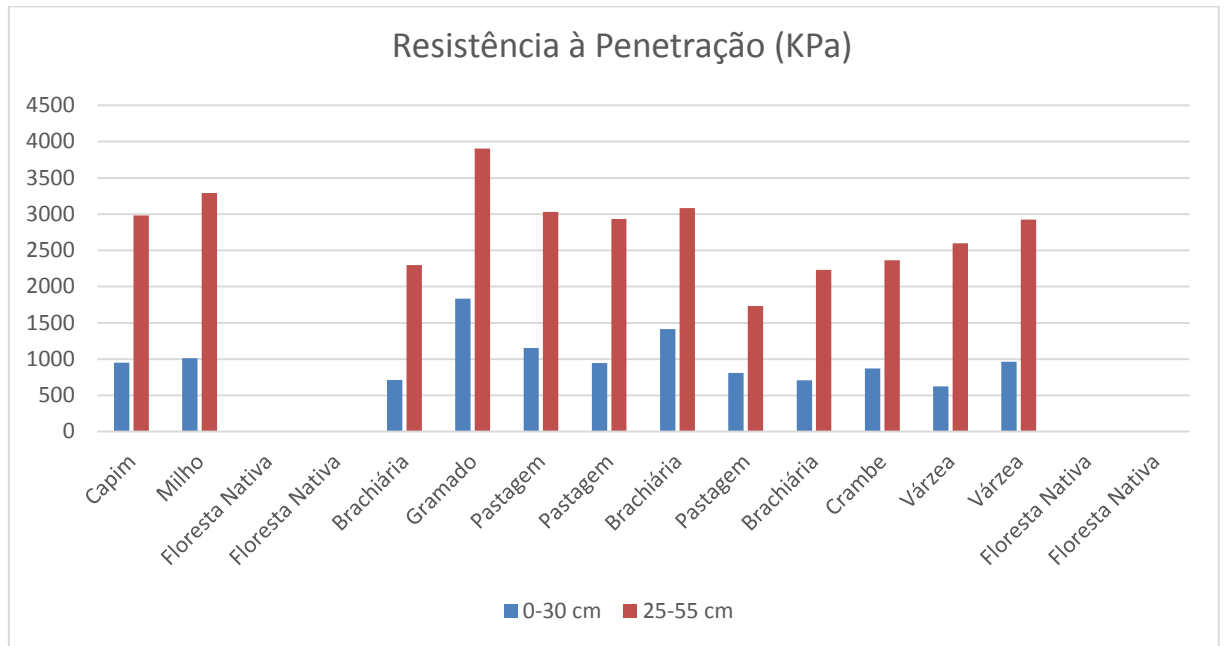
Todos os valores de resistência à penetração na profundidade de 25-55 cm foram maiores do que os valores na profundidade de 0-30 cm, independente do uso do solo. A Figura 6 representa as observações pontuadas.

Tabela 5 – Valores médios de resistência à penetração em duas profundidades

Coordenadas		Médias (Kpa)	
Longitude	Latitude	0-30 cm	25-55 cm
763867	7471317	951,94	2979,89
764366	7471175	1011,17	3290,50
764073	7472083	sem acesso	sem acesso
764073	7472083	sem acesso	sem acesso
763669	7470234	710,05	2299,17
763307	7471443	1834,44	3905,83
763927	7470101	1153,67	3031,39
763897	7470112	945,00	2933,83
764353	7470692	1414,50	3080,87
764240	7470127	807,83	1731,17
764375	7472592	709,67	2231,00
764231	7472990	869,83	2361,44
763931	7470577	625,55	2595,33
763821	7470356	963,22	2924,83
763869	7470228	sem acesso	sem acesso
763869	7470228	sem acesso	sem acesso

Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

Figura 6. Dados Médios de Resistência à Penetração



Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

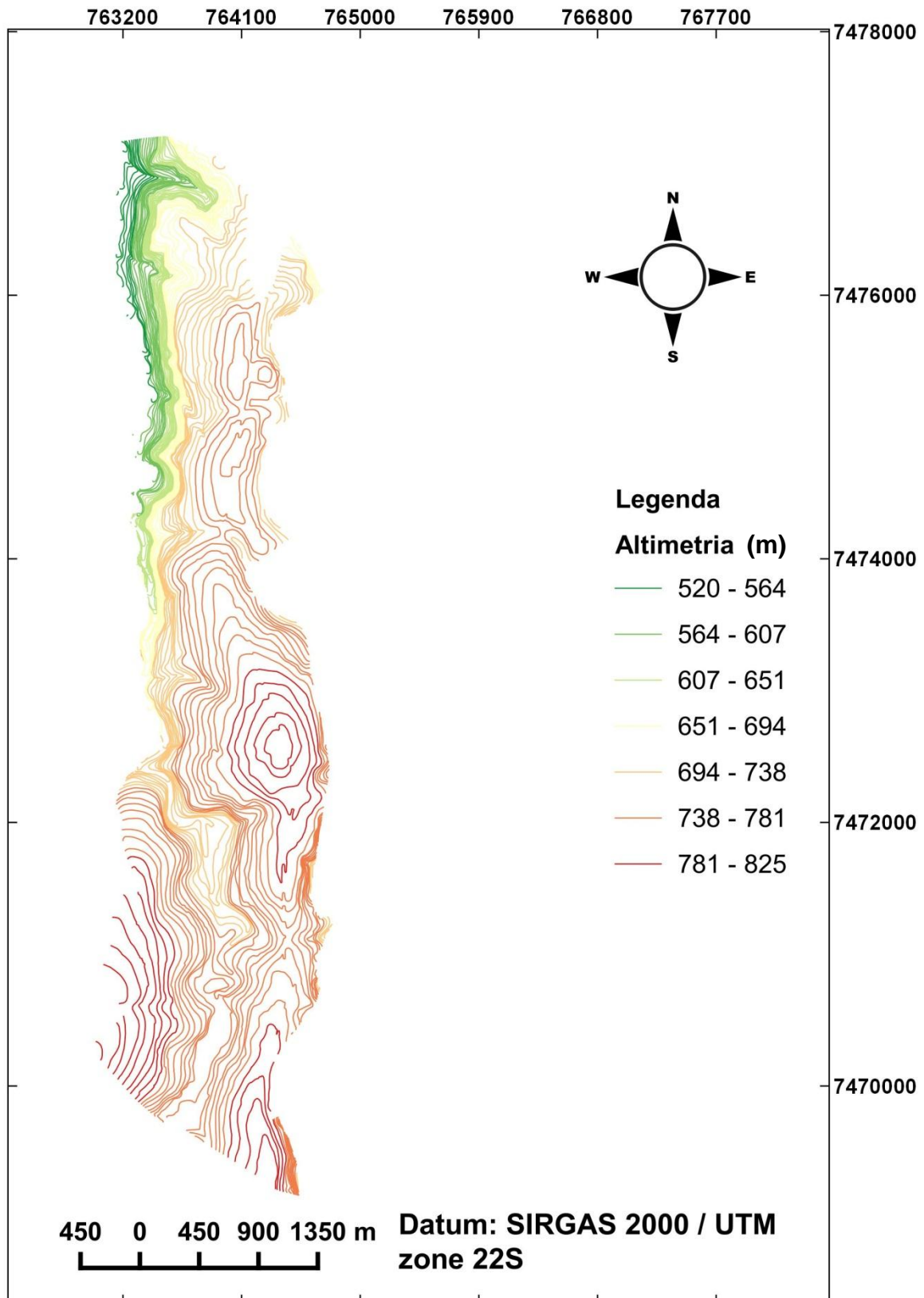
4.1.3 Declividade e uso do solo

Por meio da vetorização da carta topográfica que engloba a cidade de Botucatu, foi gerado um mapa de altimetria e, em seguida, o de declividade, ambos no programa QGis que está representado pelas Figuras 7 e 8.

A classificação do uso do solo para cada ponto amostral e a declividade de cada ponto georreferenciado estão descritos na Tabela 6.

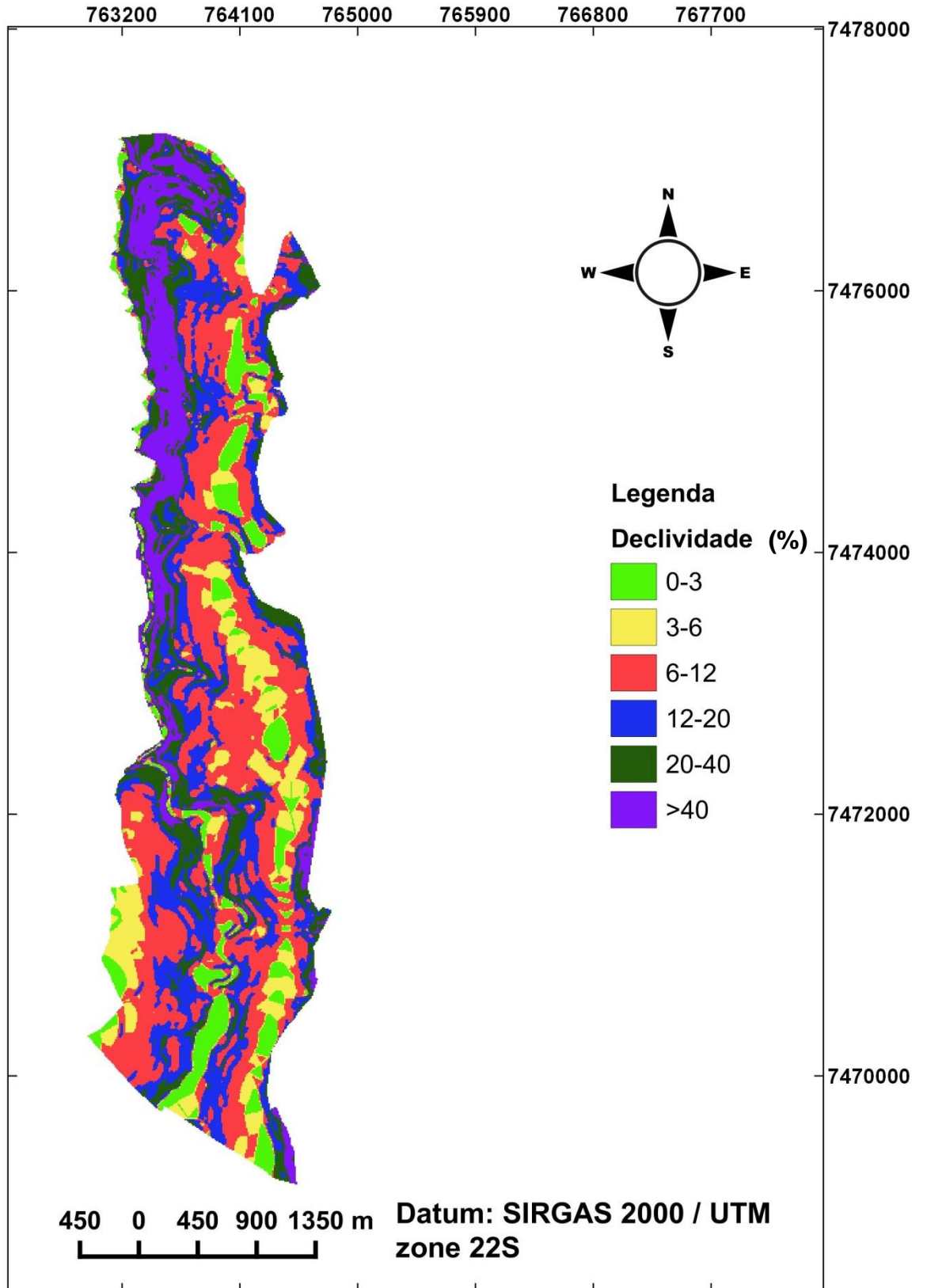
Por se tratar de valores de declividade baseados em uma carta altimétrica de baixa precisão topográfica (obtidos por fotogrametria), e também por se tratar de pontos isolados em uma área maior, os valores de declividade são aproximados.

Os valores de declividade para os pontos amostrais da área de estudo, não ultrapassaram a declividade de 40 %, sendo que a maior parte do pontos enquadraram-se na classificação de forte ondulado (12 a 20%) e locais planos (0 a 3%), tendo quatro pontos suaves ondulados (3 a 6%) e dois pontos montanhosos (20 a 40%).

Figura 7 – Altimetria da Fazenda Experimental Lageado

Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

Figura 8 – Declividade da Fazenda Experimental Lageado



Fonte: Sara M. Penachio, 2017

Tabela 6 – Dados de usos do solo e declividade

Coordenadas		Uso do solo	Declividade (%)
Longitude	Latitude		
763867	7471317	Capim	14,77
764366	7471175	Milho	13,34
764073	7472083	Floresta Nativa	23,31
764073	7472083	Floresta Nativa	23,31
763669	7470234	Brachiária	13,79
763307	7471443	Gramado	5,08
763927	7470101	Pastagem	12,35
763897	7470112	Pastagem	16,32
764353	7470692	Brachiária	4,19
764240	7470127	Pastagem	5,68
764375	7472592	Brachiária	0,00
764231	7472990	Crambe	5,24
763931	7470577	Várzea	0,00
763821	7470356	Várzea	0,00
763869	7470228	Floresta Nativa	0,00
763869	7470228	Floresta Nativa	0,00

Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

4.1.4 Índices de Vegetação

A partir dos valores encontrados nos mapas de NDWI, NDVI e NDBI obteve-se a Tabela 7 com os valores normalizados médios dos índices de vegetação aplicados à imagem de satélite

Os mapas gerados a partir da aplicação dos algoritmos referente aos índices de vegetação estão representados nas Figuras 10, 11 e 12:

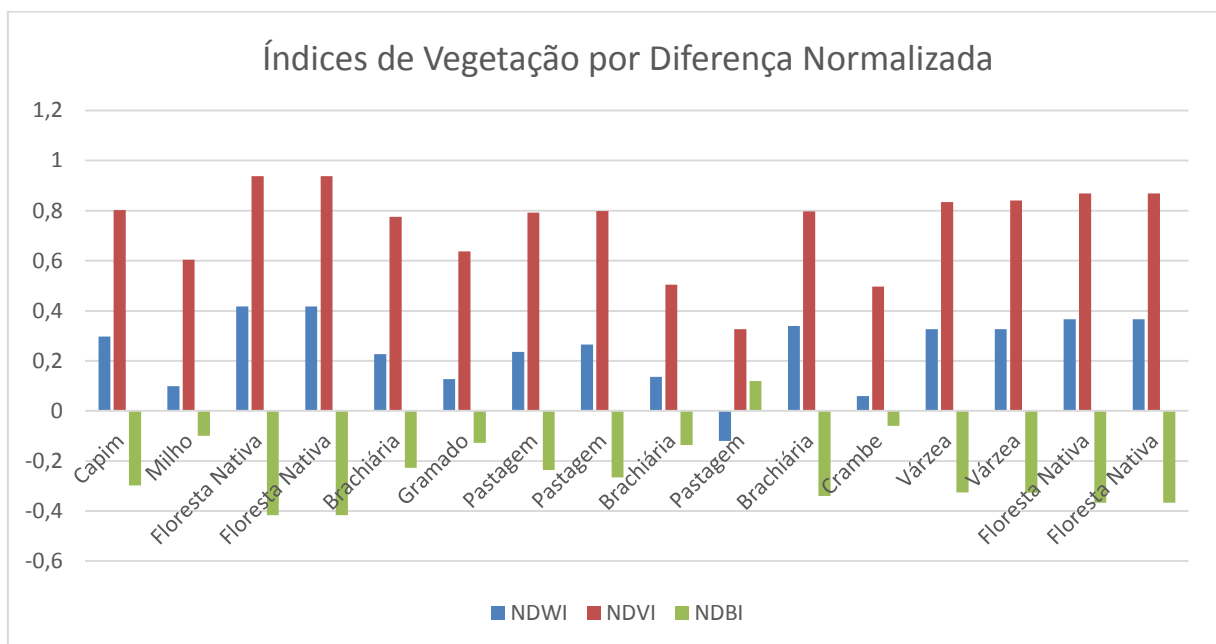
Os valores de NDBI são inversos aos de NDWI. Por se tratar de uma Fazenda Experimental com atividades de manutenção de áreas paisagísticas e de cultivos, o NDVI indicou valores médios a altos para os pontos amostrais, nos quais as áreas de vegetação nativa e várzea apresentaram os maiores valores. O ponto de pastagem cujo valor de NDWI ficou negativo e o de NDBI positivo, pode ser explicado pela baixa qualidade do pasto com grandes áreas de solo exposto. Na Figura 9 estão representadas as informações observadas.

Tabela 7 – Valores médios dos índices de vegetação por diferença normalizada

Coordenadas		Índices (Médias)		
Longitude	Latitude	NDWI	NDVI	NDBI
763867	7471317	0,30	0,80	-0,30
764366	7471175	0,10	0,60	-0,10
764073	7472083	0,42	0,94	-0,42
764073	7472083	0,42	0,94	-0,42
763669	7470234	0,23	0,78	-0,23
763307	7471443	0,13	0,64	-0,13
763927	7470101	0,23	0,79	-0,23
763897	7470112	0,26	0,80	-0,26
764353	7470692	0,17	0,50	-0,14
764240	7470127	-0,12	0,33	0,12
764375	7472592	0,34	0,80	-0,34
764231	7472990	0,06	0,50	-0,06
763931	7470577	0,33	0,83	-0,33
763821	7470356	0,33	0,84	-0,33
763869	7470228	0,37	0,87	-0,37
763869	7470228	0,37	0,87	-0,37

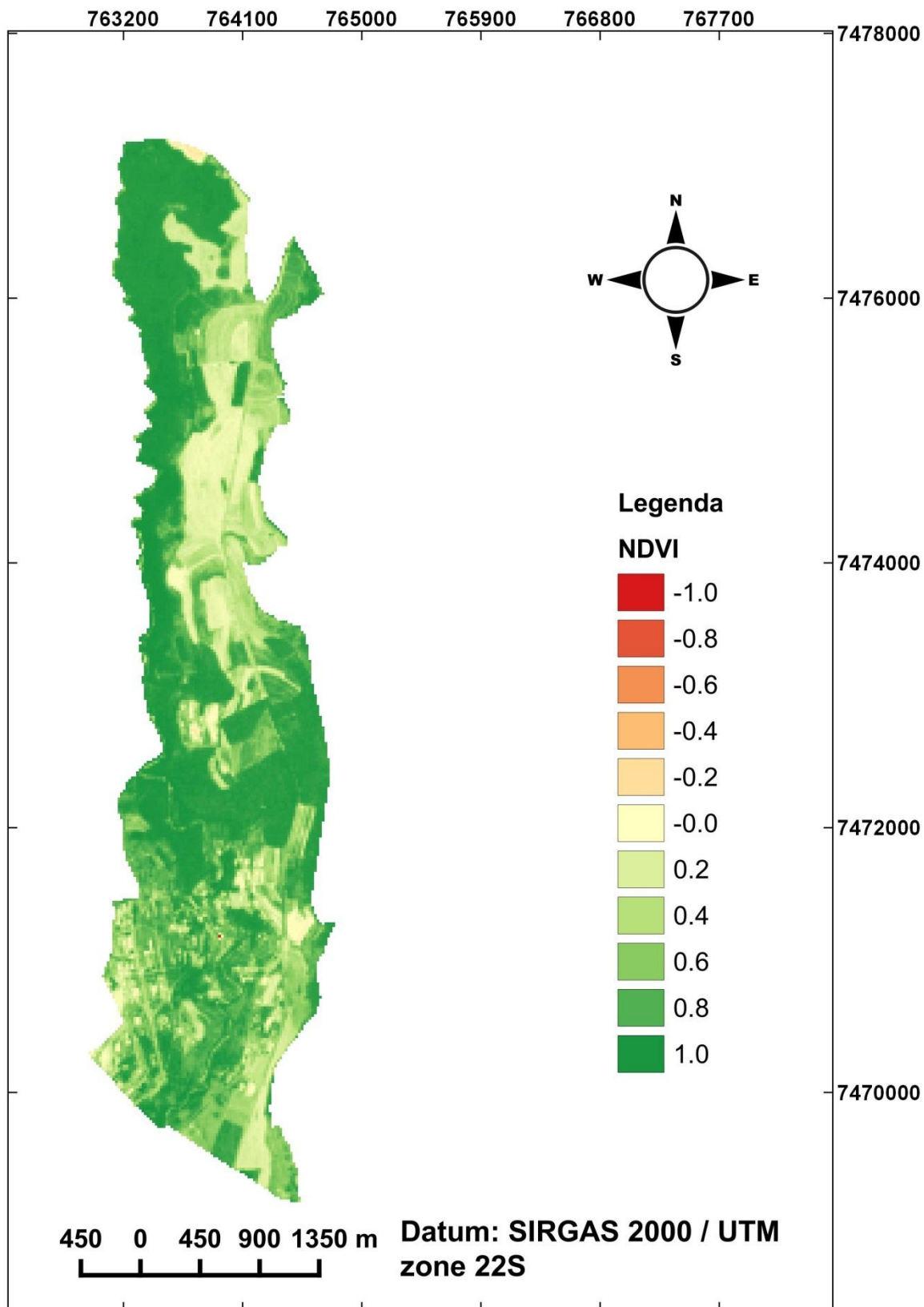
Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

Figura 9. Índices de Vegetação e Usos do solo



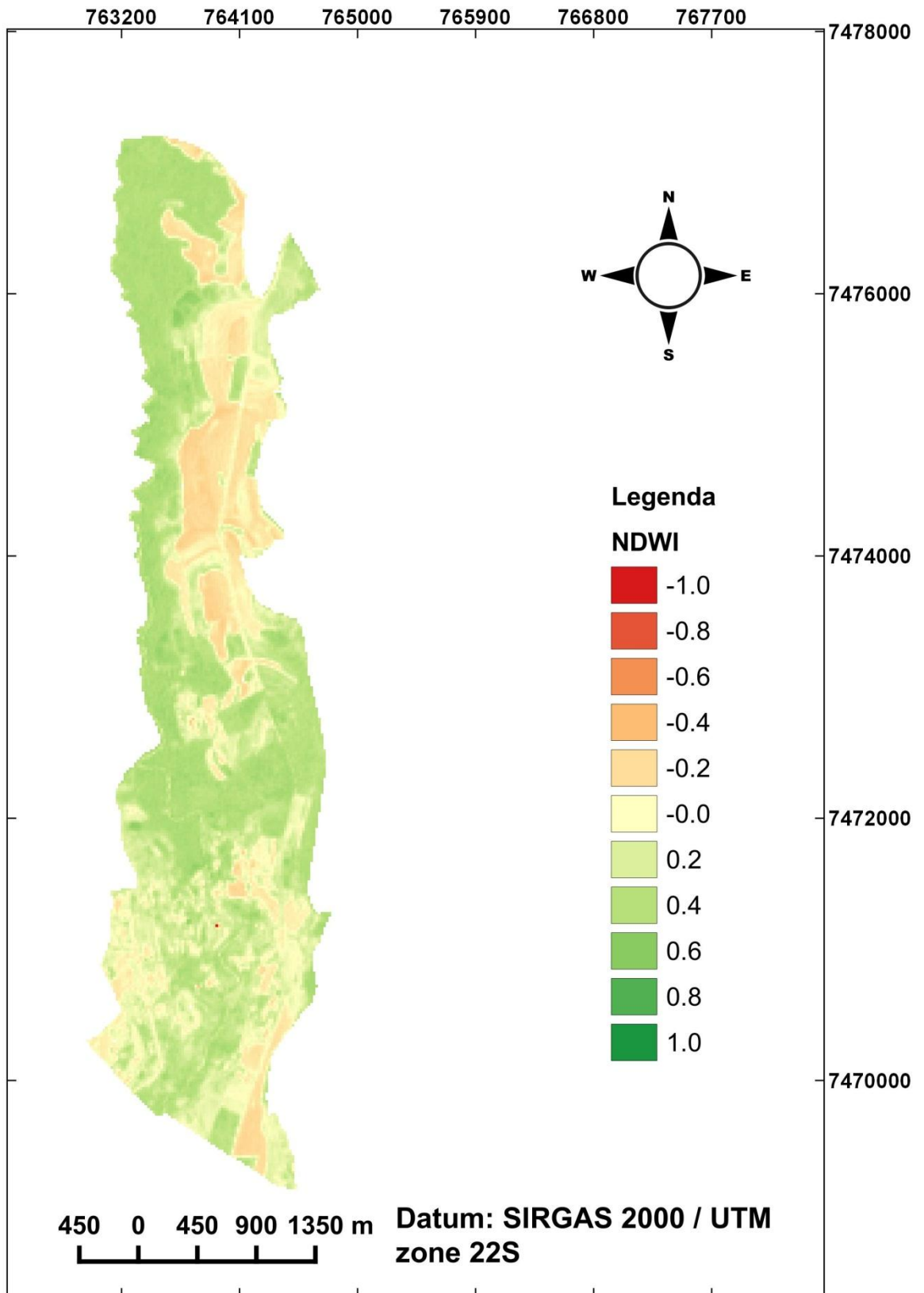
Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

Figura 10. NDVI



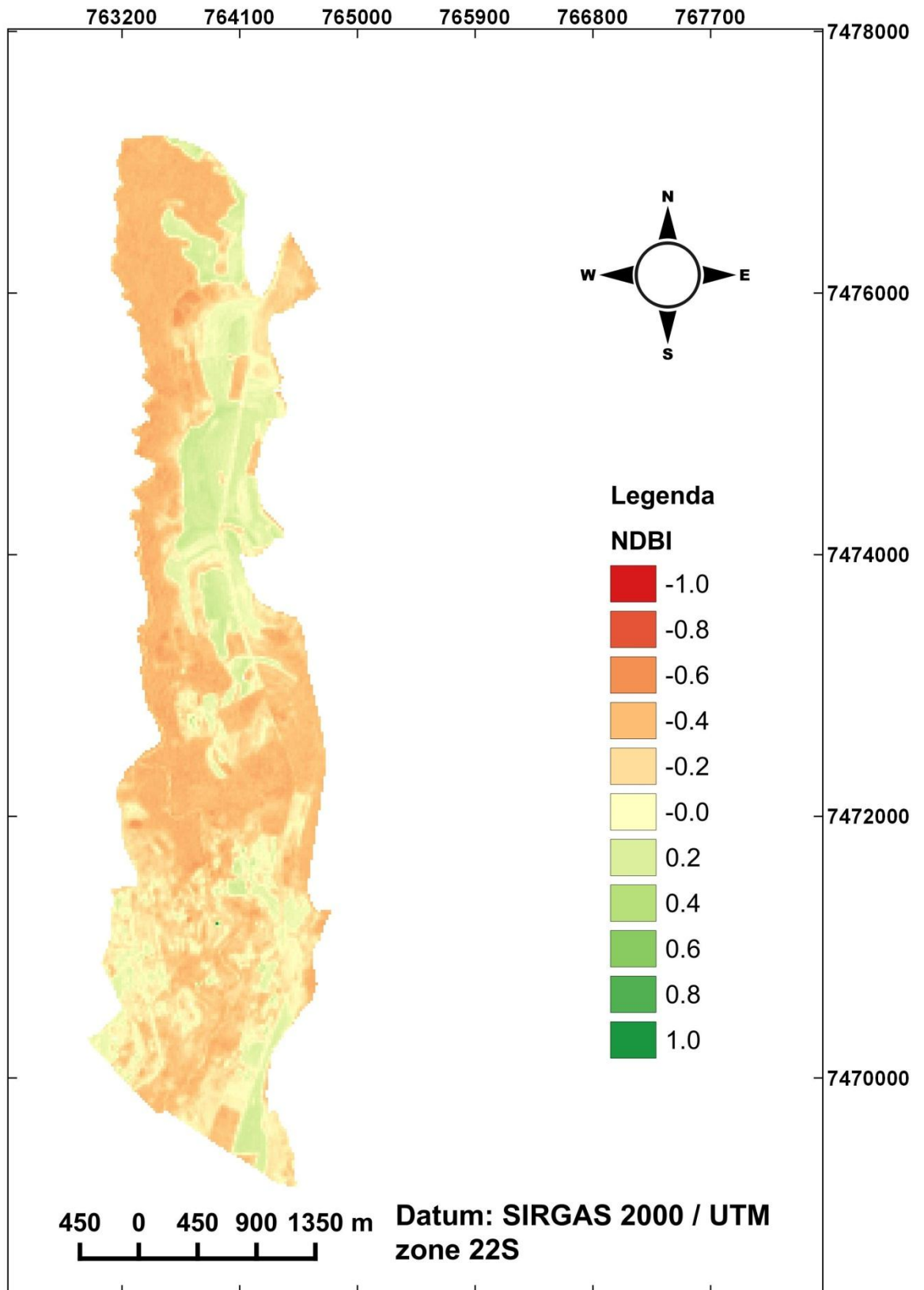
Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

Figura 11. NDWI



Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

Figura 12. NDBI



Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

O mapa de NDVI (Figura 10) mostrou que os valores mais próximos de 1 representam áreas de floresta nativa, enquanto que os valores mais baixos representam áreas de solo exposto. O valor negativo representa um corpo d'água na área de estudo. Este índice mostra de forma confiável a taxa fotossintética de uma determinada área, possibilitando diferenciar o uso de áreas de baixa taxa fotossintética do uso de áreas de alta taxa fotossintética. Por meio do mapa de NDVI é possível distinguir áreas de vegetação nativa de áreas cultivadas e de áreas de solo exposto. Para Demattê (2017) não só os atributos químicos como o tamanho das partículas do solo e a dinâmica da água em diferentes classes de solo, indicam variações nos valores de NDVI.

Na Figura 11, o menor valor do mapa representa um corpo d'água, os valores mais baixos de NDWI indicam áreas de solo exposto ou áreas com vegetação seca, enquanto que os valores mais altos indicam vegetação com alto teor de água. Diferente do NDVI, este índice é visualmente menos sensível para a visualização dos diferentes usos do solo.

O mapa de NDBI (Figura 12), representa o oposto do mapa de NDWI. O maior valor encontrado no mapa representa um corpo d'água. Os menores valores são representados por presença de vegetação e sua quantidade de água, enquanto que os maiores valores representam vegetação seca ou solo exposto.

4.2 Matrizes de dados

Tabela 8. Primeira matriz pareada

	MP 20cm	MP 60cm	RP 0-30 cm	RP 25-55 cm	Declividade
MP 20 cm	1	2	3	5	9
MP 60 cm	1/2	1	2	3	7
RP 0 - 30 cm	1/3	1/2	1	2	5
RP 25 - 55 cm	1/5	1/3	1/2	1	3
Declividade	1/9	1/7	1/5	1/3	1

Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

Tabela 9. Segunda matriz pareada

	Uso do Solo	NDWI	NDVI	NDBI
Uso do Solo	1	3	5	6
NDWI	1/3	1	3	4
NDVI	1/5	1/3	1	2
NDBI	1/6	1/4	1/2	1

Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

As tabelas 8 e 9 representam as duas matrizes de dados que serviram de base para a análise multicritério. A primeira matriz foi utilizada apenas nos locais em que obtiveram-se pontos amostrais com todas as variáveis, sendo que nos pontos em que não se teve acesso com o penetrômetro a matriz sofreu uma adaptação mantendo-se a proporção dos pesos entre as variáveis.


A primeira análise foi composta pelo conjunto de cinco variáveis (Macroporosidade a 20 cm, Macroporosidade à 60 cm, Resistência à Penetração de 0 a 30 cm, Resistência à Penetração de 25 a 55 cm e Declividade) que indicaram o potencial de permeabilidade do solo para a Fazenda Experimental Lageado. A segunda análise foi composta por quatro variáveis (Uso do Solo, NDVI, NDWI e NDBI) e foi realizada para a verificação se as variáveis uso do solo e índices de vegetação, possuem influência ou não no potencial de permeabilidade da Fazenda Lageado.

4.3 Normalização dos dados e obtenção do PP

Baseados nos conceitos pertinentes a cada variável e sua relação indireta com a permeabilidade do solo foi feita a normalização do dados em uma escala de 0 a 1, onde 0 corresponde a um baixo potencial de permeabilidade e 1 corresponde a um alto potencial de permeabilidade. Para os índices de vegetação, o critério utilizado para determinar o valor máximo normalizado, foi a alta concentração de taxa fotossintética encontrada nas áreas de floresta nativa (valor mais próximo de 1), e para determinar o valor mínimo normalizado, foi a ausência de vegetação (valor mais próximo de 0).

A Tabela 10 demonstra a lógica de normalização aplicada em cada variável e os valores lineares para cada valor normalizado.

Tabela 10. Metodologia da normalização das variáveis estudadas

Potencial de Permeabilidade						
						
	Baixa					Alta
NDVI	(-1 a 0,1)					0,95 a 1
NDWI	(-1 a -0,1)					0,5 a 1
NDBI	(0,1 a 1)					(-1 a -0,5)
Declividade						
Macrop.						
RP						
Uso do solo	Várzea	Pastag.	Milho/Crambe	Gramado	Brachi./Capim	Nativa
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1

Onde: Y= valores normalizados e X= valores com suas unidades de origem

Fonte: Sara M. Penachio, 2016.

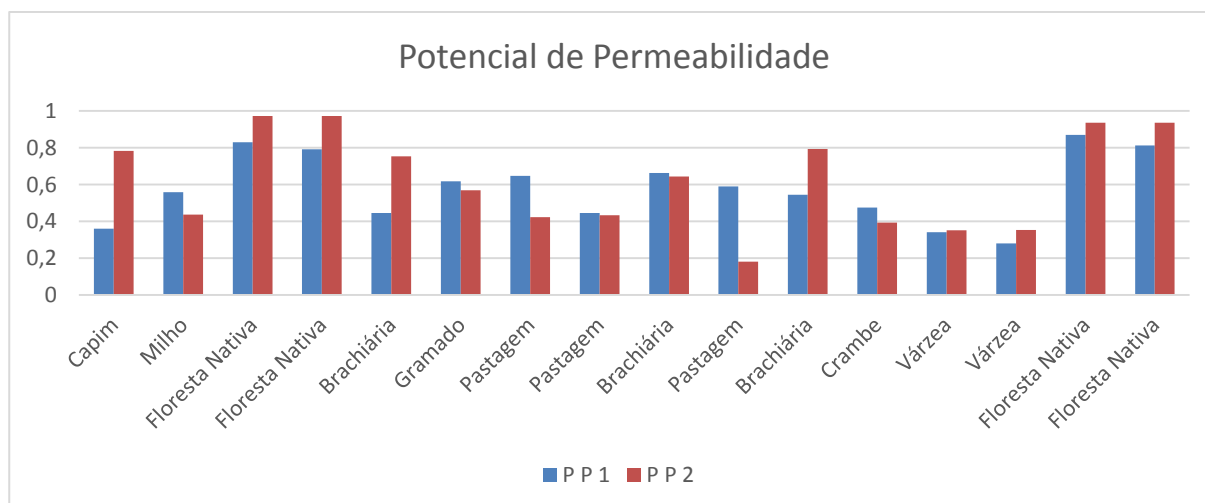
A partir dos dados normalizados e a aplicação da Análise Multicritério nas duas matrizes de dados, chegou-se nos valores de potencial de permeabilidade do solo. A Tabela 11 representa os valores de potencial de permeabilidade para cada ponto amostral.

Tabela 11. Potencial de Permeabilidade

Pontos Amostrais	Coordenadas		Potencial de Permeabilidade	
	Longitude	Latitude	P P 1	P P 2
1	763867	7471317	0,36	0,78
2	764366	7471175	0,56	0,44
3	764073	7472083	0,83	0,97
4	764073	7472083	0,79	0,97
5	763669	7470234	0,44	0,75
6	763307	7471443	0,62	0,57
7	763927	7470101	0,65	0,42
8	763897	7470112	0,44	0,43
9	764353	7470692	0,66	0,64
10	764240	7470127	0,59	0,18
11	764375	7472592	0,54	0,79
12	764231	7472990	0,47	0,39
13	763931	7470577	0,34	0,35
14	763821	7470356	0,28	0,35
15	763869	7470228	0,87	0,93
16	763869	7470228	0,81	0,93

Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

Figura 13. Comparação entre as análises multicriteriais dos dois grupos de variáveis



Fonte: Sara M. Penachio, 2017.

A partir dos potenciais de permeabilidade encontrados pelas matrizes de dados 1 e 2, aplicando-se o teste de t-student, existem evidências suficientes para afirmar

que os índices de vegetação junto com o uso do solo estão correlacionados com o potencial de permeabilidade do solo, ou seja, o valor crítico de t para $n - 2 = 14$ graus de liberdade e 1% de nível de significância é 2,977 (tabela t -student). Como o valor calculado de t (2,9973) superior ao valor crítico (tabelado), PP1 e PP2 estão correlacionados, concordando com Deshmukh et al. (2013) que afirma que o uso e cobertura do solo tem influência significativa no volume de escoamento superficial, que é a água proveniente da chuva ou irrigação não infiltrada no solo, portanto o uso e cobertura do solo tem influência direta na permeabilidade do solo, que representa a velocidade de infiltração da água no mesmo.

Os dados de uso do solo podem ser obtidos por não somente por visitação a campo como também por meio sensoriamento remoto aliado a informações climáticas e topográficas permitindo uma classificação acurada de uso e cobertura da terra (SAADAT H. et al., 2011). Uma variabilidade não mensurada de fatores influentes desconhecidos, como por exemplo, textura do solo e histórico desconhecido de fatores antrópicos, provavelmente ocorreram na área de estudo. Uma possível forma de aumentar a eficiência da metodologia aplicada, seria a utilização de uma área com menor variabilidade de fatores influentes e que sejam mais estáveis em relação ao uso e manejo. Áreas mais extensas, provavelmente, possibilitarão um melhor entendimento dos fatores que não foram estudados neste trabalho (química e textura do solo, por exemplo).

5 CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos pode-se concluir:

- a) Os índices de vegetação NDVI, NDWI e NDBI mostraram viabilidade no estudo da permeabilidade do solo;
- b) a análise multicritério foi satisfatória para verificar o desempenho dos índices de vegetação, associados ao uso do solo, para o diagnóstico do potencial de permeabilidade na área de estudo com um nível de significância de 1%;
- c) estudos temporais de usos do solo e de outras variáveis são necessários para um melhor entendimento da correlação com o potencial de permeabilidade.

REFERÊNCIAS

- ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.857-865, 2000.
- ALAM, J. et al. Permeability of stratified soils for flow normal to bedding plane. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 660-667, 2015.
- ALBUQUERQUE, E. M. et al. Análise do comportamento do NDVI e NDWI sob diferentes intensidades pluviométricas no município de Sousa-PB. **Revista Estudos Geoambientais**. Rio Tinto, v. 1, n. 1, p. 01-11, 2014.
- BARROS, C. A. P. et al. Estimativa da infiltração de água no solo na escala de bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 557-564, 2014.
- BATISTELLA, M.; MORAN, E. F. **Geoinformação e monitoramento ambiental na América Latina**. São Paulo, SENAC, 2008. 283 p.
- BORATTO, I. M. P.; GOMIDE, R. L. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 7345-7352.
- CAPILLA, J. A. J.; CARRION, J. A.; HERNANDEZ, E. A. Optimal site selection for upper reservoirs in pump-back systems. Using geographical information systems and multicriteria analysis. **Renewable Energy**, v.86. p. 429-440, ago, 2015.
- CARVALHO, W. A.; ESPÍNDOLA, C. R.; PACCOLA, A. A. **Levantamento de solos da Fazenda Lageado Estação Experimental "Presidente Médici"**. Boletim Científico da Faculdade de Ciências Agrônômicas UNESP, Botucatu, n. 1, 1983. 95 p.
- CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA - CEPAGRI - UNICAMP. **Clima dos Municípios Paulistas**. Disponível em: < http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_305.html>. Acesso em: 26 dez. 2015.
- CHANCELLOR, W. J. Soil physical properties. In: UPADHYAYA, S.K. et al. **Advances in soil dynamics**. 1. ed. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1994. v. 1, cap. 2, p. 21-245.
- CORSINI, P. C. Impact of soil degradation on crop production in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 353-363, 1991.
- DANTAS, J. D'A. N.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ASSIS, C. P. Qualidade do solo sob diferentes usos e manejos no perímetro irrigado de Jaguaribe/Apodi, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.18- 26, 2012.

DEMATTÊ, J.A.M. et al. Soil class and attribute dynamics and their relationship with natural vegetation based on satellite remote sensing. **Geoderma**, v. 302, p. 39 - 51, maio, 2017.

DESHMUKH, D.S. et al. Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope. **Journal of Hydrology**, v. 492, p. 89 -101, abr. 2013.

DRUSCH, M. et al. Sentinel -2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. **Remote Sensing of Environment**, v.120, p. 25-36, fev. 2012.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013.

FIGUEIREDO, C. C.; SANTOS, G. G.; PEREIRA, S.; NASCIMENTO, J. L.; ALVES JÚNIOR, J. Propriedades físico-hídricas em Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.146- 151, 2009.

FLOWERS, M. D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, v.48, p.21-35, 1998.

FRANÇA, A. F.; TAVARES JUNIOR, J. R.; MOREIRA FILHO, J. C. C. Índices Ndvi, Ndwi E Ndbi Como Ferramentas Ao Mapeamento Temático Do Entorno Da Lagoa Olho D'água, Em Jaboação Dos Guararapes-Pe. **IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife, p. 1- 9, maio, 2012.

FREIRE, O. **Solos das regiões tropicais**. 1. ed. Botucatu: FEPAF, 2006. 268 p.

GAO, BO-CAI. NDWI-A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space. **Remote Sens. Environ.** New York, v. 58, p. 257-266, Abr, 1996.

INSITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). São Paulo » Botucatu » infográficos: **despesas e receitas orçamentárias e pib**, 2016. Disponível em:
<<http://cidades.ibge.gov.br/painel/economia.php?lang=&codmun=350750&search=sao-paulo|botucatu|infogr%EF1ficos:-despesas-e-receitas-or%EF7ament%EF1rias-e-pib>>. Acesso em: 02 jan. 2016.

KAY, B. D.; ANGERS, D. A. Soil structure. In: WARRICK, A. W. **Soil physics companion**. Boca Raton: CRC Press, 2002. cap. 7, p. 249-296.

- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**: relações solo – planta. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.
- KLEIN, V. A. **Física do solo**. 1. Ed. Passo Fundo: Editora UPF, 2008. 212 p.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, 857-867, 2002.
- KREMER, P.; HAMSTEAD, Z. A.; MCPHEARSON, T. The value of urban ecosystem services in New York City: A spatially explicit multicriteria analysis of landscape scale valuation scenarios. **Environmental Science & Policy**, v.62, p. 57-68, maio, 2016.
- KÜÇÜKDOĞAN, A.; GÜVEN, B.; BALCIOĞLU, I. Mapping the environmental risk of antibiotic contamination by using multi-criteria decision analysis. **Clean Soil Air Water**, v. 43, n. 6, p. 1267-1356, 2015.
- LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1131-1140, 2007.
- LEIVAS, J. F. et al. Monitoramento da seca de 2011/12 a partir do NDWI e NDVI padronizado do SPOT-Vegetation. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 364-370.
- LEPSCH, I. F. et al. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 4ª aproximação. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991. 175 p.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. São Paulo – SP: edusp. 2005. 334p.
- LIMA, J. L. M. P. et al. Mapping soil surface macropores using infrared thermography: An exploratory laboratory study. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p. 01- 08, out. 2014.
- LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. 1. ed. Campo Grande: Uniderp, 2007. 881p
- MANUAIS tutorial de geoprocessamento: filtragem. São José dos Campos: Departamento de Processamento de Imagens – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/filtragem.html>>. Acesso em: 22 ago. 2017.
- MARTINS, S. G. et al. Avaliação de Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob Diferentes Povoamentos Florestais. **CERNE**, Lavras, v.8, n.1, p.032-041, 2002.

MESQUITA, M. G. B. F; MORAES, S. O. A Dependência Entre A Condutividade Hidráulica Saturada E Atributos Físicos Do Solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.963-969, mai-jun, 2004.

NOSSACK, F. A. **Planejamento da recomposição florestal pela análise multicriterial na sub-bacia do córrego do descalvado visando a conservação de recursos hídricos**. 2012. p.69. Dissertação (Mestrado) em Faculdade de Ciências Agrônômicas - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

NICOLETE, D.A.P. **Áreas hidrologicamente homogêneas como subsídio ao manejo de bacias hidrográficas**. 2015. 76p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) em Faculdade Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2015.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 363 p.

OR, D.; WRAITH, J. M. Soil water content and water potential relationships. In: WARRICK, A. W. **Soil physics companion**. Boca Raton: CRC Press, 2002. cap. 3, p. 49-84.

OPEN SOURCE GEOSPATIAL FOUNDATION. **QGIS –The Leading Open Source Desktop GIS**. Versão 2.8.3, 2015. Disponível em: <<http://www.qgis.org/en/site/about/index.html>> . Acesso em: 06 mar. 2017.

PETRI, P.; FÚLFARO, V. J. **Geologia do Brasil: fanerozóico**. São Paulo: T. A. Queiroz, 1983. 631 p.

RADCLIFFE, D. E.; RASMUSSEN, T. C. Soil water movement. In: WARRICK, A. W. **Soil physics companion**. Boca Raton: CRC Press, 2002. cap. 4, p. 85-126.

REICHERT, J. M. et al. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandization/desertification processes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, p. 370-380, out. 2016.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: THIRD ERTS SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington, DC. **Anais...** Washignton, DC: NASA, p. 309-317.

SAADAT, H. et al. Land use and land cover classification over a large area in Iran based on single date analysis of satellite imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, p. 608 - 619, maio, 2011.

SAATY, R.W. The analytic hierarchy process – what it is and how it is used. **Pergamon Journal Ltd**, Grã Bretanha, v.9, n.3-5, p.161 – 176, 1987.

SAMPAIO, F. M. T. et al. Correlações Entre a Permeabilidade e os Atributos Físicos do Solo da Sub-Bacia do Córrego Centenário da Cidade de Lavras MG. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 30, n. 4, p. 798-803, jul./ago. 2006.

SHIMABUKURO, Y. E.; MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao estudo dos recursos agrônômicos e florestais. **Ceres**, Viçosa, v. 56, n. 4, p. 399-409, 2009.

SILVA, A. N. R. et al. SIG. **Uma plataforma para introdução de técnicas emergentes no planejamento urbano, regional e de transportes**. São Carlos, SP: dos Autores, 2004. 221p.

VETTORAZZI, C. A. **Avaliação multicritérios, em ambiente SIG, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal visando à conservação de recursos hídricos**. 2006. P.151. Tese (Livre Docência em Geoprocessamento) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

WALKE, N. et al. GIS-based multicriteria overlay analysis in soil-suitability evaluation for cotton (*Gossypium spp.*): A case study in the black soil region of central India. **Computers & Geosciences**, v. 41, p. 108-118, set, 2011.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**. 2003. v. 24, n. 3, p. 583-594. 2003.

ZHAI, Q.; RAHARDJO, H. Estimation of permeability function from the soil–water characteristic curve. **Engineering Geology**, v. 199, p. 148–156, 2015.