

# RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)  
autor(a), o texto completo desta tese  
será disponibilizado somente a partir  
de 10/03/2022.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA -UNESP  
CÂMPUS JABOTICABAL**

**MAPEAMENTO DE C E P COM BASE NA MINERALOGIA ESTIMADA POR Vis-  
NIR-SWIR**

**Kathleen Fernandes Braz**  
**Mestre em Ciência do Solo**

**2021**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA -UNESP  
CÂMPUS JABOTICABAL**

**MAPEAMENTO DE C E P COM BASE NA MINERALOGIA ESTIMADA POR Vis-  
NIR-SWIR**

**Discente: Kathleen Fernandes Braz**

**Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior**

**Tese apresentada à Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias –  
Unesp, Campus de Jaboticabal, como  
parte das exigências para a obtenção de  
título de Doutora em Agronomia  
(Ciência do Solo)**

B827m Braz, Kathleen Fernandes  
Mapeamento de C e P com base na mineralogia estimada por  
Vis-NIR-SWIR / Kathleen Fernandes Braz. -- Jaboticabal, 2021  
145 f. : il., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal  
Orientador: José Marques Júnior

1. Ciência do Solo. 2. Mineralogia de argila. 3. Ciclos  
biogeoquímicos. 4. Segurança Alimentar. I. Título.

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MAPEAMENTO DE C E P COM BASE NA MINERALOGIA ESTIMADA POR Vis-NIR-SWIR

AUTORA: KATHLEEN FERNANDES BRAZ

ORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSÉ MARQUES JUNIOR (Participação Virtual)  
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dra. ADRIANA APARECIDA RIBON (Participação Virtual)  
Departamento de Ciências dos Solos / UEG - Câmpus Palmeiras de Goiás

Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MELO DEMATTÉ (Participação Virtual)  
ESALQ/USP / Piracicaba/SP

Dr. DIEGO SILVA SIQUEIRA (Participação Virtual)  
Agrônomo Autônomo - Núcleo de Inovação Tecnológica (NIT) - Supera Parque / Ribeirão Preto/SP

Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA (Participação Virtual)  
Departamento de Água e Solo / Universidade Estadual de Campinas - Campinas/SP

Jaboticabal, 10 de março de 2021

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**KATHLEEN FERNANDES BRAZ** – Filha de Sandra Lourenço de Lima Fernandes e Carlos Roberto Fernandes Nogueira, nasceu em Goiás – GO, no dia 14 de setembro de 1992. Em março de 2010 ingressou no Curso de Engenharia Agrônoma pela Universidade Estadual de Goiás (UEG), Campus Palmeiras de Goiás. Foi bolsista de Iniciação Científica no período de 2011 a 2013, pelo programa de pesquisa interno da UEG, e bolsista de Inovação Tecnológica do Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) no ano de 2014. Em 2015 ingressou no Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal – SP, desenvolvendo o projeto de pesquisa “Caracterização da Caulinita e Gibbsita dos Solos no Planalto Ocidental Paulista” (FAPESP Proc. nº 2015/20692-0). Em 2017 ingressou no Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal – SP, desenvolvendo o projeto de pesquisa “Minerais Caulinita e Gibbsita na Caracterização e Mapeamento de Estoque de C E P nos Solos do Planalto Ocidental Paulista” (FAPESP Proc. nº 2017/05477-0). Atua como membro ativo do Grupo de Pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP, Campus de Jaboticabal, desde 2015.

## **A mãe e a mulher**

Na vida há certas coisas que são da mãe outras da mulher.

A mãe tem um filho. A mulher tem um parto.

A mãe quer presenciar todo pequeno e grande momento. A mulher pode, muitas vezes, desejar dar continuidade a carreira, aos estudos, a projetos pessoais.

A mãe quer colocar a cria debaixo do braço e parar o mundo p/ protegê-lá. A mulher ainda carrega sonhos individuais. De aprendizado, de conquistas, de novas experiências.

A mãe pode até anunciar que está completa. A mulher quer mais. Quer muito mais. Quer saber de outros assuntos, quer mais jantares românticos (seja lá o que isso significa pra ela), quer mais surpresas interessantes e mais surpresas de tirar o ar.

Você compreende?

A mãe e a mulher coexistem e se misturam. Não dá pra tirar uma da outra.

No espaço onde habita o coração de uma mãe, já existia, muito antes, a alma de uma mulher.

E é importante que as pessoas entendam que ela não foi, não irá e não precisa ir embora. “

**Rafaela Carvalho**

E a paz de Deus, para a qual também fostes chamados em um corpo, domine em vossos corações; e sede agradecidos.

A palavra de Cristo habite em vós abundantemente, em toda a sabedoria, ensinando-vos e admoestando-vos uns aos outros, com salmos, hinos e cânticos espirituais, cantando ao Senhor com graça em vosso coração.

E, quanto fizerdes por palavras ou por obras, fazei tudo em nome do Senhor Jesus, dando por ele graças a Deus Pai.

**Colossenses 3:15-17**



## **DEDICO**

A minha pequena Ester que se tornou o maior amor de minha vida e minha força diária.

Ao meu esposo pela sua dedicação, amor, paciência e cuidado comigo.

A minha mãe que nunca mediu esforços para que eu conquistasse todos os meus sonhos.

Eu amo vocês!

## **OFEREÇO**

A Deus, porque é bom o tempo todo.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, porque mesmo sem eu merecer sempre cuida de cada detalhe.

Aos meus pais, Sandra Lourenço de Lima Fernandes e Carlos Roberto Fernandes Nogueira, por todo amor, apoio e incentivo.

Ao meu esposo, Vansni Wel, por sempre acreditar em mim, me apoiar e me incentivar em todos os momentos.

Aos meus familiares, em especial meu tio Wester Ferreira de Souza, ao meu sobrinho de coração Davi Araújo e minhas primas Maresa Bueno e Ludmila Martins por toda ajuda, companheirismo e amizade mesmo à distância.

Aos meus sogros, Silvana e Márcio da Silva, e ao meu cunhado Esli Wel pela ajuda nos últimos anos.

As minhas amigas e companheiras de laboratório Priscila, Simone e Deise, pelas risadas e distrações.

A Gabriela Mourão que se tornou em pouco tempo uma amiga e companheira de trabalho, pronta em todos os momentos.

Ao Professor Dr. José Marques Junior pelo voto de confiança e pelos ensinamentos.

Aos amigos que passaram pelo CSME, Angélica Santo Rabelo de Souza Bahia e Diego Silva Siqueira, pela confiança e ajuda.

Aos membros da Banca do Exame Geral de Qualificação, Professor Dr. Marcílio Vieira Martins Filho e ao Professor Dr. Alan Rodrigo Panosso que ofereceram sugestões e críticas significativas para a melhoria do presente trabalho.

Aos membros da banca de defesa, professores Dr. José Alexandre Melo Demattê, Dr. Zigomar Menezes de Souza, Dr. Diego Silva Siqueira e Dr<sup>a</sup>. Adriana Ribon, por se disponibilizarem prontamente em contribuir para a melhoria deste estudo e para meu crescimento profissional.

Aos funcionários e amigos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, em especial do Departamento de Solos e Adubos e da seção de Pós-graduação, que auxiliaram para todo andamento desta pesquisa.

A minha ex-orientadora e mãe científica Professora Doutora Adriana Aparecida Ribon, por sempre acreditar em mim, me incentivar e me apoiar desde a graduação.

A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, e ao programa de pós-graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do mestrado.

As agências de financiamento. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Processos Nº 2015/20692-0; Nº 2017/05477-1).

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

**Muito Obrigada!**

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	iii
LISTA DE TABELAS .....	vi
RESUMO.....	vii
<b>CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais .....</b>	<b>9</b>
1.1 Introdução .....	9
1.2 Revisão de Literatura .....	11
1.2.1 Estudo do C no Solo.....	11
1.2.2 Estudo do P no Solo.....	12
1.2.3 Mineralogia do solo .....	14
1.2.4 Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD) .....	17
1.2.5 Mineralogia da Fração Argila por Espectroscopia de Reflectância Difusa .....	19
1.2.6 Técnicas estatísticas para caracterização, predição e mapeamento de atributos do solo.....	21
1.3 Referências Bibliográficas .....	23
<b>CAPÍTULO 2 – Estoques de C e P em solos do Planalto Ocidental Paulista, no contexto Solo-Paisagem.....</b>	<b>35</b>
2.1 Introdução .....	36
2.2 Material e Métodos.....	38
2.2.1 Caracterização da área de estudo .....	38
2.2.2 Planejamento Amostral .....	40
2.2.3 Caracterização dos atributos do solo .....	41
2.2.3.1 Análises granulométricas e químicas do solo.....	41
2.2.3.2 Análises mineralógicas.....	42
2.2.3.3 Espectroscopia de reflectância difusa (ERD) .....	43
2.2.3.4 Estoque de carbono e fósforo .....	44
2.2.3.5 Agregados do solo.....	45
2.2.4 Análises Estatísticas .....	46
2.3 Resultados e Discussões .....	47
2.3.1. Correlação entre mineralogia quantificada por ERD e DRX.....	47
2.3.2 Caracterização da área de estudo .....	49

2.3.3 Caracterização das áreas agrícolas e nativas do Planalto Ocidental Paulista	.55
2.3.4 Estimativa dos estoques de C e P por ERD	68
2.4 Conclusões	75
2.5 Referências	75
<b>CAPÍTULO 3 - Predição e mapeamento detalhado de C por sensor espectral para solos do Planalto Ocidental Paulista</b>	<b>86</b>
3.1 Introdução	87
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	89
3.2.1 Localização e caracterização da área	89
3.2.2 Análises	91
3.2.2.1 Análises granulométricas e químicas do solo	91
3.2.2.2 Análises mineralógicas	91
3.2.2.3 Espectroscopia de reflectância difusa (ERD)	92
3.2.2.4 Conteúdo e Estoque de Carbono	93
3.2.3 Análise Estatística	93
3.3 Resultados e Discussões	95
3.3.1 Correlação dos teores de C com atributos do solo	95
3.3.2 Assinatura espectral e faixas mais importantes para a estimativa de C	102
3.3.3 Estimativa do C total	108
3.3.3.1 Estimativa por Random Forest (RF)	108
3.3.3.2 Estimativa por regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR)	113
3.3.4 Mapeamento do C total	116
3.4 Conclusões	121
3.5 Referências	121
<b>CAPÍTULO 4 – Considerações Finais</b>	<b>134</b>

## LISTA DE FIGURAS

### **CAPÍTULO 2 – Compartimentos naturais para estoques de C e P em solos do Planalto Ocidental Paulista**

- Figura 1.** a) Mapa geológico atualizado do Planalto Ocidental Paulista. Fonte: Mod. de Fernandes e Magalhães-Ribeiro (2015). b) Mapa pedológico do Planalto Ocidental Paulista. FONTE: Instituto Agrônomo de Campinas. c) Mapa de formas da paisagem d) Mapa de dissecação do Planalto Ocidental Paulista. e) Planejamento amostral dos pontos coletados. ....39
- Figura 2.** Análise dos vales espectrais para cálculos do contínuo removível (CR), considerando a faixa de ocorrência de cada mineral. ....43
- Figura 3.** Estimativa entre a razão  $Ct/(Ct+Gb)$  calculada por difração de raios x (DRX) e calculada pela técnica de contínuo removível (CR) aplicado as curvas de espectroscopia de reflectância difusa (ERD). (Fonte: Extraído de Fernandes et al. 2020) (Número amostral: 600 Pontos). ....47
- Figura 4.** Estimativa dos minerais hematita (Hm) e goethita (Gt) calculada por difração de raios x (DRX) e calculada pela técnica de contínuo removível (CR) aplicado as curvas de espectroscopia de reflectância difusa (ERD). (Número amostral: 600 Pontos).....48
- Figura 5.** Atributos granulométricos e físicos, por compartimentos e áreas agrícola (AA) e mata nativa (MN) para solos do Planalto Ocidental Paulista. (Número Amostral: 44 pontos). ....56
- Figura 6.** Atributos químicos, por compartimentos e áreas agrícola (AA) e mata nativa (MN) para solos do Planalto Ocidental Paulista. (Número Amostral: 44 pontos). ....58
- Figura 7.** Atributos mineralógicos, por compartimentos e áreas agrícola (AA) e mata nativa (MN) para solos do Planalto Ocidental Paulista. (Número Amostral: 44 pontos). ....62
- Figura 8.** Estoques de C e P, por compartimentos e áreas agrícola (AA) e mata nativa (MN) para solos do Planalto Ocidental Paulista. (Número Amostral: 44 pontos). ....64
- Figura 9.** Matriz de correlação de Sperman para granulometria, mineralogia, densidade do solo (DS), conteúdos e estoques de C e P, e isótopos de C, para solos do Planalto Ocidental Paulista.....68

<b>Figura 10.</b> Curvas espectrais para solos do Planalto Ocidental Paulista em áreas agrícolas e de mata nativa para compartimentos de basalto e arenito. ....	69
<b>Figura 11.</b> A) Análise de regressão para dados de estoque de C e P observados e estimados por regressão mínima por quadrados parciais (PLS) a partir das curvas espectrais para amostras estratificadas de áreas agrícola e mata nativa. B) Valores de Importância de predição (VIP).....	71
<b>Figura 12.</b> Mapas de variabilidade espacial para os estoques de C e P estimados por regressão mínima por quadrados parciais (PLS) a partir das curvas espectrais.....	73

### **CAPÍTULO 3 - Caracterização e mapeamento detalhado de C por sensor espectral para solos do Planalto Ocidental Paulista**

<b>Figura 1.</b> a) Mapa geológico atualizado do Planalto Ocidental Paulista. b) Mapa pedológico do Planalto Ocidental Paulista. FONTE: Instituto Agrônomo de Campinas. c) Mapa de dissecação do Planalto Ocidental Paulista. d) Planejamento amostral dos pontos coletados.....	90
<b>Figura 2.</b> Matriz de correlação de sperman para os atributos na camada de 0 – 0,20 m dos solos e diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos do Planalto Ocidental Paulista. ....	100
<b>Figura 3.</b> Curvas espectrais de amostras estratificadas para arenito e basalto, para área do Planalto Ocidental Paulista. Adaptada de Fernandes et al. (2020). ....	103
<b>Figura 4.</b> Análise de Cluster com mapa de calor para as faixas espectrais mais importantes para estimativa de C, apontadas por modelagem Stepwise, teores de C e compartimentos geológicos e geomorfológicos, para solos do Planalto Ocidental Paulista. ....	107
<b>Figura 5.</b> Random Forest dos comprimentos de onda para estimativa de C total (g Kg <sup>-1</sup> ), para solos do Planalto Ocidental Paulista. ....	109
<b>Figura 6.</b> A) Análise de regressão entre dados preditos de C (g Kg <sup>-1</sup> ) pelas faixas Vis (Visível), NIR (Infravermelho médio) e Vis+NIR por Random Forest e observados para solos do Planalto Ocidental Paulista. B) Gráficos de relevância para as diferentes bandas das faixas Vis, NIR e Vis+NIR para estimativa de C. ....	112
<b>Figura 7.</b> A) Análise de regressão entre dados preditos de C (g Kg <sup>-1</sup> ) pelas faixas Vis (Visível), NIR (Infravermelho médio) e Vis+NIR, por regressão por mínimos quadrados	

parciais e observados para solos do Planalto Ocidental Paulista. B) Gráficos de relevância para as diferentes bandas das faixas Vis, NIR e Vis+NIR para estimativa de C..... 115

**Figura 8.** Mapas de C observado e estimado por Random Forest com base nas faixas da curva espectral Vis (A), NIR (B) e Vis+NIR (B), e por regressão por mínimos quadrados parciais com base nas faixas da curva espectral Vis (A), NIR (B) e Vis+NIR (B), e seus respectivos mapas de erro, para os solos do Planalto Ocidental Paulista. .... 119



## LISTA DE TABELAS

### **CAPÍTULO 2 – Compartimentos naturais para estoques de C e P em solos do Planalto Ocidental Paulista**

**Tabela 1.** Estatística descritiva dos atributos granulométricos, químicos e mineralógicos dos solos para diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos do Planalto. (Número amostral: 600 pontos).....51

**Tabela 2.** Distribuição de classes de agregados, diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) para os diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos do Planalto Ocidental Paulista. (Número amostral: 200 pontos). ...54

### **CAPÍTULO 3 - Caracterização e mapeamento detalhado de C por sensor espectral para solos do Planalto Ocidental Paulista**

**Tabela 1.** Estatística descritiva para os atributos mineralógicos dos solos de diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos, para áreas agrícolas e mata nativa do Planalto Ocidental Paulista. ....96

**Tabela 2.** Métricas de avaliação dos modelos de Random Forest para estimativa do C total ( $\text{g Kg}^{-1}$ ) para as faixas Vis, NIR e Vis+NIR, na profundidade de 0,00 - 0,20 m, para solos do Planalto Ocidental Paulista. .... 111

**Tabela 3.** Métricas de avaliação dos modelos por regressão por mínimos quadrados parciais para estimativa do C total ( $\text{g Kg}^{-1}$ ) para as faixas Vis, NIR e Vis+NIR, na profundidade de 0,00 - 0,20 m, para solos do Planalto Ocidental Paulista. .... 114

**Tabela 4.** Métricas geoestatísticas dos teores totais de C observados e estimados, pelas faixas Vis (Visível), NIR (Infravermelho médio) e Vis+NIR por Random Forest (RF) e regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) na profundidade de 0,00 - 0,20 m, para os solos do Planalto Ocidental Paulista. .... 117

## MAPEAMENTO DE C E P COM BASE NA MINERALOGIA ESTIMADA POR Vis-NIR-SWIR

**RESUMO:** O uso irracional dos solos tem causado desequilíbrios em todo o ecossistema. A influência em outros componentes do meio, como na água, no ar e nos ciclos biogeoquímicos dos elementos, já é notória. O presente trabalho teve como objetivo estimar os estoques de C e P em solos do Planalto Ocidental Paulista, a partir da mineralogia da fração argila dada por espectroscopia de reflectância difusa, e estabelecer e mapear áreas específicas de manejo. A área de estudo foi o Planalto Ocidental Paulista, que ocupa cerca de 13 milhões de ha. Foram coletadas 600 amostras para realização de análises físicas, mineralógicas e espectrais. Foram avaliados: a mineralogia, química, granulometria e física dos solos, os estoques de C e P, e os isótopos de C, em amostras estratificadas, com base na geologia, geomorfologia e pedologia da área. Todos os dados foram submetidos a análises estatísticas e geoestatísticas. Os resultados obtidos permitiram obter os valores de referência de estoque de C e P, baseados na composição mineralógica do solo. Solos de basalto apresentam os maiores conteúdos de C e estoques do elemento, quando comparados aos solos de arenito. Solos de arenito, em formas da paisagem altamente dissecadas apresentaram os maiores estoques de P, seguido pelos solos de basalto. É possível gerar mapas de estoques de C e P, e mapas de conteúdo de C a partir de diferentes análises matemáticas. A aprendizagem de máquina permite boa estimativa dos conteúdos de C para diferentes geologias. Estes resultados permitirão o planejamento para definição de áreas de manejo específico para fins de conservação dos recursos naturais. Sendo possível atingir este objetivo utilizando sensores, como o espectro, que permitem a quantificação de um grande número amostral, de forma rápida, prática, barata e menos poluente.

**Palavras-chave:** Ciência do solo, mineralogia de argila, ciclos biogeoquímicos, segurança alimentar.

## MAPPING OF C AND P BASED ON MINERALOGY ESTIMATED BY Vis-NIR-SWIR

**ABSTRACT:** The irrational use of land has caused imbalances throughout the ecosystem. The influence on other components of the environment, such as water, air and the biogeochemical cycles of the elements, is already notorious. The present work aimed to estimate the C and P stocks in soils of the Planalto Ocidental Paulista, from the mineralogy of the clay fraction given by diffuse reflectance spectroscopy, and to establish and map specific management areas. The study area was the Planalto Ocidental Paulista, which occupies about 13 million ha. 600 samples were collected to perform physical, mineralogical and spectral analyses. The mineralogy, chemistry, particle size and physics of soils, C and P stocks, and C isotopes were evaluated in stratified samples, based on the geology, geomorphology and pedology of the area. All data were subjected to statistical and geostatistical analyses. The results obtained allowed to obtain the reference values of C and P stock, based on the mineralogical composition of the soil. Basalt soils have the highest C contents and element stocks when compared to sandstone soils. Sandstone soils in highly dissected landscape forms had the highest P stocks, followed by basalt soils. It is possible to generate C and P stock maps, and C content maps from different mathematical analyses. Machine learning allows good estimation of C contents for different geologies. These results will allow planning for the definition of specific management areas for the purpose of conserving natural resources. It is possible to achieve this goal using sensors such as the spectrum, which allow the quantification of a large sample number, in a fast, practical, cheap and less polluting way.

**Keywords:** Soil science, clay mineralogy, biogeochemical cycles, food safety.

## **CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais**

### **1.1 Introdução**

A população mundial já passa dos 7,7 milhões de pessoas, com estimativa para 11 milhões até 2100 (Gerland et al., 201). Estes números causam enorme pressão na agricultura para aumento na produtividade, sustentabilidade dos ecossistemas e segurança alimentar. A solução mais incitada é o aumento da produtividade em áreas já exploradas. Para tanto é necessário uso de diversas tecnologias, entre as quais aquelas que envolvem processos de alteração do solo, aumentando da emissão de gases e o uso irracional de fertilizantes. Entretanto, para que os impactos sejam mínimos é de extrema importância que se tenha conhecimento de todas as características do solo e de seus atributos, permitindo o planejamento estratégico do uso e da ocupação do solo (Padarian et al., 2015).

Os minerais presentes no solo governam inúmeras propriedades que tem relação direta com a produtividade das culturas (Barbieri et al., 2009; Camargo et al., 2008a, 2008b; Carmo et al., 2016; Ferreira et al., 1999; Montanari et al., 2010; Sanchez et al., 2013). Estes minerais já foram quantificados por espectroscopia de reflectância difusa (ERD) com sucesso para solos da Austrália (Viscarra-Rossel et al., 2010; Viscarra-Rossel, 2011), do Marrocos (Mulder et al., 2013; Volaniaina H. Ramaroson et al., 2018), para regiões da França (Crowley e Vergo, 1988; Kruse et al., 1991; Madeira Netto et al., 1995) e para algumas regiões do Brasil (Bahia et al., 2015; Fernandes, 2017; Vendrame et al., 2012).

A ERD é uma técnica que registra os processos de absorção e dispersão produzidos na superfície das partículas do solo, permitindo a confecção de uma curva de reflectância característica para cada solo (Clark, 1999). A técnica é rápida, não poluente, de menor custo e já tem sido utilizada para caracterização de diferentes atributos (Ackerson et al., 2015; Bahia et al., 2015; Camargo et al., 2015; Demattê et al., 2017, 2019; Stenberg et al., 2010; Viscarra Rossel et al., 2010, 2016). Alguns estudos já mostram a eficiência da técnica até para classificação de solos (Minasny et al., 2010; Terra et al., 2018; Vasques et al., 2014). Todavia as relações existentes entre a mineralogia e os ciclos biogeoquímicos de alguns elementos, como o C e P,

que além de apresentarem influências entre si, apresentam grandes influências para o meio ambiente, são poucos estudados.

Ao estudarem a estrutura dos limites planetários Rockstrom et al. (2009) concluíram que o planeta pode ser dividido em 10 fronteiras que garantem um espaço operacional seguro para a humanidade. Conforme estes autores a fronteira que se refere ao ciclo do P já se encontra no limite e à referente a emissão de CO<sub>2</sub>, indicada pelas mudanças climáticas, está acima do limite, sendo considerada crítica. A perturbação humana nestas fronteiras e a alteração dos limites planetários gera um risco considerável à desestabilidade do período histórico relativamente estável que a sociedade atual sobrevive. Neste sentido, o conhecimento e estudo dos limites planetários e as influências das ações antrópicas nos ciclos biogeoquímicos são valiosos para as decisões políticas e a condução do desenvolvimento social.

O solo é um sistema em constante processo de alteração. Portanto não há como fazer previsões certas sobre as consequências das atividades humanas nos ecossistemas terrestres. A difusão de novas tecnologias e pesquisas agrícolas, desenvolvidas nas próximas décadas irão determinar as possibilidades de mitigação de recursos e adaptação as mudanças climáticas para garantir a continuidade na produção de alimentos (Lybbert and Sumner, 2012). Quinton et al. (2010) apontam que os ciclos de C, N e P estão inter-relacionados, com influências diretas na produtividade primária do sistema. A mineralização do C, devido à mobilização do solo, conduz a aumentos consideráveis nos teores de P, sugerindo que quando há estabilidade de C, o ciclo do P pode ser alterado.

A composição mineralógica dos solos apresenta diferentes relações com a estabilização da matéria orgânica e estoques de C e P nos solos, dada suas propriedades físicas. Oliveira et al. (2015) apontam que solos mais arenosos apresentam maiores perdas de C, devido a maior lixiviação e menor agregação e atividade de argila, enquanto solos mais argilosos e mais ricos em óxidos de Al apresentam maiores variações no estoque de C. Enquanto para solos com mineralogia oxídica e minerais 1:1, os íons de fosfato interagem com estes minerais formando compostos insolúveis, tornando o elemento indisponível as plantas (Mogollón et al., 2018).

Supondo que a mineralogia estimada por ERD apresenta alta correlação com os estoques de C e P nos solos, e que a confecção de mapas auxiliará na definição de compartimentos com características específicas, a presente pesquisa tem como objetivo estudar a relação existente entre a mineralogia da fração argila para diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos do Planalto Ocidental Paulista e os estoques de C e P, para tomadas de decisão e planejamentos de zonas de manejo específico.

### 3.4 Conclusões

Os maiores conteúdos de C são associados a solos mais argilosos, com mineralogia oxídica, maior volume total de poros e menor densidade do solo, em compartimentos basálticos, altamente dissecados.

Solos de maior reflectância apresentam menores conteúdos de C.

A técnica de espectroscopia de reflectância difusa apresentou eficiência para estimativa de C. Solos de maior reflectância apresentam os menores conteúdos de C.

O algoritmo Random Forest associado a faixa espectral Vis+NIR, é mais eficiente que a regressão mínima por quadrados parciais para estimativa do conteúdo de C, em solos tropicais.

O algoritmo Random Forest associado a faixa espectral Vis+NIR permitiu a confecção de mapa estimado do conteúdo de C, mais semelhante ao mapa observado, apontando que o mesmo pode ser utilizado para definição de políticas públicas para uso do solo, para redução de emissão de CO<sub>2</sub> e para políticas de crédito de C, de forma econômica e rápida.

### 3.5 Referências

Ackerson JP, Demattê JAM, Morgan CLS (2015) Predicting clay content on field-moist intact tropical soils using a dried, ground VisNIR library with external parameter orthogonalization. **Geoderma** 259–260:196–204. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.002>

Ahmed IU (2018) **Forest Soil C: Stock and Stability under Global Change**, in: *New Perspectives in Forest Science*. pp. 37–67. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/46845>

Aitkenhead M, Cameron C, Gaskin G, Choisy B, Coull M, Black H (2018) Digital RGB photography and visible-range spectroscopy for soil composition analysis. **Geoderma** 313:265–275. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.020>

Asgari N, Ayoubi S, Demattê JAM, Dotto AC (2020) Carbonates and organic matter in soils characterized by reflected energy from 350–25000 nm wavelength. **Journal of Mountain Science** 17(7):1636-1651. <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5789-9>

Assad ED, Pinto HS, Martins SC, Groppo JD, Salgado PR, Evangelista B, Vasconcellos E, Sano EE, Pavão E, Luna R, Camargo PB, Martinelli LA (2013) Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: Paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences** 10:6141–6160. <https://doi.org/10.5194/bg-10-6141-2013>

Bahia ASRS, Marques Jr J, Siqueira DS (2015a) Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional** 5:150–156. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.04.006>

Bahia ASRS, Marques Júnior J, Panosso AR, Camargo LA, Siqueira DS, Scala N La, (2014) Iron oxides as proxies for characterizing anisotropy in soil CO<sub>2</sub> emission in sugarcane areas under green harvest. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 192:152–162.

Bahia ASRS, Marques Júnior J, Panosso AR, Camargo LA, Siqueira DS, Teixeira DDB, La Scala Júnior N (2015b) Field-scale spatial correlation between contents of iron oxides and CO<sub>2</sub> emission in an Oxisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola** 72:157–166. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0142>

Bahia ASRS, Marques J, La Scala N, Cerri CEP, Camargo LA (2017) Prediction and Mapping of Soil Attributes using Diffuse Reflectance Spectroscopy and Magnetic Susceptibility. **Soil Science Society of America Journal** 81:1450–1462. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.06.0206>

Baker JM, Ochsner TE, Venterea RT, Griffis TJ (2007) Tillage and soil carbon sequestration — What do we really know? **Agriculture, Ecosystems & Environment** 118:1–5. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.014>

Barbieri DM, Marques Júnior J, Alleoni LRF, Garbuio FJ, Camargo LA (2009) Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola** 66:819–826. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000600015>

Barbieri DM. (2011) Atributos Físicos, Químicos E Mineralógicos De Um Latossolo Vermelho Eutroférico Sob Dois Sistemas De Colheita De Cana-De-Açúcar. Tese (Doutor em Ciência do Solo) UNESP, Jaboticabal, SP.



Beguin J, Fuglstad G, Mansuy N, Paré D (2017) Predicting soil properties in the Canadian boreal forest with limited data: Comparison of spatial and non-spatial statistical approaches. **Geoderma** 306:195–205. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.06.016>

Bellon-Maurel V, McBratney A (2011) Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils - Critical review and research perspectives. **Soil Biology and Biochemistry** 43:1398–1410. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.02.019>

Bishop JL, Lane MD, Dyar MDJBA (2008) Reflectance and emission spectroscopy study of four groups of phyllosilicates: smectites, kaolinite-serpentines, chlorites and micas. **Clay Minerals** 43:35–54. <https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.1.03>

Braz SP, Urquiaga S, Alves BJR, Jantalia CP, Guimarães AP, Santos CA, Santosm SC, Pinheiro EFM, Boddey RM (2013) Soil Carbon Stocks under Productive and Degraded Brachiaria Pastures in the Brazilian Cerrado, **Soil Science Society of American Journal**, 77:914–928.

Breiman L (2001a) Random Forest. **Machine Learning** 45:5–32. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Breiman L (2001b) ST4\_Method\_Random\_Forest. **Machine Learning** 45:5–32. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Brown DJ, Shepherd KD, Walsh MG, Dewayne May, Reinsch TG (2006) Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma** 132:273–290. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.04.025>

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT (2013) Mineralogy of the clay fraction of Alfisols in two curvatures. IV - Spatial correlation with physical properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37:307–316.

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT, Bahia ASRS (2014) Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Scientia Agricola** 71:244–256. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162014000300010>

Camargo LA, Marques Junior J, Pereira GT, Horvat RA (2008a) Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo. I - Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:2269–2277.

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT, Horvat RA (2008b) Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. II - Correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32: 2279–2288. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600007>

Camargo LA, Marques J, Barrón V, Alleoni LRF, Barbosa RS, Pereira GT (2015) Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma** 251–252:124–132. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.027>

Camargo OA, Moniz AC, Jorge JA, Valadares LMAS (1986) Métodos de análise química, mineralógica e física dos solos do Instituto Agronômico de Campinas. Instituto Agronômico, Campinas. 96 pp.

Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE (1994) Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. **Soil Science Society of America Journal**, 58:1501-1508.

Campos MCC, Montanari R, Marques Júnior J, Pereira GT, Souza ZM (2012) Caracterização de Argissolos em diferentes segmentos de vertente na região de Jaboticabal. **Revista de Ciências Agrárias** 55:251-259. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2012.072> Milton.

Carmo DAB, Marques Júnior J, Siqueira DS, Bahia ASRS, Santos HM, Pollo GZ (2016) Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 51:1261–1271. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900026>

Chagas CS, Carvalho Junior W, Bhering SB, Calderano Filho B (2016) Spatial prediction of soil surface texture in a semiarid region using random forest and multiple linear regressions. **Catena** 139:232–240. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.001>

Chicati MS, Nanni MR, Chicati ML, Furlanetto RH, Cezar E, Oliveira RB (2019) Hyperspectral remote detection as an alternative to correlate data of soil constituents. **Remote Sensing Applications: Society and Environment** 16. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100270>

Clark RN (1999) **Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy. Manual of Remote Sensing**, in: *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing*. pp. 3–58.

Cunha P, Marques Júnior J, Curi N, Pereira GT, Lepsch IF (2005) Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29, 81–90.

Curi N, Franzmeier DP (1987) Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal** 51:153-158.

Dawson JJC, Smith P (2007) Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. **Science of the Total Environment** 382:165–190. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.03.023>

Demattê JAM, Epiphanyo JC, Formaggio AR (2003) Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. **Bragantia** 62:451–464.

Demattê JAM, Morgan CLS, Chabrilat S, Rizzo R, Franceschini MHD, Terra FS, Vasques GM, Wetterlind J (2016) **Spectral sensing from ground to space in soil science: stat of the art, applications, potencial and perspectives**, in: Remote Sensing Handbook: Land Resources Monitoring, Modeling and Mapping with Remote Sensing. 661–732.

Demattê JAM, Campos RC, Alves MC, Fiorio PR, Nanni MR (2004) Visible-NIR reflectance: A new approach on soil evaluation. **Geoderma** 121:95–112. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.012>

Demattê JAM, Dotto AC, Paiva AFS, Sato MV, Dalmolin RSD, Araújo MSB, Silva EB, Nanni MR, ten Caten A, Noronha NC, Lacerda MPC, Araújo Filho JC, Rizzo R, Bellinaso H, Francelino MR, Schaefer CEGR, Vicente LE, Santos UJ, Sá Barreto Sampaio EV, Menezes RSC, Souza JJLL, Abrahão WAP, Coelho RM, Grego CR, Lani JL, Fernandes AR, Gonçalves DAM, Silva SHG, Menezes MD, Curi N, Couto EG, Anjos LHC, Ceddia MB, Pinheiro ÉFM, Grunwald S, Vasques GM, Marques Júnior J, Silva AJ, Barreto MCV, Nóbrega GN, Silva MZ, Souza SF, Valladares GS, Viana JHM, Silva Terra F, Horák-Terra I, Fiorio PR, Silva RC, Frade Júnior EF, Lima RHC, Alba JMF, Souza Junior VS, Brefin MDLMS, Ruivo MDLP, Ferreira TO, Brait MA, Caetano NR, Bringhenti I, Sousa Mendes W, Safanelli JL, Guimarães CCB, Poppiel RR, Souza AB, Quesada CA, Couto HTZ (2019) The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. **Geoderma** 354:113793. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.043>

Demattê, J.A.M., Horák-Terra, I., Beirigo, R.M., Terra, F.S., Marques, K.P.P., Fongaro, C.T., Silva, A.C.S., Vidal-Torrado, P., 2017. Genesis and properties of wetland soils by VIS-NIR-SWIR as a technique for environmental monitoring. *J. Environmental Manag.* 197, 50–62. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.014>

Dinkins, D.P., Jonesoil, C., 2008. Sampling Strategies. *Agriculture and Natural Resources*. MT200803AG New 4/08.

Don, A., Schumacher, J., Freibauer, A., 2011. Impact of tropical land use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. *Glob. Chang. Biol.* 18, 3237–3251.

Dufréhou G, Grandjean G, Bourguignon A (2015) Geometrical analysis of laboratory soil spectra in the short-wave infrared domain: Clay composition and estimation of the swelling potential. **Geoderma** 243–244: 92–107. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.12.014>

Eclesia RP, Jobbagy EG, Jackson RB, Biganzoli F, Piñeiro G (2012) Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America. **Global Change Biology** 18:3237–3251. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02761.x>

Embrapa 2017. **Manual de métodos de análises**. In: Manual de Métodos de Análise de Solo. Brasília, DF, p. 574.

England JR, Viscarra-Rossel RA (2018) Proximal sensing for soil carbon accounting. **Soil** 4:101–122. <https://doi.org/10.5194/soil-4-101-2018>

Falloon P, Betts R (2010) Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation-The importance of an integrated approach. *Science of the Total Environment* 408:5667–5687. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.002>

Fang Q, Hong H, Zhao L, Kukolich S, Yin K, Wang C (2018) Visible and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy for Investigating Soil Mineralogy: A Review. **Journal Spectroscopy** 2018:1–14.

FAO (2019) **Fome aumenta no mundo e atinge 820 milhões de pessoas**, diz relatório da ONU [WWW Document]. Nações Unidas Bras. URL <http://twixar.me/FXfT>

Fernandes K, Marques Jr J, Santos ASR, Demattê JAM, Ribon AA (2020) Landscape-scale spatial variability of kaolinite-gibbsite ratio in tropical soils detected by diffuse reflectance spectroscopy. **Catena** 195:104795. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104795>

Fernandes LA (2004) Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1:1.000.000. *Bol. Paraná. Geoscience* 53–66.

Fernandes LA, Castro AB, Basilici G (2007) Seismites in continental sand sea deposits of the Late Cretaceous Caiuá Desert, Bauru Basin, Brasil. **Sedimentary Geology** 199:61–64. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.12.030>

Fernandes RBA, Barrón V, Torrent J, Fontes MPF (2004) Quantificação de óxidos de ferro de Latossolos brasileiros por espectroscopia de reflectância difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28:245–257.

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999) Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 23:515–524. <https://doi.org/10.1590/s0100-06831999000300004>

Gelsleichter YA, Anjos LHC, Costa EM, Valente G, Debiasi P, Antunes MAH, Marcondes RAT (2019) Machine Learning Algorithms for Soil Properties Prediction with Treated Vis&ndash;NIR Spectrums from the Itatiaia National Park. **Preprints** 1:1–20. <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS201911.0053.V1>

Genú AM, Demattê JAM, Fiorio PR (2010) Análise espectral de solos da Região de Mogi-Guaçu (SP). **Semina** 31:1235–1244. <https://doi.org/10.5433/16790359.2010.v31n4Sup1p1235>

Genú AM, Demattê JAM, Nanni MR (2013) Caracterização e comparação do comportamento espectral de atributos do solo obtidos por sensores orbitais (ASTER e TM) e terrestre (IRIS). **Ambiência Guarapuava** 9:279–288. <https://doi.org/10.5777/ambiencia.2013.02.03>

Ghidin AA, Melo VDF, Costa V, Maria J, Costa J (2006) Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I - Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 30:293–306.

Gómez-Robledo L, López-Ruiz N, Melgosa M, Palma AJ, Capitán-Vallvey LF, Sánchez-Marañón M (2013) Using the mobile phone as munsell soil-colour sensor: An experiment under controlled illumination conditions. **Computers and Electronics in Agriculture** 99:200–208. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.002>

Gruijter JJ, McBratney AB, Minasny B, Wheeler I, Malone BP, Stockmann U (2016) Farm-scale soil carbon auditing. **Geoderma** 265:120–130. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.010>

Guerrero C, Wetterlind J, Stenberg B, Mouazen AM, Gabarrón-Galeote MA, Ruiz-Sinoga JD, Zornoza R, Viscarra-Rossel RA (2016) Do we really need large spectral libraries for local scale SOC assessment with NIR spectroscopy? **Soil Tillage Research** 155:501–509. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.008>

Heil J, Marschner B, Stumpe B (2020) Digital photography as a tool for microscale mapping of soil organic carbon and iron oxides. **Catena** 193:104610. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104610>

Henderson BL, Bui EN, Moran CJ, Simon DAP (2005) Australia-wide predictions of soil properties using decision trees. **Geoderma** 124:383–398.

Hickmann C, Costa LM (2012) Estoque de carbono no solo e agregados em Argissolo sob diferentes manejos de longa duração. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16:1055–1061.

Hunt GR, Salisbury JW (1970) Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, I. Silicate minerals. **Modern Geology** 1:283–300.

Issaks EH, Srivastava RM (1989) **A introduction to applied geostatistics**. Oxford: University Press, 561 p.

Jackson ML (1985) **Soil Chemical Analysis**, 2nd edition., Madison. 930 p.

Kämpf N (1988) **O ferro no solo**. In: reunião sobre ferro em solos inundados, 1, Goiânia, 1988. Anais... Goiânia, EMBRAPA - CNPAF, p.35-71.

Kämpf N, Schwertmann U (1982) Relações entre óxidos de ferro e cor em solos caulínicos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 7:27-31.

Ker JC (1994) Latossolos Do Brasil: Uma Revisão. **Geonomos** 5:17–40.

Keskin H, Grunwald S, Harris WG (2019) Digital mapping of soil carbon fractions with machine learning. **Geoderma** 339:40–58. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.037>

Khanal S, Fulton J, Klopfenstein A, Douridas N, Shearer S (2018) Integration of high resolution remotely sensed data and machine learning techniques for spatial prediction of soil properties and corn yield. *Computers and Electronics in Agriculture* 153:213–225.

Kuang B, Mouazen AM (2013) Non-biased prediction of soil organic carbon and total nitrogen with vis-NIR spectroscopy, as affected by soil moisture content and texture. *Biosystems engineering* 114:249–258. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.01.005>

La Scala Jr N, Marques Jr J, Pereira GT, Cora JE (2000) Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO<sub>2</sub> emissions from a Brazilian bare soil. *Soil Biology and Biochemistry* 32:1459–1462.

Leal FT, França ABC, Siqueira DS, Teixeira DDB, Marques Júnior J, La Scala Júnior N (2015) Characterization of potential CO<sub>2</sub> emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. *Science Agriculture* 72:535–539. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0420>

Lima CLR, Miola ECC, Timm LC, Pauletto EA, Silva AP (2012) Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. *Soil Tillage Research* 124, 190–195. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.006>

Lybbert TJ, Sumner DA (2012) Agricultural technologies for climate change in developing countries: Policy options for innovation and technology diffusion. *Food Policy* 37:114–123. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2011.11.001>

Malley DF, Martin PD, Ben-Dor E (2004) **Application in analysis of soils**. In: Roberts CA, Workman J, Reeves JB *Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture*. Madison: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Sci. Soci. of America, 729–784.

Marques Júnior J, Alleoni LRF, Teixeira DDB, Siqueira DS, Pereira GT (2015) Sampling planning of micronutrients and aluminium of the soils of. *Geoderma Regional* 4:91–99. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.12.004>

Marsland SW (2015) **Machine Learning An Algorithmic Perspective**. 2. ed. 2015

Martin M, Orton T, Lacarce E, Meersmans J, Saby N, Paroissien J, Jolivet C, Boulonne L, Arrouays D (2014) Evaluation of modelling approaches for predicting the spatial distribution of soil organic carbon stocks at the national scale. *Geoderma* 223:97–107.

Mehra OP, Jackson ML (1958) Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Minerals* 7:317–327.

Mehra OP, Jackson ML (1960) Iron oxide removed from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* 7:1317-327.



Mendes T (2015) **Cenários de uso e manejo para conservação do estoque de carbono do solo no Estado do Maranhão**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

Minasny B, Malone BP, McBratney AB, Angers DA, Arrouays D, Chambers A, Chaplot V, Chen ZS, Cheng K, Das BS, Field DJ, Gimona A, Hedley CB, Hong SY, Mandal B, Marchant BP, Martin M, McConkey BG, Mulder VL, O'Rourke S, Richer-de-Forges AC, Odeh I, Padarian J, Paustian K, Pan G, Poggio L, Savin I, Stolbovoy V, Stockmann U, Sulaeman Y, Tsui CC, Vågen TG, van Wesemael B, Winowiecki L (2017) Soil carbon 4 per mille. **Geoderma** 292:59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>

Minasny B, McBratney AB, Hartemink AE (2010) Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. **Geoderma** 155:132–139. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.024>

Montanari R, Marques Júnior J, Campos MCC, Souza ZM, Camargo LA (2010) Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. **Revista Ciência Agronômica** 41:191–199.

Morellos A, Pantazi XE, Moshou D, Alexandridis T, Whetton R, Tziotzios G, Wiebensohn J, Bill R, Mouazen AM (2016) Machine learning based prediction of soil total nitrogen, organic carbon and moisture content by using VIS-NIR spectroscopy. *Biosystems engineering* 152:104–116. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.04.018>

Mouazen AM, Kuang B, Baerdemaeker J, Ramon H (2010) Comparison between principal component, partial least squares and artificial neural network analyses for accuracy of measurement of selected soil properties with visible and near infrared spectroscopy. **Geoderma** 158:23-31.

Norrish K, Taylor RM (1961) The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. **Journal of Soil Science** 12:294–305.

ONU (2019) **O Perspectivas Mundiais de População 2019**. Disponível em: <<https://population.un.org/wpp/>>. Acesso em: 06 de agosto de 2020.

Padarian J, Minasny B, McBratney ABB (2015) Using Google's cloud-based platform for digital soil mapping. **Computers & Geosciences** 83:80–88. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.06.023>

Padarian J, Minasny B, McBratney AB (2020) Machine learning and soil sciences: A review aided by machine learning tools. **Soil** 6:35–52. <https://doi.org/10.5194/soil-6-35-2020>

Pahlavan-Rad MR, Dahmardeh K, Hadizadeh M, Keykha G, Mohammadnia N, Gangali M, Keikha M, Davatgar N, Brungard C (2020) Prediction of soil water infiltration using multiple linear regression and random forest in a dry flood plain, eastern Iran. **Catena** 194:104715. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104715>

Parron LM, Garcia JR, Oliveira EB, Brown GG, Prado RB (2015) **Estoques de carbono no solo como indicador de serviços ambientais**, in: **Serviços Ambientais Em Sistemas Agrícolas e Florestais Do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa pp. 92–100.

Pedregosa FGV, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, Blondel M, Prettenhofer P, Weiss R, Dubourg V, Vanderplas J, Passos A, Cournapeau D, Brucher M, Perrot M, Duchesnay E (2011) Scikit-learn: Machine Learning in Python. **Journal of Machine Learning Research** 12:2825–2830.

Pizarro MA, Epiphany JCN, Galvão LS (2001) Caracterização mineralógica de solos tropicais por sensoriamento remoto hiperespectral. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 36:1277–1286.

Quinton JN, Govers G, Van Oost K, Bardgett RD (2010) The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Nature Geoscience* 3:311–314. <https://doi.org/10.1038/ngeo838>

Raij BV (2001) Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo, 285p.

Rosendo JS, Rosa R (2012) Comparação do estoque de c estimado em pastagens e vegetação nativa de cerrado. *Sociedade e Natureza* 24:359–375.

Saiz G, Bird MI, Domingues T, Schrod F, Schwarz M, Feldpausch TR, Veenendaal E, Djagbletey G, Hien F, Compaore H, Diallo A, Lloyd J (2012) Variation in soil carbon stocks and their determinants across a precipitation gradient in West Africa. **Global Change Biology**, 18:1670-1683.

Sanchez MGB, Marques J, Siqueira DS, Camargo LA, Pereira GT (2013) Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil-relief relationship and numerical classification. *Precision Agriculture* 14:201–214. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9288>

Sanchez RB, Júnior JM, Souza ZM, Pereira GT, Filho MVM (2009) Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia** 68:1095–1103. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000400030>

Schaefer CEGR, Fabris JD, Ker JC (2008) Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals** 43:137–154.

Schillaci C, Lombardo L, Saia S, Fantappiè M, Märker M, Acutis M (2017) Modelling the topsoil carbon stock of agricultural lands with the Stochastic Gradient Treeboost in a semi-arid Mediterranean region, **Geoderma** 286:35–45.

Schwertmann U (1993) **Relations between iron oxides, soil color, and soil formation**. In: Bigham JM, Ciolkosz EJ Soil color. Madison: Soil Science Society of America, p.51-69.



Silva LS, Marques Júnior J, Barrón V, Gomes RP, Teixeira DDB, Siqueira DS, Vasconcelos V (2020) Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **Catena** 185:104258. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104258>

Siqueira DS, Marques J, Matias SSR, Barrón V, Torrent J, Baffa O, Oliveira LC (2010) Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management** 26:425–431. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00294.x>

Somarathna PDSN, Minasny B, Malone BP, Stockmann U, McBratney AB (2018) Accounting for the measurement error of spectroscopically inferred soil carbon data for improved precision of spatial predictions. *Science of the Total Environment* 631–632:377–389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.302>

Stenberg B (2010) Effects of soil sample pretreatments and standardised rewetting as interacted with sand classes on Vis-NIR predictions of clay and soil organic carbon. **Geoderma** 158:15–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.008>

Stenberg B, Viscarra-Rossel RA, Mouazen AM, Wetterlind J (2010) Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. **Soil Science** 163–215. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7)

Stenberg B, Viscarra-Rossel RA (2006) **Diffuse Reflectance Spectroscopy for High-Resolution Soil Sensing**. *Proximal Soil Sensing*. pp. 29–47.

Stevens A, Nocita M, Tóth G, Montanarella L, Van Wesemael B (2013) Prediction of Soil Organic Carbon at the European Scale by Visible and Near InfraRed Reflectance Spectroscopy. **Plos One** 8:6. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066409>

Teixeira DDB, Bicalho SE, Panosso AR, Cerri CEP, Pereira GT, LaScala Junior N (2013) Spatial variability of soil CO<sub>2</sub> emission in a sugarcane area characterized by secondary information. **Scientia Agricola** 70:195–203.

Terra FS, Demattê JAM, Viscarra-Rossel RA (2018) Proximal spectral sensing in pedological assessments: vis–NIR spectra for soil classification based on weathering and pedogenesis. **Geoderma** 318:123–136. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.053>

Thanasoulas NC, Piliouris ET, Kotti ME, Evmiridis NP (2002) Application of multivariate chemometrics in forensic soil discrimination based on the UV-Vis spectrum of the acid fraction of humus. **Forensic Sci. International** 130:73–82.

Vasconcelos V, Souza D, Martins E, Carvalho Junior OA, Marques Junior J, Silva Siqueira D, Couto Junior AF, Fontes Guimarães R, Gomes RAT, Reatto A (2013) Modelo de evolução pedogeomorfológica da Serra da Canastra, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia** 14:197–212.

Vasques GM, Demattê JAM, Viscarra-Rossel RA, Ramírez-Lopes L, Terra FS (2014) Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectance spectra from multiple depths. **Geoderma** 223–225:73–78. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.019>

Vieira SR (2000) **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: Novais RF, Alvarez VVH, Schaefer CE Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 1-54.

Viscarra Rossel RA, Bui EN, Caritat P, McKenzie NJ (2010) Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible – near - infrared reflectance spectra. **Journal of Geophysical Research** 115:1–13. <https://doi.org/10.1029/2009JF001645>

Viscarra Rossel RA, Behrens T, Ben-Dor E, Brown DJ, Demattê JAM, Shepherd KD, Shi Z, Stenberg B, Stevens A, Adamchuk V, Aichi H, Barthès BG, Bartholomeus HM, Bayer AD, Bernoux M, Böttcher K, Brodský L, Du CW, Chappell A, Fouad Y, Genot V, Gomez C, Grunwald S, Gubler A, Guerrero C, Hedley CB, Knadel M, Morrás HJM, Nocita M, Ramirez-Lopez L, Roudier P, Campos EMR, Sanborn P, Sellitto VM, Sudduth KA, Rawlins BG, Walter C, Winowiecki LA, Hong SY, Ji W (2016) A global spectral library to characterize the world's soil. **Earth-Science Reviews Journal** 155:198–230. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.012>

Viscarra Rossel RA, Bouma J (2016) Soil sensing: A new paradigm for agriculture. **Agricultural Systems** 148:71–74. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.07.001>

Viscarra Rossel RA, Fouad Y, Walter C (2008) Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. **Biosystems engineering** 100:149–159. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.007>

Viscarra Rossel RA, Walvoort DJJ, McBratney AB, Janik LJ, Skjemstad JO (2006) Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma** 131:59–75. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007>

Viscarra-Rossel RA (2008) Parles: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems** 90:72–83. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2007.06.006>

Viscarra-Rossel RA, Chappell A, Caritat P, McKenzie NJ (2010) Mapping the information content of Australian visible-near infrared soil spectra. **World Congr. Soil Sci. Soil Solut. a Chang.** 19:91–94.

Warrick AW, Nielsen DR (1980) **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: Hillel D Applications of soil physics. New York: Academic p319-344.

Wold S, Sjöström M, Eriksson L (2001) PLS-regression: A basic tool of chemometrics. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems** 58:109–130. [https://doi.org/10.1016/S0169-7439\(01\)00155-1](https://doi.org/10.1016/S0169-7439(01)00155-1)

Yan F, Shangguan W, Zhang J, Hu B (2020) Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters. **Science Data** 7:1–13. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0345-6>

Zhao D, Zhao X, Khongnawang T, Arshad M, Triantafilis J (2018) A Vis-NIR Spectral Library to Predict Clay in Australian Cotton Growing Soil. **Soil Science Society American Journal** 82:1347. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.03.0100>

## **CAPÍTULO 4 – Considerações Finais**

O tema abordado pela pesquisa está fundamentado na sustentabilidade ambiental e segurança alimentar. Inúmeras práticas de manejo agrícola, utilizadas desde os primórdios da agricultura são nocivas ao ambiente. A emissão de gases, o desmatamento, destruição da camada de ozônio, o aquecimento global, a desertificação, a eutrofização de recursos hídricos, a degradação do solo, são alguns dos incontáveis prejuízos que já vivenciamos. A mudança neste cenário atual da agricultura só será possível com pesquisas desta magnitude, que apontem uma alternativa para produção, porém de forma consciente.

Nos capítulos anteriores são apresentadas possibilidades de desenvolvimento de uma nova agricultura, baseada na sustentabilidade. O uso dos mapas de estoque de C e P, e conteúdo de C poderão servir de base para incontáveis futuras decisões. Onde fazer o melhor manejo da adubação fosfatada, onde aplicar mais, menos, onde é necessária uma forma mais solúvel, onde é necessário o uso de um novo método, como aplicação de pó de rocha, onde vou emitir mais gases e posso investir em uma cultura perene, ou onde o solo tem potencial para estocar C naturalmente, e se pode trabalhar com culturas anuais, são apenas exemplos das possíveis ideias que podem surgir, com a adoção desta pesquisa em áreas agrícolas.

A utilização da geologia e geomorfologia para se compartimentalizar a área de estudo, auxilia na determinação da variabilidade espacial dos atributos estudados. O conhecimento destes atributos em uma área de 13 milhões de hectares, e de relevância econômica, e heterogênea em inúmeras características, podem nortear não apenas trabalhos no estado de São Paulo, mas em estados vizinhos, que disponham de condições semelhantes. Mostrando o potencial futuro desta pesquisa.

A adoção de novas metodologias, como a espectroscopia de reflectância difusa (ERD) e técnicas matemáticas robustas, como o aprendizado de máquina e a geoestatística, atuam de forma conjunta a tornar pesquisa desta magnitude possível. Sem a adoção de tais mapear com precisão estes atributos, em grandes extensões territoriais, seria inviável, economicamente e humanamente. O capital de investimento e de equipe técnica seria de milhões, e demoraria anos. Contudo vê-se que adotando as novas metodologias é possível se obter mapas detalhados e precisos, com baixo

investimento. Estas possibilidades não contribuem somente com os resultados aqui apresentados, mas podem servir de norte e inspiração para futuros trabalhos fazerem uso das mesmas técnicas.

Por se tratar de resultados inéditos, quando se considera, metodologia, extensão territorial, mapas, e outros, pesquisas associadas a esta ainda se fazem necessárias. Seja em outras regiões do país ou com metodologias e técnicas matemáticas diferentes, ou apenas mostrando com experimentação em campo com estes mapas podem ser utilizados, são de extrema importância para sua validação. Todos os dados aqui gerados fazem parte agora de um banco de dados da região e poderão ser utilizados como base de outras pesquisas. Desta forma nortearão o desenvolvimento da pesquisa e inovação de maneira desbravadora, contribuindo para o Brasil em sua economia e sustentabilidade.