

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ASSINATURA ESPECTRAL EM TERRA PRETA DE ÍNDIO  
NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

**Renato Eleoterio de Aquino**

Engenheiro Agrônomo

**2017**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ASSINATURA ESPECTRAL EM TERRA PRETA DE ÍNDIO  
NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

**Renato Eleoterio de Aquino**

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

**Coorientador: Dr. Diego Silva Siqueira**

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

## FICHA CATALOGRÁFICA

A657a Aquino, Eleoterio de Aquino  
Assinatura espectral em Terra Preta de Índio da Amazônia  
brasileira / Renato Eleoterio de Aquino. -- Jaboticabal, 2017  
xiii, 62 f. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017  
Orientador: José Marques Júnior  
Co-orientador: Diego da Silva Siqueira  
Banca examinadora: Gener Tadeu Pereira, Marcílio Vieira Martins  
Filho, Milton Cesar Costa Campos, Anderson Cristian Bergamin  
Bibliografia

1. Terra Preta Arqueológica. 2. Pedometria. 3. Solos Amazônicos.  
I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.41

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –  
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

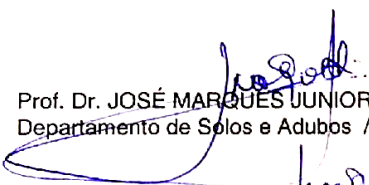
TÍTULO DA TESE: ASSINATURA ESPECTRAL EM TERRA PRETA DE INDIO DA AMAZÔNIA BRASILEIRA

**AUTOR: RENATO ELEOTÉRIO DE AQUINO**


**ORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR**


**COORIENTADOR: DIEGO SILVA SIQUEIRA**

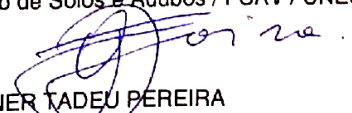
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JOSÉ MARQUES JUNIOR  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. MILTON CESAR COSTA CAMPOS - VIDEOCONFERÊNCIA  
Departamento de Fertilidade do Solo / Universidade Federal do Amazonas / Humaita/AM

  
Prof. Dr. ANDERSON CRISTIAN BERGAMIN - VIDEOCONFERÊNCIA  
Departamento de Agronomia / Universidade Federal de Rondônia / Rolim de Moura/RO

  
Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO  
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA  
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 07 de dezembro de 2017

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

RENATO ELEOTERIO DE AQUINO- Filho de Raimundo Maia de Aquino e de Raquel Eleoterio de Aquino, nascido em 23 de novembro de 1986 no município de Manicoré no Estado do Amazonas. Entre os anos de 2003 a 2005 ingressou na Escola Agrotécnica Federal do Amazonas, hoje Instituto Federal do Amazonas, onde cursou o ensino médio e técnico em agropecuária. Em agosto de 2006 ingressou no curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Federal do Amazonas- Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente- Humaitá- Amazonas, onde foi bolsista de PIBIC/CNPq entre 2010 a 2012. Em março de 2012 ingressou no curso de mestrado, concluindo em fevereiro de 2014 e em seguida ingressando no doutorado no mês de março do referido ano, ambos no programa de Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária no Campus de Jaboticabal-São Paulo, fazendo desde então parte do grupo de pesquisa CSME (caracterização do solo para fins de manejo específico), onde se envolveu em diversos trabalhos junto a equipe do grupo, tendo como resultados principais 25 artigos científicos publicados. Durante todo o mestrado e doutorado foi bolsista pela FAPEAM (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas).

*“Todos os dias quando acordo, não temos mais o tempo que passou, mais tenho muito tempo, temos todo o tempo do mundo. Todos os dias antes de dormir, lembro e esqueço como foi o dia, sempre em frente. Não temos tempo a perder, nosso suor sagrado é bem mais belo que este sangue amargo, e tão sério e selvagem!”*

*(Tempo Perdido- Renato Russo)*

## DEDICO

A meus pais Raimundo Maia de Aquino e Raquel Eleoterio de Aquino e minha querida e amada avó Idemila Eleoterio, que sempre me ampararam, me amaram, me incentivaram, me fortaleceram e não me deixaram só nos momentos mais difíceis de serem superados.

## OFEREÇO

Os meus amados irmãos Rafael, Renata, Rogério, Rafaela, Artemis, Alessandro e meus sobrinhos Samuel, Vitor e Arthur, amo muito todos vocês. Obrigado pelo amor, confiança, paciência, incentivo e por acreditarem que eu posso ir mais além.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, obrigado pela oportunidade da vida, pela realização deste trabalho e por ser a minha força quando não a tenho para continuar.

A Universidade Estadual Paulista, campus de Jaboticabal, programa de Agronomia (Ciência do Solo), pela oportunidade, entre os anos de 2012 a 2017 fazendo o mestrado e doutorado. Sinto-me orgulhoso de ter feito parte de uma das melhores universidades deste país.

A Universidade Federal do Amazonas no Campus Vale do Rio Madeira em Humaitá, pela oportunidade de fazer a graduação em engenharia agrônoma.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas- FAPEAM, pelo financiamento da bolsa de estudo no decorrer do mestrado e também no doutorado, este apoio foi essencial para o sucesso deste trabalho.

Ao professor doutor José Marques Júnior pela oportunidade de trabalho, orientação e ensinamentos. Obrigado por todos estes anos de muito aprendizado, não só de estudos em solos, mas também da inspiração como excelente profissional que sempre nos mostrou, o empenho e motivação em todos os trabalhos, nos exigindo e motivando a buscar sempre o melhor.

Ao meu coorientador doutor Diego Silva Siqueira, minha eterna gratidão pela motivação profissional, pelos excelentes conselhos sempre certos, profissionais e particulares.

Ao Professor doutor Milton Cesar Costa Campos, você foi minha inspiração a ter a motivação para seguir estudando solos, através do teu exemplo e amor pela profissão de pedólogo. Obrigado pela amizade, conselhos, apoio e ensinamentos.

Ao professor doutor Alan Panosso e a doutora Livia Arantes pela participação e excelentes contribuições no exame geral de qualificação.

Aos professores doutores Gener Tadeu Pereira, Marcílio Vieira Martins Filho, Milton Cesar Costa Campos e Anderson Cristian Bergamin pelas contribuições na banca de defesa do doutorado. Obrigado pelas excelentes contribuições no trabalho.

A minha família, obrigado pelo apoio incondicional dado em todos os momentos, sem este apoio não seria possível chegar até aqui.

Aos companheiros do Grupo CSME (caracterização de solos para fins de manejo específico) nestes seis anos, obrigado pelo ambiente sempre muito descontraído, pela presteza, apoio quando solicitado, pelas trocas de experiência.



Foram tantos profissionais que passaram e foram impactantes, cada um de sua forma, que seria injusto citar e esquecer de alguém. Só tenho a dizer obrigado a todos.

O que seria a vida sem ter boas amizades passando por ela. Então quero agradecer a cada uma das grandes pessoas que passaram em minha vida nestes anos. Cada um a sua maneira, foram também essenciais para minha estabilidade mental, para seguir em frente na busca de minha capacitação profissional.

Um agradecimento especial ao Maurício Gatti, meu grande amigo, companheiro de residência nestes quatro anos de Doutorado. Obrigado por todo apoio de sempre, pela amizade, pelas boas rizadas.

Ao Tiago Souza, meu amigo, desde a graduação, mestrado e doutorado, sempre juntos. Obrigado por todos os bons momentos tidos com a sua companhia.

Ao amigo Laércio Santos, Danilo Baldo, Thaísa Moreti e minha querida Milene Moara, vocês foram uma das melhores pessoas que conheci na vida. Espero tê-los sempre comigo.

A todos meus companheiros desde a escola agrícola que ainda mantemos contato na pessoa do Airton (Jabá), Ednaldo (Bombado), Pedro Guilherme (PIG), Ferdinando (Esquilo), Paulo Magno (Paulete), Maicon (Petróleo), Nestor Serudo (Chaves), André Borborema, Layon Grana.

A meus amigos de graduação Carla Rafaelle, Jordana Flores, Julimar Fonseca, Ivanildo Amorim, Leôncio Nery, Leonardo Nery, obrigado por todo apoio e por todas as aventuras nestes anos, tenho certeza que virão muitas no futuro.

Aos amigos que ganhei nesta linda cidade chamada Jaboticabal no estado de São Paulo. Saulo Strazeio, Suelen Alves, Gabriel Damasceno, Iolanda Reis, Rony Barbosa, Paula Oliveira, Laudecir Lemos, Liliane, Rafael Gasparin, Marília Gabriela, Miquéias, Poma, Katuscia, Júlio Cesar, Patricia, Silvia, Sergio Otta, Cláudia Gonçalves, Malu, Rodrigo Cau, Ana Rita, Roubertei, Elizabeth, Kathleen Fernandes, Ludmila Freitas, Guilherme Henrique (Espiga), e obviamente ao boteco do Sapão na pessoa do Ricardo. Muito obrigado por todo apoio e pelas grandes histórias construídas.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	XI
LISTA DE FIGURAS .....	XII
CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.1 INTRODUÇÃO .....	1
1.2. REVISÃO DE LITERATURA .....	3
1.2.1 A Terra Preta de Índio e suas características peculiares .....	3
1.2.2 Métodos indiretos na quantificação de atributos do solo: Assinatura espectral e atributos da cor como indicador de transformações no solo .....	7
1.3 REFERÊNCIAS.....	10
CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DE DIFERENTES AMBIENTES COM TERRA PRETA DE ÍNDIO POR MEIO DA ASSINATURA ESPECTRAL.....	18
2.1. INTRODUÇÃO .....	19
2.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	20
2.2.1 Localização e caracterização da área .....	20
2.2.2 Análises laboratoriais .....	22
2.2.3 Determinação da assinatura espectral .....	23
2.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	23
2.4 CONCLUSÕES .....	32
2.5. REFERÊNCIAS .....	32
CAPÍTULO 3 – ASSINATURA ESPECTRAL NA IDENTIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE EFLUXO DE CO <sub>2</sub> E ESTOQUE DE CARBONO DE TERRA PRETA DE ÍNDIO.....	38
3.1 INTRODUÇÃO .....	39
3.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	41
3.2.1 Caracterização da área e plano de amostragem .....	41
3.2.2 Análise dos atributos do solo .....	42
3.2.3 Determinação da assinatura espectral .....	43
3.2.4 Análise dos dados.....	43
3.2.5 Triângulo de cor (Diagrama ternário) .....	46
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
3.4. CONCLUSÕES .....	57
3.5. REFERÊNCIAS .....	58
CAPÍTULO 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	62

## ASSINATURA ESPECTRAL EM TERRA PRETA DE ÍNDIO NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

**RESUMO** – Os solos contendo horizonte antropogênico na Amazônia apresentam características muito diferenciadas. Neste contexto, este trabalho apresenta informações sobre suas características e a relação com a assinatura espectral (espectroscopia de reflectância difusa) provenientes da expressão da cor destes solos, podendo ser utilizado para compreender tanto seus processos de formação, quanto auxiliar como um indicador agrícola e conservacionista para o melhor uso destes solos. Este trabalho apresenta o objetivo geral de caracterizar diferentes ambientes de TPIs (Terra Preta de Índio) por meio da assinatura espectral, assim, compreender a influência das TPIs no estoque e efluxo de CO<sub>2</sub> (fCO<sub>2</sub>). E dois objetivos específicos (i) mensurar os atributos do solo de ambientes com TPI através da assinatura espectral, visando tornar-se uma alternativa eficiente na identificação e caracterização destes ambientes e (ii) identificar através da assinatura espectral o potencial de efluxo de fCO<sub>2</sub> e do estoque de C em TPI na região sul do estado do Amazonas. Foram abertos seis perfis de TPI, sendo coletadas amostras por horizonte em cada perfil. Para analisar a variabilidade espacial da TPI foi estabelecido uma malha de 70 m x 70 m e coletada amostras de solos em espaçamentos regulares de 10 m na profundidade de 0,0-0,10 m. Nas amostras coletadas, realizou-se a análise granulométrica, fertilidade, análises mineralógicas e a assinatura espectral nos solos. Na malha, também foi determinado fCO<sub>2</sub>. De forma geral, nos difratogramas os solos estudados apresentam composição mineralógica semelhante, concentrando os oxihidróxidos de Ferro e Alumínio (Hematita (Hm), Goethita (Gt), Gibsita (Gb)) com dominância de Caulinita (Ct) e Gt. Nos espectros da assinatura espectral entre os óxidos, a Gt predomina nesses solos, com menores expressões da Hm. Os maiores valores de reflectância na faixa da Gt foram encontrados em todos os horizontes antropogênicos da TPI. Em relação a faixa da Ct e Gb os espectros indicaram presença mais nítida da Ct evidenciados pela concavidade mais nítida em todos os horizontes antropogênico da TPI. Por outro lado, as medidas de cores (matiz, valor e croma) obtidas via assinatura espectral possibilitou a construção do triângulo ternário, onde formou-se quatro classes de valores de estoque de carbono e fCO<sub>2</sub>, possibilitando desta maneira inferir sobre estes atributos de maneira mais simples e rápida, somente através dos padrões de cores. A Gt e Ct foram os minerais que apresentaram dominância nos ambientes de TPI, evidenciados pelas faixas espectrais e corroborado pelos difratogramas, reforçando a eficiência da assinatura espectral para a caracterização das TPIs. A assinatura espectral foi eficiente na identificação de áreas com potencial de estoque de carbono e fCO<sub>2</sub> em TPI.

**Palavras-chaves:** terra preta arqueológica, pedometria, solos amazônicos.

## SPECTRAL SIGNATURE IN INDIAN BLACK EARTH IN THE BRAZILIAN AMAZON

**ABSTRACT** - Soils containing anthropogenic horizon on Amazon very different characteristics. In this context, this paper presents information about its characteristics and the relation with the spectral signature from the color expression of these soils, and can be used to understand both their formation process, as assist as an indicator Agriculture and conservation for the best use of these soils. This work presents as a general objective the objective of this study is to characterize different environments with the presence of anthropogenic horizon of (Indian black earth) IBE through spectral signature, so understand the influence of the IBE in stock and flow of CO<sub>2</sub>. And two specific objectives (i) measuring soil attributes of environments with IBE by spectral signature, aiming to become an efficient alternative in the identification and characterization of these environments and (ii) identify by the potential emission spectral signature of fCO<sub>2</sub> and C stock in IBE site in the southern state of Amazonas. Were opened six profiles of IBE, and collected samples for horizon in each profile. To analyze the spatial variability of the IBE was established a network of 70 m x 70 m and collected soil samples in regular spacing of 10 m in depth of 0.10 m. In the samples collected, sieve analysis, fertility and mineralogical analysis and spectral signature in the soil. In General, in difratogramas soils studied feature similar mineralogical composition, focusing on the iron and aluminium oxyhydroxide minerals (Hematite (Hm), Goethite (Gt), Gibbsite (Gb)) with dominance of Kaolinite (Ct) and Gt. In the spectra of the spectral signature between the oxides, the Gt predominates in these soils, with minor expressions of Hm. The highest values of reflectance in the Gt were found in all anthropogenic horizons IBE. About Ct and Gb band Spectra indicated presence sharper of Ct evidenced by scoop sharper in all anthropogenic horizons IBE. On the other hand, through the measures spectral signature colors (hue, value and chroma) made possible the construction of the ternary triangle and graduated four classes of values of carbon stocks and fCO<sub>2</sub>, enabling this way infer about these attributes in a manner simpler and faster, only through the color patterns. The Gt and Ct were minerals that showed dominance in environments of IBE, evidenced by the spectral bands and corroborated by the difratogramas, enhancing the efficiency of the spectral signature for the characterization of the IBE. The spectral signature was effective in identifying areas with potential for stock of C and CO<sub>2</sub> emission in IBE.

**Keywords-** archaeological black earth, pedometria, amazonian soils.

**Lista de Tabelas****Capítulo 2**

Tabela 1. Identificação dos perfis, coordenadas, localização, ocupação, posição, município.....21

**Capítulo 3**

Tabela 1. Análise exploratória dos componentes da cor do solo,  $fCO_2$  e est. C da malha de Terra Preta de Índio no sul do Amazonas.....47

## Lista de Figuras

### Capítulo 2

Figura 1: Localização da área de coleta dos seis perfis de solo com Terra Preta de Índio no município de Apuí no sul do Amazonas.....	21
Figura 2: Atributos do solo do horizonte antrópico (Ap1) de seis perfis de Terra Preta de Índio no município de Apuí no sul do Amazonas.....	24
Figura 3: Difrátogramas do horizonte antrópico (Ap1) de seis perfis de Terra Preta de Índio no município de Apuí no sul do Amazonas.....	27
Figura 4: Curvas espectrais no horizonte antrópico (Ap1) de seis perfis de Terra Preta de Índio no município de Apuí no sul do Amazonas.....	28
Figura 5. Curvas espectrais dos seis perfis do horizonte antrópico (Ap1) e do segundo horizonte diagnóstico dos seis perfis de Terra Preta de Índio no município de Apuí no sul do Amazonas.....	30

### Capítulo 3

Figura 1: Localização da malha amostral de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas.....	41
Figura 2. Variogramas simples dos componentes da cor do solo, fCO <sub>2</sub> e estoque de carbono da malha de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas.....	48
Figura 3. Gráficos de validação cruzada dos componentes da cor do solo, fCO <sub>2</sub> e estoque de carbono da malha de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas.....	50
Figura 4. Mapas de krigagem dos componentes da cor do solo, fCO <sub>2</sub> e estoque de carbono da malha de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas.....	51
Figura 5. Variogramas cruzados dos componentes da cor do solo, fCO <sub>2</sub> e estoque de carbono da malha de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas.....	53
Figura 6. Gráfico de correlação dos componentes da cor (valor, croma, matiz) com a fCO <sub>2</sub> e est C da malha de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas.....	54

Figura 7. Triângulo ternário da $fCO_2$ e estoque de carbono, estimados pelos componentes da cor (matiz, valor, croma) da malha de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas.....	56
--	----

## **CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

### **1.1 INTRODUÇÃO**

A Amazônia apresenta a ocorrência de solos com características peculiares, conhecidos como Terra Preta Índio (TPI) o que evidencia importante registro da ocupação humana e do uso do solo da região (LIMA et al., 2002). Essas TPIs são horizontes localizados na superfície de vários solos na região, como Argissolos, Neossolos, Latossolos, Cambissolos, Plintossolos e Espodosolos (CAMPOS, 2009; KERN et al., 2003), e apresentam em geral boa fertilidade (LEHMANN et al., 2003, GLASER, 2007), normalmente associados a corpos d'água ou em terrenos com maiores cotas de altitude.

Uma das características morfológicas marcantes das TPIs é a coloração escura e presença de fragmentos de cerâmica e/ou líticos incorporados a matriz dos horizontes superficiais, sendo estes fragmentos, possivelmente deixados por tribos indígenas que anteriormente, habitavam estes locais (KAMPF; KERN, 2005). Por esses vestígios, as TPIs têm sua formação intrelaçada a atividades das primeiras civilizações, são, portanto, terras antropogênicas, pedoindicadoras do modo de vida dos povos indígenas amazônicos.

Ao longo do tempo, as TPIs concentraram grande conteúdo de matéria orgânica, que até hoje se mantém estável, mesmo sobre pequenas explorações agrícolas (CAMPOS et al., 2012; SANTOS et al., 2013; AQUINO et al., 2016). Alguns estudos, por sua vez, buscam entender tal estabilidade, e os resultados indicam que isso se deve a combustão incompleta dos resíduos orgânicos “biochar”, não apenas responsável pela estabilidade, mas pela riqueza de nutrientes disponíveis no solo de TPIs (GLASER et al., 2001). Do ponto de vista ecológico e científico do solo, a existência das TPIs assume papel substancial na diversidade biológica e regulação de processos bióticos do solo, sobretudo no sequestro e efluxo de CO<sub>2</sub> (fCO<sub>2</sub>) do solo para atmosfera.

Em virtude à grande extensão territorial brasileira, a exploração da terra, mal direcionada, leva a alterações no uso do solo e ao aumento das emissões de GEE (gases do efeito estufa), resultante da queima de combustíveis fósseis e processos agrícolas e industriais (MORAIS et al., 2015).

Neste cenário, as TPIs são importantes por elevar o estoque de carbono no solo, armazenado há milhares de anos. Assim, estudos realizados com o objetivo de



comparar solos de TPIs e solos não-antrópicos (adjacentes) da Amazônia central deslumbram o efeito mitigador das TPIs na fixação de CO<sub>2</sub> no solo (MORAIS et al., 2015; CAMPOS et al., 2016). Irrefutavelmente, as TPIs atuam no equilíbrio do fCO<sub>2</sub> nas regiões tropicais, onde a substituição, isto é, o desmatamento do ecossistema natural para implantação de atividades agropecuárias debilitadas nos preceitos de sustentabilidade, culminam negativamente para mudanças climáticas, e acarretam processo de degradação química e física do solo (MULLER et al., 2001). Entretanto, trabalhos de caracterização destes ambientes ainda demanda de muito esforço físico, tempo e trabalho de campo oneroso, isso porque, as vias de acesso mais comuns as TPIs são os cursos de água.

Algumas metodologias estão sendo usada na ciência do solo, visando resultados rápidos, baixo custo e menos agressiva ao ambiente, visto que não demanda de reagentes químicos nas análises. A exemplos têm-se o uso de modelos matemáticos com a utilização da geoestatística (SIQUEIRA et al., 2010; MONTANARI et al., 2012; PANOSSO et al., 2012; AQUINO et al., 2014), assinatura espectral (espectroscopia de reflectância difusa - ERD) (CARMO et al., 2016; BAHIA et al., 2014; 2015) e assinatura magnética (susceptibilidade magnética - SM) (OLIVEIRA et al., 2017; OLIVEIRA, 2017) e, mais recentemente câmera de celular (Mobile) (GÓMEZ-ROBLEDO, 2013; STIGLITZ et al., 2017). Estes são métodos indiretos que auxiliam os tradicionais métodos de caracterização de atributos do solo, como cor, que reflete os minerais e a matéria orgânica do solo, estimados por assinatura espectral (DEMATTÊ et al., 2006; VISCARRA-ROSSEL et al., 2011). E, susceptibilidade magnética (SM) que alguns minerais oxídicos apresentam espontaneamente (DEARING et al., 1994; 1996; OLIVEIRA et al., 2015).

Embora muitos estudos tenham sido conduzidos visando compreender a magnitude das modificações e seus reflexos na gênese dos solos, muitas questões precisam ser melhor compreendidas, sobretudo as relacionadas com a mineralogia desses solos. OLIVEIRA, (2017) investigando os óxidos de ferro em solos de TPIs e não-antrópicos, encontrou elevada SM nos solos de TPIs, atribuindo a presença de minerais ferrimagnéticos, como maghemita. As possíveis explicações para isso são a oxidação da magnetita (litogênica) à ferrihidrita ferrimagnética, e continuado o processo tem-se a formação de maghemita (pedogênica), ou via ciclo de oxirredução ocorrido em condições pedogênicas normais (TORRENT et al., 2006), uma vez que a região apresenta condições favoráveis a esses processos, com altas

temperaturas e precipitações pluviais (CAMPOS et al., 2012). Comportamento também evidenciando em outros estudos desenvolvidos em TPIs (LIMA, 2001; LIMA et al., 2002; COSTA et al., 2004; SILVA et al., 2012).

Assim, a assinatura espectral, bem como a assinatura magnética, torna-se métodos alternativos para estimar atributos do solo (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000), inclusive auxiliar na caracterização da  $fCO_2$ . Neste sentido, o objetivo proposto do presente estudo é caracterizar diferentes ambientes de TPIs por meio da assinatura espectral, assim, compreender a influência das TPIs no estoque e efluxo de  $CO_2$ .

## **1.2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **1.2.1 A Terra Preta Arqueológica e suas características peculiares**

As TPIs são um exemplo de manifestação cultural que ocorreu na região Amazônica, nos tempos pré-colombianos. A descoberta das áreas de TPIs pelo homem não índio deu-se no século XIX (WOODS, 1995), mas somente há aproximadamente 40 anos (SOMBROEK, 1966), foram iniciadas as pesquisas científicas com relação a sua origem e suas propriedades físico-químicas, assim como sua distribuição geográfica.

A teoria mais aceita sobre a formação das TPIs é que se formaram por atividade humana relacionada a assentamentos e práticas agrícolas de indígenas pré-colombianos (MORA et al., 1991; NEVES et al., 2003). De acordo com Glaser (2007) são três os principais processos responsáveis pela formação das TPIs: a) formação do carvão - refere-se à formação do carbono pirogênico, com composição e estrutura molecular complexa (grupos aromáticos), bastante reativo e que contribui com a fertilidade do solo; b) incorporação de nutrientes - neste processo, os nutrientes são incorporados ao solo por diferentes fontes, por exemplo, excrementos humanos e animais, cinzas, resíduos de combustão incompleta e carvão, biomassa de plantas aquáticas e terrestres; c) ação dos microrganismos - responsáveis pela ciclagem de nutrientes, agindo tanto na decomposição da matéria orgânica como na imobilização de nutrientes do solo, evitando as perdas por lixiviação.

Por outro lado, datações de radiocarbono em sítios de TPIs indicam que foram formados há 1.500 anos antes do contato europeu (ANDRADE, 1986; PETERSEN et al., 2001); entretanto, há relato de TPIs com datações em torno de 4.800 anos antes do contato europeu (MILLER, 1999). Já Neves (2003), descreveu que a maioria das manchas de TPIs na Amazônia tem entre 500 e 2.500 anos de idade.

Quanto à localização das TPIs, podem ser encontradas desde as bases inclinadas das montanhas das cordilheiras dos Andes até a ilha de Marajó, no oceano Atlântico, inserida em uma variedade de solos e paisagens, em dimensões que podem variar de menos de um hectare até alguns quilômetros quadrados (WOOD; MCCANN, 1999). Sombroek et al. (2002) estimam que as TPIs cubram 0,1-0,3% ou 6.000-18.000 km<sup>2</sup> do total da Bacia Amazônica; no entanto, a extensão geográfica total permanece desconhecida (ERICKSON, 2003), sendo, portanto, uma das incógnitas referentes a estes solos e também uma alternativa para futuros estudos.

Os tipos de solo dos sítios de TPIs ocorrem em sua maioria em Latossolos, Argissolos e Cambissolos, podendo ocorrer sobre Neossolos e Espodosolos (SMITH, 1980; TEIXEIRA et al., 2010). Para outros autores, como Lima et al. (2002), ocorrem em Latossolos e Argissolos, situados fora do alcance das enchentes periódicas dos cursos d'água, na denominada "terra firme", na região Amazônica, e por cobrirem cerca de 70% da Bacia Amazônica, podendo ocorrer também em área de várzea, porém com menor frequência. Esta variação nos tipos de solos indica que o solo não foi fator determinante para o estabelecimento dos grupos pré-históricos (CUNHA, 2005; KAMPF; KERN, 2005).

De acordo com Kern et al. (2003) áreas de TPIs de grande extensão e profundas pressupõem assentamento pré-histórico ocupado por longos períodos de tempo, enquanto que sítios menores e menos profundos podem indicar períodos de ocupação mais curtos. Segundo Smith (1980) cada 1 cm de TPI é equivalente a 10 anos de ocupação humana. Em seus estudos com TPI, Smith (1980) destacou a presença de horizonte A antrópico que varia a sua espessura de 36 a 73 cm; no entanto, podem ser encontrados solos com horizontes mais profundos do que o mencionado, podendo variar de 10 a 200 cm de espessura.

São comuns a presença de artefatos nos horizontes antrópicos das TPIs, principalmente a cerâmica. A elevada concentração destes artefatos cerâmicos, em alguns locais das TPIs, condicionam características físicas e hídricas específicas nestes locais. Santos et al. (2013) encontraram quantidades que variaram de 0,00 a 260,7 g kg<sup>-1</sup> de artefatos composto quase que na sua totalidade por cerâmicas na região de Apuí, no Amazonas.

Um dos potenciais apresentado pelas TPIs é o teor de C armazenado no solo, que podem apresentar, em média, até 6 vezes mais carbono orgânico estável que

os solos adjacentes (sem a presença de horizonte antropogênico) (GLASER, 2001), figurando como grande reservatório de carbono orgânico.

Em relação a  $fCO_2$ , Campos et al. (2016) evidenciou diferenças entre a  $fCO_2$  do solo na área de TPI com cacau sendo em média, superior ao da área de TPI com café, mostrando haver diferentes taxas de  $fCO_2$  entre classes de solos com horizonte A antrópico. Neste mesmo trabalho evidenciou que o  $fCO_2$  é inversamente proporcional à umidade do solo, o que foi atribuído à saturação por umidade que promoveu a expulsão dos gases do solo imediatamente após as chuvas. Já Morais et al. (2015) verificou nas TPIs que a  $fCO_2$  em TPI sob floresta secundária foi inferior ao da TM (Terra Mulata), sem diferenças destes para o solo de TPI agricultável, evidenciando que os solos de TPI, apesar da quantidade diferenciada de carbono estocado, apresenta  $fCO_2$  similar aos demais tipos de solos, mesmo com a intervenção antrópica por meio da agricultura.

A granulometria das TPIs revela predomínio da fração areia nos horizontes antrópicos e transicional, conforme observado por Lima (2001) em estudos realizados em Iranduba, Amazonas, cujos valores da fração areia, silte e argila, no horizonte A (0 - 30 cm de profundidade), foram de ordem de 520; 130 e 350 g  $kg^{-1}$ , respectivamente, enquanto nos horizontes de transição e B os teores de areia diminuem à medida que as camadas se aprofundam.

Nos estudos de Glaser et al. (2001) foi mostrado que materiais carbonizados provenientes de combustão incompleta de materiais orgânicos, são responsáveis pela manutenção de altos níveis de matéria orgânica estável em solos antropogênicos. A razão provável da estabilidade do carbono orgânico nestes solos é a abundância de carvão (GLASER, 1999). Estes solos podem vir a ser reservatórios importantes do  $CO_2$  atmosférico, participando significativamente no sequestro global de C (SCHMIDT; NOACK, 2000).

Os horizontes antropogênicos são bem drenados, com boa disponibilidade de água, além exibirem condições de aeração, porosidade e condutividade hidráulica adequada para promover a infiltração de água e favorecer as trocas gasosas (BARROS et al., 2016). A densidade do solo, normalmente, é encontrada com valores baixos para os horizontes antropogênicos, havendo aumento em profundidade. Segundo Teixeira et al. (2010) os valores de densidade do solo correlacionam-se melhor com a distribuição granulométrica das partículas do que com os teores de matéria orgânica.

Os valores de pH em água variam entre 4,3 e 6,6 e os de cloreto de potássio (KCl) de 3,7 a 6,0 (FALCÃO et al., 2003). Os teores de Ca (cálcio), em sua maioria, são mais elevados que Mg (magnésio), K (potássio) e Na (sódio), pela sua maior disponibilidade advinda dos materiais introduzidos nas áreas de descarte e por sua maior afinidade com as superfícies de troca do solo. No horizonte antrópico das TPIs, podem-se encontrar teores de Ca trocável acima de  $10,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e Mg trocável acima de  $3,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  (KERN, 2003; SOMBROEK, 2003).

O K ocorre em valores extremamente baixos nos solos da Amazônia, devido principalmente à alta pluviosidade, o K pode sofrer perdas pela mobilidade via solução do solo (GRIMALDI et al., 2004). Diversos trabalhos de caracterização química das TPIs têm mostrado que o K não está presente em altas concentrações, da mesma forma como ocorre com os valores encontrados para P (fósforo), Ca e Mg. Falcão e Borges (2006) encontraram valores reduzidos de K em TPIs, no município de Iranduba, no Amazonas, em que a TPI adubada apresentou valor de  $0,19 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , enquanto na área não adubada foi de  $0,12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

Considerando-se os valores de  $\text{Al}^{3+}$  (alumínio trocável) e a porcentagem de m% (saturação por alumínio) do complexo de troca, é possível afirmar que as TPIs não apresentam problemas de toxidez de  $\text{Al}^{3+}$ . O valor mais alto de  $\text{Al}^{3+}$  encontrado em estudos de Falcão et al. (2003), na TPI, foi de  $1,60 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , e o menor valor chegou a zero.

Dentre os elementos diagnósticos das TPIs, o P total e o disponível destacam-se como mais importantes. Somente parte do P total das TPIs está disponível na solução do solo, mesmo assim, com teores elevados em relação aos solos típicos da Amazônia. Em sítios arqueológicos, no Amazonas, Cunha et al. (2009) encontraram valor de P de  $116 \text{ mg kg}^{-1}$  em áreas de TPIs sob floresta,  $290,5 \text{ mg kg}^{-1}$  em TPI cultivada e  $4,7 \text{ mg kg}^{-1}$  em áreas não antropogênicas.

Assim, como a matéria orgânica (MO) é um dos principais fatores responsáveis pelo comportamento diferenciado dos solos antrópicos, comparado aos solos adjacentes sem horizonte A antrópico. Em pesquisa realizada por Costa et al. (2009), foram observados no sítio Manduquinha teores de MO de  $40,9 \text{ g kg}^{-1}$ . Dados de 56 perfis de TPIs estudados por Madari et al. (2003) mostraram que, enquanto o teor médio de carbono orgânico na camada superficial de 0-20 cm em TPIs foi de  $30 \text{ g kg}^{-1}$ , nos solos não antrópicos da Amazônia foi de  $17 \text{ g kg}^{-1}$  na mesma profundidade.

Ainda são muito incipientes os estudos mineralógicos voltados as TPIs. Costa, (2003) verificou em um sítio de Caxiaunã, no Pará, que tiveram como principais minerais o Qz (quartzo) e a Ct (caulinita), e como minerais acessórios a Gt (goethita), a Hm (hematita) e o An (anatásio). Campos et al. (2011), em estudos na região do médio Rio Madeira, também encontraram minerais com dominância de Ct, Gb (gibbsita), além de traços de Mi (mica). Já Silva et al. (2011) encontrou na fração argila presença predominante de Ct com presença também de Gt, Gb e An, e nas TPIs de várzea do Rio Solimões, eles observaram, além da Ct, argilas silicatadas 2:1, além de mica/ilita, comuns em solos menos intemperizados.

Entretanto, outras observações têm revelado a presença de maghemita na TPI (COSTA et al., 2004; SÉRGIO et al., 2006). A ocorrência de maghemita em TPI ratifica a hipótese do uso constante do fogo nas atividades humanas nessas áreas, em concordância com a natureza semicarbonizada das substâncias húmicas encontradas nesses solos (BENITES et al., 2005). Sabe-se que uma das principais vias para a formação da maghemita em solos é a transformação de óxidos de Fe pedogenéticos (goethita, lepidocrocita e ferridrita) por aquecimento, via queimadas (elevação da temperatura entre 300 e 425 °C), na presença de compostos orgânicos (SCHWERTMANN, 1984).

### **1.2.2 Métodos indiretos na quantificação de atributos do solo: Assinatura espectral e atributos da cor como indicador de transformações no solo**

As TPIs possuem uma característica marcante que é a coloração escura presente nos horizontes superficiais do solo, devido principalmente ao elevado teor de matéria orgânica (KAMPF; KERN, 2005). Sendo a cor do solo uma propriedade que varia de acordo com o tipo mineral ou proporções entre eles, bem como sua distribuição sobre o solo, tendo uma importância extraordinária no sistema de classificação do solo no Brasil (RESENDE et al., 2007). No entanto, essa determinação, utilizada em todo o mundo por pedólogos, é baseada na percepção visual, isto é, subjetiva, e de acordo com Campos e Demattê (2004), as diferenças na percepção de cores podem resultar em erros de classificação.

A análise de cor como ferramenta de medidas é uma alternativa promissora na quantificação indireta de atributos do solo, como por exemplo, a assinatura espectral (espectroscopia de reflectância difusa (ERD)), que resulta em maior precisão, atendendo às condições controladas e não subjetivas. Vários autores

(TORRENT; BARRÓN, 1993; BARRÓN et al., 2000; McBRATNEY et al., 2008; KODAIRA; SHIBUSAWA, 2013; VISCARRA ROSSEL; WEBSTER, 2011; BAHIA et al., 2015; CAMARGO et al., 2015, CARMO et al., 2016, AQUINO, et al., 2016) demonstraram o uso potencial dessa técnica. As vantagens da assinatura espectral em relação aos métodos tradicionais são a rapidez, a redução de custos, a não utilização de reagentes e a não destruição das amostras (BROWN et al., 2006; VISCARRA ROSSEL et al., 2006a, b).

Segundo Stoner e Baumgardner (1981), a reflectância do solo é uma propriedade cumulativa derivada do comportamento espectral inerente da combinação heterogênea de seus componentes, como tamanho de partícula, estrutura do solo, rugosidade superficial, umidade, teor de matéria orgânica, teor de minerais carbonatados, presença ou não de quartzo e dos óxidos de Fe. Fatores como a mineralogia da fração argila (DRURY, 2001; CHABRILLAT et al., 2002), o tamanho da partícula (DRURY, 2001; MENESES; MADEIRA NETTO, 2001), a rugosidade e a umidade do solo (HUMMEL et al., 2001; MULLER; DÉCAMP, 2001) também influem na resposta espectral do solo. Para poder quantificar os atributos do solo a partir de sua resposta espectral, é necessário ter um bom entendimento das relações entre seus componentes e sua radiação eletromagnética (SOUZA JR et al., 2008).

A assinatura espectral é a intensidade relativa com que cada corpo reflete ou emite a radiação eletromagnética nos diversos comprimentos de onda, é única para cada substância, funcionando como uma impressão digital que permite sua identificação. Tem seu princípio baseado na cor emitida quando o fluxo radiante é incidido sobre a matéria, neste estudo o solo, ou seja, a influência das propriedades do solo sobre a absorção e reflexão da energia medida permite relacionar bandas espectrais, no caso a faixa do visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR) com os atributos do solo, e assim quantificá-los de maneira indireta. Sabendo disso, quanto mais escura e intensa a cor do solo, mais as características de solos que tem como constituintes a hematita, maghemita e presença de matéria orgânica, causam menor reflectância, ou seja, menor é a energia refletida, ocorrendo o rebaixamento da curva em função do comprimento de onda. Entretanto, quando a amostra de solo apresenta minerais de cores claras, como goethita e com menor intensidade, ocorre a elevação da curva de reflectância, pois a maior parte da energia incidida na

amostra foi refletida. Portanto, a cor é um atributo morfológico confiável na identificação dos óxidos de ferro (RESENDE, 1976; SCHWERTMANN, 1993).

Essa técnica indireta permite que a luz incidente sobre uma determinada amostra de solo seja refletida de maneira difusa, causando uma curva de reflectância, em um intervalo de comprimento de onda que varia normalmente de 400 a 700 nm. Obtendo as informações espectrais, estas são convertidas em valores triestímulos X, Y e Z, e destes valores determinam-se os valores de Munsell, sendo a matiz, valor e croma (BARRÓN et al., 2000; CAMPOS et al., 2003; VISCARRA ROSSEL; BEHRENS, 2010).

Usualmente, a cor é definida no campo pela sua comparação visual às cores existentes na Carta de Munsell (MUNSELL COLOR COMPANY, 1975). Nessa carta de cores, constam o matiz (ou pigmento), o valor (ou tonalidade) e o croma (ou intensidade), sendo que o matiz se refere à combinação dos pigmentos vermelho e amarelo; o valor indica a proporção da cor cinza (preto e branco), e o croma, a contribuição do matiz. Os matizes variam de 5R (100% de vermelho e 0% de amarelo) a 5Y (0% de vermelho e 100% de amarelo).

Apesar de o sistema Munsell ter sido proposto inicialmente em ciências agrárias, para fins pedológicos na classificação de solos, ele pode ser utilizado para a definição de áreas de manejo específico para as culturas da cana-de-açúcar (MARQUES JR et al., 2014), da soja (RESENDE et al., 2014) e do café (CARMO et al., 2016), estudos de gênese de solo (DANTAS et al., 2014a), quantificação do potencial de erosão (DANTAS et al., 2014b), e identificação de áreas com diferentes potenciais de adsorção de fósforo (CAMARGO et al., 2015; PELUCO et al., 2015).

Com o advento e evolução dos sensores e de técnicas mais refinadas de quantificação, a cor ganha novas aplicações e perspectivas para a caracterização da variabilidade dos atributos do solo de caráter agrônômico, como o teor de argila, o fósforo adsorvido e a saturação por bases, por exemplo (MARQUES JR et al., 2014; CAMARGO et al., 2015). Os parâmetros da cor do solo (matiz, valor, croma), quando determinados pela leitura da reflectância do solo na faixa do visível (350 a 750 nm), podem ser utilizados na estimativa do teor de óxidos de ferro, como hematita e goethita (VISCARRA ROSSEL et al., 2010; BAHIA et al., 2015), carbono total (XIE et al., 2011) e outras importantes propriedades do solo que covariam com ela, tanto do ponto de vista pedológico quanto do agrônômico (BARRÓN et al., 2000; BARRÓN; TORRENT, 2013).



O comportamento espectral do solo depende de sua composição química, física, biológica e mineralógica, sendo a matéria orgânica (MO) e os óxidos de ferro (Fe) os principais constituintes que afetam o comportamento espectral (DALMOLIN et al., 2005). Devido ao solo apresentar variações em sua composição e a relação existente com a reflectância espectral, pode-se prever, de maneira, confiável, rápida e não invasiva, as características físicas e químicas do solo (SHEPHERD; WALSH, 2002; DALMOLIN et al., 2005).

Portanto, a caracterização detalhada das TPIs pode contribuir para a compreensão de sua gênese e comportamento em ambientes específicos da Amazônia, permitindo o estabelecimento de hipóteses na reprodução de artefatos de suas principais qualidades.

### 1.3 REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. Investigación arqueológica de los antrosolos de Araracuara (Amazonas). **Arqueología Colombiana**, Colômbia, v.31, p. 1-101, 1986.

AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JR, J.; OLIVEIRA, I. A.; MANTOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 38, p. 397-406, 2014.

AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; BAHIA, A. S. R. S.; SANTOS, L. A. C. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. **Geoderma** (Amsterdam), v. 262, p. 35-44, 2016.

BAHIA, A. S. R.; MARQUES JR, J.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. B.; LA SCALA JR, N. Field-scale spatial correlation between contents of iron oxides and CO<sub>2</sub> emission in an Oxisol cultivated with sugarcane. **Science Agricola**, Piracicaba (USP. Impresso), v. 72, p. 157-166, 2015.

BAHIA, A. S. R.; MARQUES JR, J.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; SIQUEIRA, D. S.; LA SCALA JR, N. Iron oxides as proxies for characterizing anisotropy in soil CO<sub>2</sub> emission in sugarcane areas under green harvest. **Agriculture Ecosystem Environment**, Amsterdam, v. 192, p. 152–162, 2014.

BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. **Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa**. In: Novais, R.F., Alvarez, V., V. H., Schaefer, C.E.G.R. (Eds.), Tópicos em ciência do solo 1. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, Viçosa, 2000, pp. 139–162.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. **Iron, manganese and aluminium oxides and oxyhydroxides**. In: NIETO, F.; LIVI, K.J.T.; OBERTI, R. (Ed.). Minerals at the nanoscale. London: European Mineralogical Union: Mineralogical Society of Great Britain & Ireland, 2013. p. 297-336. (European Mineralogical Union Notes in Mineralogy, v.14).

BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V. RODRIGUES, S. KERN, D. C. Distribuição da porosidade textural e estrutural em solos de Terra Preta Arqueológica. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 4, p. 609-615, 2016.

BENITES, V.M., MENDONÇA, E.S., SCHAEFER, C.E.G.R., NOVOTNY, E.H., REIS, E.L., KER, J.C. Properties of black soil humic acids from high altitude rocky complexes in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 127, p. 104–113, 2005.

BROWN, D. J.; SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G.; MAYS, M. D.; REINSCH, T. G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**. Amsterdam, v.132, p.273–290, 2006.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; BARRÓN, V.; ALLEONI, L. R. F.; BARBOSA, R. S.; PEREIRA, G. T. Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.251/252, p.124-132, 2015.

CAMPOS, M. C. C.; **Pedogeomorfologia aplicada à ambientes Amazônicos do Médio Rio Madeira**. 2009, 260f. Recife, Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2009.

CAMPOS, M. C. C.; SANTOS, L. A. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELI, B. C.; SOARES, M. D. R. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Agro@ambiente**, Boa Vista, v. 6, p. 102-109, 2012.

CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; NASCIMENTO, M. F.; SILVA, D. M. P. Estoque de carbono no solo e agregados em Cambissolo sob diferentes manejos no sul do Amazonas. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, vol. 11 n. 2 Taubaté, 2016.

CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição a automatização do método para fins de classificação de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.28, p.853–863, 2004.

CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M.; QUARTAROLI, J. A. Determinação indireta do teor de hematita no solo a partir de dados de radiometria e colorimetria. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 38, n. 4, p. 521-528, 2003.

CARMO, D. A. B.; MARQUES JR, J.; SIQUEIRA, D. S.; BAHIA, A. S. R. S.; SANTOS, H. M.; POLLO, G. Z. Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1261-1271, 2016.

COSTA, J. A; KERN, D. C.; COSTA, M. L.; RODRIGUES, T. E.; KÄMPF, N.; LEHMANN, J.; FRAZÃO, F. J. L. **Geoquímica das Terras Pretas Amazônicas**. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 162-171.

COSTA, M. L.; KERN, D. C.; PINTO, A. H. E.; SOUZA, J. R. T. The Ceramic Artifacts in Archaeological Black Earth (Terra Preta) From Lower Amazon Region, Brazil: Mineralogy. **Acta Amazônica**. Manaus, v.34, p.165-178, 2004.

CUNHA, T. J. F. **Ácidos Húmicos de Solos Escuros da Amazônia (Terra Preta do Índio)**. 2005, 139f. Tese de Doutorado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro. 2005.

CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; CANELLAS, L. P.; RIBEIRO, L. P.; BENITES, V. M.; SANTOS, G. A. Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (terra preta de índio) in the brazilian amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 85-93. 2009.

DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; KLAMT, E.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.

DANTAS, J. S.; MARTINS FILHO, M. V.; MARQUES JR, J.; RESENDE, J. M. A.; TEIXEIRA, D. B.; BARBOSA, R. S.; SIQUEIRA, D. S. Coeficiente de erodibilidade em sulcos e entressulcos de Argissolos coesos estimado pela cor do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v.49, p.700-707, 2014a.

DANTAS, J. S.; MARQUES JR, J. MARTINS FILHO, M. V.; RESENDE, J. M. A.; CAMARGO, L. A.; BARBOSA, R. S. Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.38, p.1039-1050, 2014b.

DEARING, J.A. **Environmental magnetic susceptibility: using the Bartington MS2 system**. 2nd ed. Kenilworth: Chi Publishing, 1999. 54p.

DEARING, J.A.; HAY, K.L.; BABAN, S.M.J.; HUDDLESTON, A.S.; WELLINGTON, E.M.H.; LOVELAND, P.J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, v.127, p.728-734, 1996.

DEMATTE, J.A.M.; SOUSA, A.A.; ALVES, M.C.; NANNI, M.R.; FIORIO, P.R.; CAMPOS, R.C. Determining soil water status and other soil characteristics by spectral proximal sensing. **Geoderma**, Amsterdam, v.135, p.179-195, 2006.

DRURY, S. A. **Image interpretation in geology**. 3.ed. Cheltenham, Nelson Thornes, 2001. 290p.

ERICKSON, C. L. **Historical ecology and future explorations**. In: LEHMANN, J.; KERN, D.; GLASER, B.; WOODS, W. (Eds.). Amazonian dark earths: origins, properties and management. Dordrecht: Kluwer, 2003, p.455-500.

FALCÃO, N. P. S., N. COMERFORD; J. LEHMANN. **Determining Nutrient Bioavailability of Amazonian Dark Earth Soils - Methodological Challenges**. Amazonian Dark Earths: Origins, Properties, Management. J. LEHMANN, D. C. KERN, B. GLASER, & W. I. WOODS. Boston, Kluwer Academic Publishers: 2003, 255-270.

FALCÃO, N. P. S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (Carica papaya L.). **Acta Amazônica**, Manaus, v. 36, p. 401-406. 2006.

GLASER, B. **Eigenschaften und Stabilität des Humuskörpers der "Indianerschwarzerden" Amazoniens**. Bayreuther Bodenkundliche Berichte 68, University of Bayreuth, Germany, 1999, 196 p.

GLASER, B. Prehistorically modified soils of Central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 362, p. 187-196, 2007.

GLASER, B.G. **The Grounded Theory perspective: Conceptualizations contrasted with description**, Sociology Press, Mill Valley, CA. 2001.

GÓMEZ-ROBLEDO, L.; LÓPEZ-RUIZ, N.; MELGOSA, M.; PALMA, A. J.; CAPITÁN-VALLVEY, L. F.; SÁNCHEZ-MARAÑÓN, M. Using the mobile phone as Munsell soil-colour sensor: An experiment under controlled illumination conditions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 200–208, 2013.

GRIMALDI, C.; GRIMALDI, M.; MILLET, A.; BARIAC, T.; BOULEGUE, J. Behaviour of chemical solutes during a storm in a rainforest headwater catchment. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 1, p. 93-106, 2004.

GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.64, p. 2174-2180, 2000.

HUMMEL, J. W.; SUDDUTH, K. A.; HOLLINGER, S. E. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor. **Computers Electr. Agric.**, v. 32, p. 149-165, 2001.

KÄMPF, N.; KERN, D. C. **O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia**. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; CARDOSO, E. J. (Ed.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005, p.277-320.

KERN, D. C.; D'AQUINO, G.; RODRIGUES, T. E.; FRAZÃO, F. J. L.; SOMBROEK, W.; NEVES, E. G.; MYERS, T. P. **Distribution of antropogenic dark earths**. In: LEHMANN, J.; KERN, D.C.; WOODS, W.; GLASER, B. (Org.). *Amazonian dark Earths: Origin, Properties, Management*. 1 ed. Norwell: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, v.1, p.51-76, 2003.

KODAIRA, M.; SHIBUSAWA, S. Using a mobile real-time soil visible-near infrared sensor for high resolution soil property mapping. **Geoderma**, Amsterdam, n.199, p.64-79, 2013.

LEHMANN, J.; SILVA JUNIOR, J. P.; STEINER, C.; NEHLS, T.; ZECH, W.; GLASER, B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. **Plant and Soil**, v. 249, p. 343-357, 2003.

LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E. R.; MELLO, J. W. V.; GILKES, R. J. ; KER, J. C. Pedogenesis and pre-Colombian land use of "Terra Preta Anthrosols" ("Indian black earth") of western Amazonia. **Geoderma**, Amsterdam, v.11, n.1-2, p. 1-17, 2002.

MADARI, B., BENITES, V. M., CUNHA, T. J. F. **The effect of management on the fertility of Amazonian dark earths**. In LEHMANN, J., KERN, D. C., GLASER, B., WOODS, W.I. (eds) Amazonian dark earths. Origin, properties, management. Kluwer:Dordrecht. 2003. p. 407-432.

MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, Amsterdam, v. 219-220, p. 63-71, 2014.

McBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; VISCARRA ROSSEL, R. Spectral soil analysis and inference systems: a powerful combination for solving the soil data crisis. **Geoderma**, Amsterdam, v.136, p.272-278, 2008.

MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S., orgs. **Sensoriamento remoto: Reflectância dos alvos naturais**. Brasília, UnB/Embrapa Cerrados, 2001. 262p.

MILLER, E. T. **A limitação ambiental como barreira à transformação do período Formativo no Brasil**. Tecnologia, produção de alimentos e formação de aldeias no sudoeste da Amazônia. In: LEDERGERBER-CRESPO, P. (Ed.). **Formativo Sudamericano, una revaluación**. Quito: Abya-Yala, 1999. p. 331-339.

MONTANARI, R.; SOUZA, G. S. A.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JR, J.; SIQUEIRA, D.S.; SIQUEIRA, G.M. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agricola**, v. 13, p.542-52, 2012.

MORA, S. **Cultivars, anthropic soils, and stability: a preliminary report of archaeological research in Araracuara, Colombian Amazonia**. Pittsburgh: University of Pittsburgh. 1991. (Latin American Archaeology Report, n.2).

MORAIS, R. R.; MUNIZ, A. W.; TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C. Efluxo de CO<sub>2</sub> do Solo em Terra Preta de Índio em Iranduba, AM (Soil CO<sub>2</sub> efflux in Amazonian Dark Earth in Iranduba, AM). **Comunicado técnico 112**. Embrapa. 2015. 5p. DOI: 10.13140/RG.2.1.1652.2083.

MULLER, E.; DÉCAMPS, H. **Modeling soil moisture – Reflectance**. Remote Sens. Environ., 76:173-180, 2001.

MULLER, M. M. L.; GUIMARÃES, M. F.; DESJARDINS, T.; MARTINS, P. F. S. Degradação de pastagens na Região Amazônica: propriedades físicas do solo e crescimento de raízes. **Pesquisa Agropécuaria Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1409-1418, nov. 2001.

MUNSELL COLOR COMPANY. **Munsell soil color charts**. Baltimore, 1975.

NEVES JUNIOR, A. F. **Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central**. 2008, 94f. Tese (Doutorado em Solos e

Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

NEVES, E. G. **Levantamento arqueológico da área de confluência dos rios Negro e Solimões, estado do Amazonas**: Continuidade das escavações, análise da composição química e montagem de um sistema de informações geográficas. Project report. São Paulo: FAPESP, 2003.

OLIVEIRA, I. A. **Suscetibilidade magnética da terra preta de índio amazônica: influência geológica, pedogenética e antrópica**. 2017. 90f. Tese (Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo)) – Universidade Estadual Paulista, FCAV, Jaboticabal, São Paulo, 2017.

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JR, J.; MILTON CÉSAR COSTA CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; FERRAUDO, A. S. Multivariate technique for determination of soil pedoenvironmental indicators in Southern Amazonas. **Acta Scientiarum**, v. 39, n. 1, p. 99-108, 2017.

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 668-81, 2015.

PANOSSO, A. R.; PERILO, L. I.; FERRAUDO, A. S.; PEREIRA, G. T.; MIRANDA, J. G. V.; LA SCALA JR, N. Fractal dimension and anisotropy of soil CO<sub>2</sub> emission in a mechanically harvested sugarcane production area. **Soil Tillage Research**, v. 124, p. 8-16, 2012.

PELUCO, R. G.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. de B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, p.259-266, 2015.

PETERSEN, J. B.; NEVES, E. G.; HECKENBERG, M. J. **Gift from the past: terra preta and prehistoric occupation in Amazonia**. In: McEWAN, C.; BARRETO, C.; NEVES, E. (Eds.). Unknown Amazon. culture in nature in Ancient Brazil. London: British Museum, 2001. p. 86-107.

RESENDE, J. M. do A.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; DANTAS, J. S.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. D. B. Variabilidade espacial de atributos de solos coesos do leste Maranhense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, p.1077-1090, 2014.

RESENDE, M. 1976. **Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of Central Plateau of Brazil**. Purdue University, Purdue (237 pp. (Thesis PhD).

RESENDE, M., CURI, N., REZENDE, S. B., CORREA, G. F., 2007. **Pedologia: Base para distinção de ambientes**. 5. ed. rev. UFLA, Lavras-MG (322 p.il).

SANTOS, L. A. C.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. M. P.; MARQUES JUNIOR, J.; FRANCA, A. B. C. Caracterização e gênese de

terras pretas arqueológicas no sul do Estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 825-836, 2013.

SANTOS, L. A. C.; CAMPOS, M. C. C.; BERGAMIN, A.C.; Silva, D. M. P.; MENDONÇA JÚNIOR, A. F. Caracterização física de seis sítios de Terras Pretas Arqueológicas na região de Apuí-AM. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 6, p. 167-174, 2011.

SCHMIDT, M. W. I.; NOACK, A. G. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. **Global Biogeochemical Cycles** 14, 2000.

SCHWERTMANN, U. **Relations between iron oxides, soil color, and soil formation**. In: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. Soil color. Madison: Soil Science Society of America, 1993, p.51-69.

SCHWERTMANN, U. The influence of aluminum on iron oxides. XLAluminumsubstituted maghemite in soils and its formation. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v. 48, p. 1462-1463, 1984.

SERGIO, C. S.; SANTANA, G. P.; COSTA, G. M. DA; HORBE, A. M. C. Identification and characterization of maghemite in ceramic artifacts and archaeological black earth of Amazon region. **Soil Science**, v. 171, n. 1, p. 59-64, 2006.

SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. Desenvolmento freflectance spectrallibraries for characterization of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 988-998, 2002.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, p. 55-66, 2010.

SMITH, N. K. H. Anthrosols and human carrying capacity in Amazonia. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 70, n.4, p. 553-566,1980.

SOMBROEK, W. G. **Amazon soils: a reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region**. Wageningen: Centre for Agricultural Publications and Documentation. 1966.

SOMBROEK, W; KERN, D; RODRIGUES, T.; CRAVO, M. S.; CUNHA, T. J. F.; WOODS, W.; GLASER, B. **Terra Preta e Terra Mulata: sua potencialidade agrícola, sustentabilidade e replicagem**. 2002.

SOUZA JR, J. G. A.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENUÍ, A. M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, viçosa, v. 32, p. 727-738, 2008.

STIGLITZ, R.; MIKHAILOVA, E.; POST, C.; SCHLAUTMAN, M.; SHARP, J. Using an inexpensive color sensor for rapid assessment of soil organic carbon. **Geoderma**, Amsterdam, v. 286, p. 98–103, 2017.

STONER, E. R.; BAUMGARDNER, M. F. Characteristics variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 45, p. 1161-1165, 1981.

TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. **As Terras Pretas de índios da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus, Editora da Universidade Federal do Amazonas – EDUA, 2010.

TORRENT, J.; BARRON, V. **Laboratory measurements of soil color: theory and practice**. In: Bigham, J.M., Ciolkosz, E.J. (Eds.), *Soil Color*. Soil Science Society of America, pp. 21–33, 1993, (Special Publication).

TORRENT, J.; BARRÓN, V.; LIU, Q. S. Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobic soil. **Geophys Res Lett**. v. 33, p. 1-4, 2006.

VISCARRA ROSSEL, R. A., MCGLYNN, R. N., McBRATNEY, A. B. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.137, p.70-82, 2006b.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; BEHRENS, T. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. **Geoderma**, Amsterdam, v. 158, p. 46-54, 2010.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; McBRATNEY, A. B.; JANIK, L. J.; SKJEMSTAD, J. O. Visible, near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 131, n. 1–2, p. 59–75, 2006a.

VISCARRA ROSSEL, R.A., ADAMCHUK, V.I., SUDDUTH, K.A., MCKENZIE, N.J., LOBSEY, C. Proximal soil sensing: an effective approach for soil measurements in space and time, chapter 5. **Advances in Agronomy**, v. 113, p. 237–283, 2011.

WOODS, W. I. **Comments on the Black Earths of Amazonia**. In: SCHOOLMASTER, F.A. (ed.) *Papers and Proceedings of the Applied Geography Conferences*. v. 18, p.159-165, 1995. Denton, Texas: Applied Geography Conferences, Inc.

WOODS, W. I.; McCANN, J. M. **The anthropogenic origin and persistence of Amazonian dark earths**. In: CAVIEDES, C. (Ed.). *Yearbook Conference of Latin Americanist Geographers*. v. 25. Austin TX: University of Texas, 1999. p. 7-14.



## **CAPÍTULO 2 – Caracterização de diferentes ambientes com Terra Preta de Índio por meio da assinatura espectral**

**RESUMO** - A intensa busca por métodos mais eficazes para fazer diagnósticos das características de solos como é o caso da Terra Preta de Índio (TPI) se fazem cada vez mais necessário. A assinatura espectral se apresenta como uma ferramenta viável para levantar informações essenciais na caracterização da TPI. Diante disso, o objetivo deste trabalho é caracterizar diferentes ambientes com presença de horizonte antropogênico de TPI por meio da assinatura espectral. A área de estudo localiza-se na região sul do Amazonas distribuídas no município de Apuí, onde foram abertas trincheiras para caracteriza-los e coletar amostras dos horizontes antropogênicos para serem feitas análises físicas, químicas, mineralógicas e leituras de assinatura espectral. Foram determinados os valores de média de cada atributo referente aos seis horizontes antropogênicos expressos por gráficos de barras relacionando-os com difratogramas e espectros. A Gt e Ct foram os minerais que apresentaram dominância nos ambientes de TPI, evidenciados pelas faixas espectrais e corroborado pelos difratogramas, reforçando a eficiência da assinatura espectral para a caracterização de TPIs. A assinatura espectral foi eficiente para diferenciar as classes de solos, apresentando sensibilidade principalmente aos teores de matéria orgânica presentes em abundância nos horizontes antropogênicos das TPIs.

**Palavras-chave:** cor do solo, horizonte antrópico, espectroscopia de reflectância difusa; solos amazônicos

## 2.1. INTRODUÇÃO

A busca por informações sobre a Terra Preta de Índio (TPI), que também vêm sendo denominada de biochar natural é um dos principais objetivos de estudo por pesquisadores tanto no cenário nacional como no cenário mundial. Cernansky (2015) apresenta algumas justificativas para o estudo da TPI e biochar: a) entender como as propriedades químicas e físicas das partículas de biochar afetam a água movendo-se através do solo; b) seu poder de remover poluentes, d) alterar as comunidades microbianas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Estas podem ser algumas possibilidades para auxiliar as regiões com solos pobres e intemperizados como é o caso dos trópicos.

A maior parte dos trabalhos encontrados referentes a estes solos de TPI estão relacionados a sua fertilidade (MOREIRA, 2006), sendo ainda muito incipientes informações referentes a sua mineralogia (SANTOS et al., 2013) e principalmente aos óxidos de ferro (AQUINO et al., 2016) tornando-se cada vez mais necessárias pesquisas direcionadas ao conhecimento mais detalhado nas TPIs.

Por outro lado, o atributo da cor do solo é bastante usual desde os primórdios da ciência do solo e vêm sendo aprimorado pelo SiBCS (Sistema Brasileiro de Classificação do Solo) que utiliza sistema de cor Munsell (matiz, valor e croma) para prever a qualidade do solo, muito além das diferenças visuais de cores (BOTELHO et al., 2006). Neste sentido, a cor tem sido utilizada como indicativo de presença ou ausência de óxidos de ferro (RESENDE et al., 2007), e também outras características do solo como a  $fCO_2$  (BAHIA et al., 2016) e planta como a produtividade do café (CARMO et al., 2016). No tocante, a TPI apresenta uma cor bem característica a qual a caracteriza morfologicamente, onde Aquino et al. (2016) a caracterizou e ao comparar a cor por assinatura espectral com o método visual que utiliza a carta Munsell, provou que não são apresentadas as cores tão negras como de fato é evidenciado nos trabalhos em TPI.

Assim, a assinatura espectral é a intensidade relativa com que cada corpo reflete ou emite a radiação eletromagnética nos diversos comprimentos de onda, é única para cada substância, funcionando como uma impressão digital que permite sua identificação. Tem apresentando como uma das principais vantagens o fato de ser uma técnica rápida, econômica, não necessitando de reagentes, por ser um método não destrutivo (BROWN et al., 2006; VISCARRA ROSSEL et al., 2006; BAHIA et al., 2014). As informações obtidas através do espectro no comprimento de

onda de 380 a 780 nm são convertidas em valores de triestímulos X, Y e Z, e destes valores determinam-se os valores de Munsell (matiz= comprimento de onda da luz; valor= brilho ou tonalidade; croma= intensidade ou pureza da cor em relação ao cinza) (BARRÓN et al., 2000; CAMPOS et al., 2004; VISCARRA ROSSEL; BEHRENS, 2010, CARMO et al., 2016).

Muitos trabalhos utilizando a assinatura espectral para mensurar atributos de solo e planta são encontrados na literatura. Assim destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Bahia et al. (2014); (2015) que avaliaram efluxo de CO<sub>2</sub>; Carmo et al. (2016) avaliando a produtividade do café; Marques Jr et al. (2014) com estudos em áreas de manejo específico para cultura da cana-de-açúcar; Resende et al., (2014) com cultura da soja; Dantas et al. (2014a, b) estudando a gênese e quantificação do potencial de erosão; Peluco et al. (2015) na identificação de áreas com diferentes potenciais de adsorção de fósforo; Mouazen et al. (2006) avaliando os atributos químicos do solo; Demattê et al. (2011) estudando a matéria orgânica; Cezar et al. (2012); Ferraresi et al. (2012) determinando a granulometria e Aquino et al. (2016) estudando a caracterização da cor e óxidos de ferro em TPI.

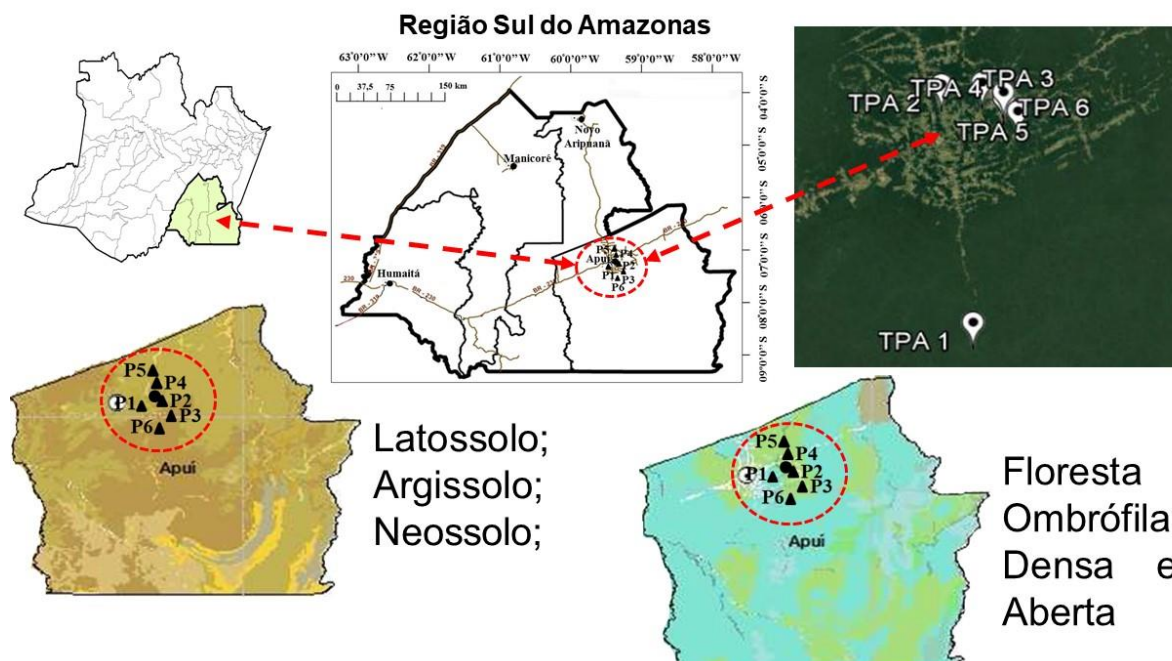
Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi mensurar os atributos do solo de ambientes com TPIs através da assinatura espectral, visando tornar-se uma alternativa eficiente na identificação e caracterização destes ambientes.

## **2.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.2.1 Localização e caracterização da área**

A área de estudo localiza-se na região Sul do Amazonas distribuídas no município de Apuí, sob as coordenadas 7° 11' S e 59° 53' W (Figura 1). O clima na região é quente e úmido com estação seca pouco pronunciada, do tipo “Am” pela classificação de Köppen (1948). A temperatura média anual varia entre 25 e 27 °C, com umidade relativa do ar em torno de 85 %, e precipitações pluviais acima de 2.200 mm por ano. O período mais chuvoso corresponde ao trimestre janeiro a março e a época menos chuvosa de junho a agosto. As menores temperaturas verificam-se nos meses de junho e julho, com mínimas absolutas de 10 a 16 °C (CPRM, 2001).

A geologia da região de Apuí envolve o domínio geológico formado por rochas mais antigas (Proterozoicas e Paleozoicas), inseridas na área cratônica do Escudo Brasil Central, com rochas predominantemente cristalinas (granitos e gnaisses,



**Figura 1.** Localização da área dos locais de coleta dos seis perfis de solo com Terra Preta de Índio no município de Apuí no sul do Amazonas.

coberturas vulcânicas e rochas metassedimentares) (SDS, 2004). Destacam-se as “formações pioneiras”, caracterizadas por uma vegetação campestre e arbustiva desenvolvida em áreas sujeitas a periódicas inundações. O cerrado ocupa invariavelmente áreas de platôs sedimentares, registrando-se notáveis campos de areia branca em meio à baixa vegetação. Já a floresta densa ocupa os terraços dos rios e feições submontanhosas. A floresta aberta aparece em pequenas manchas sob forma de palmáceas (CPRM, 2005).

Tabela 1. Identificação dos perfis, coordenadas, localização, ocupação, posição, município.

Perfil	Coordenada	Local	Ocupação	Posição	Município
1	S 07°6'32,8" W 59°51'6,9"	<sup>1</sup> Vic. Mariano Km 4	Milho	Topo Baixo	Apuí
2	S 07°6'54,9" W 059°52'22,1"	Vic. Sulino Km 11	Pomar	Topo	Apuí
3	S 07°7'9,1" W 59°46'1,1"	BR 230 Km 17	Pastagem	Topo	Apuí
4	S 07°9'5,7" W 059°42'52,1"	Vic. Fábio Lucena Km 26	Café	Topo	Apuí
5	S 07°10'4,4" W 59°42'55,4"	Vic. Fábio Lucena Km 28	Pastagem	Meia encosta	Apuí
6	S 07°12'28,4" W 059°40'22,3"	Vic. Paredão Km 34	Capoeira	Topo	Apuí

<sup>1</sup>Vic.= Vicinal

Os locais que foram selecionados para a abertura de trincheira apresentavam um tempo médio de uso e ocupação de forma não intensiva, sem

intervenção mecânica e adubações por pelo menos 10 anos. Nestes locais foram abertas trincheiras e em seguida coletado amostras referentes aos seus horizontes conforme Santos et al. (2005). Com este material foram feitas análises físicas, químicas, mineralógicas e também de medidas indiretas (assinatura espectral).

### 2.2.2 Análises laboratoriais

As análises texturais foram realizadas utilizando uma solução de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de alta rotação por 15 min. A fração argila foi separada por sedimentação utilizando-se de pipeta para sua remoção, as areias grossa e fina por tamisação e o silte foi calculado por diferença (EMBRAPA, 2011).

O Ca (cálcio), Mg (magnésio), K trocável (potássio), P disponível (fósforo) e AP (acidez potencial (H+Al)) foi extraído utilizando-se o método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 1987). O CO (carbono orgânico) foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yeomans e Bremner (1988). A MO (matéria orgânica) foi estimada com base no carbono orgânico. Utilizando resultados das análises químicas, foram calculadas a SB (soma de bases) e a CTC (capacidade de troca catiônica).

Os minerais da fração argila, Hm (hematita), Gt (goethita), Ct (caulinita) e Gb (gibbsita) foram caracterizados por DRX (difratometria de raio-X) pelo método do pó após a concentração dos óxidos de ferro fervendo a fração argila com NaOH (hidróxido de sódio) (NORRISH; TAYLOR, 1961) e desferrificação da fração argila pelo método de Mehra e Jackson (1960). As amostras foram difratadas com velocidade de varredura de 1° 2θ min<sup>-1</sup> utilizando Mini-Flex Rigaku II (20mA, 30 kV), equipado com radiação Cu Kα. A razão Hm/(Gt+Hm) foi estimada comparando as áreas dos picos obtidos da Hm/(Gt+Hm) DRX com as proporções das relações obtidas a partir de misturas padrão Gt-Hm. As porcentagens de Hm e Gt foram calculadas alocando-se a diferença entre Ferro ditonito e Ferro oxalato a estes óxidos. A razão Ct/(Ct+Gb) foi calculada utilizando as áreas dos picos dos reflexos Gb (002) e Ct (001).

Na terra fina seca ao ar (TFSA), os elementos alumínio e ferro foram extraídos por digestão com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1:1 e o silício, por posterior dissolução alcalina. Os resultados foram expressos na forma de óxidos (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>), de acordo com Embrapa (1979). A determinação do ferro ditonito (Fe<sub>d</sub>) seguiu metodologia de

Mehra e Jackson (1960), e a determinação do ferro oxalato ( $\text{Fe}_o$ ) seguiu a metodologia de Camargo et al. (1986).

Com os resultados destas análises e descrição dos solos, os perfis foram classificados de acordo com Embrapa (2013): P1 – Latossolo Amarelo distrófico antrópico (LAd), P2 – Argissolo Amarelo distrófico típico (PAd1), P3 – Argissolo Amarelo distrófico típico (PAd2), P4 – Argissolo Amarelo distrófico típico (PAd3), P5 – Neossolo Litólico Eutrófico típico, (RLe), P6 – Argissolo Amarelo distrófico típico (PAd4), conforme descrito por Aquino et al. 2016.

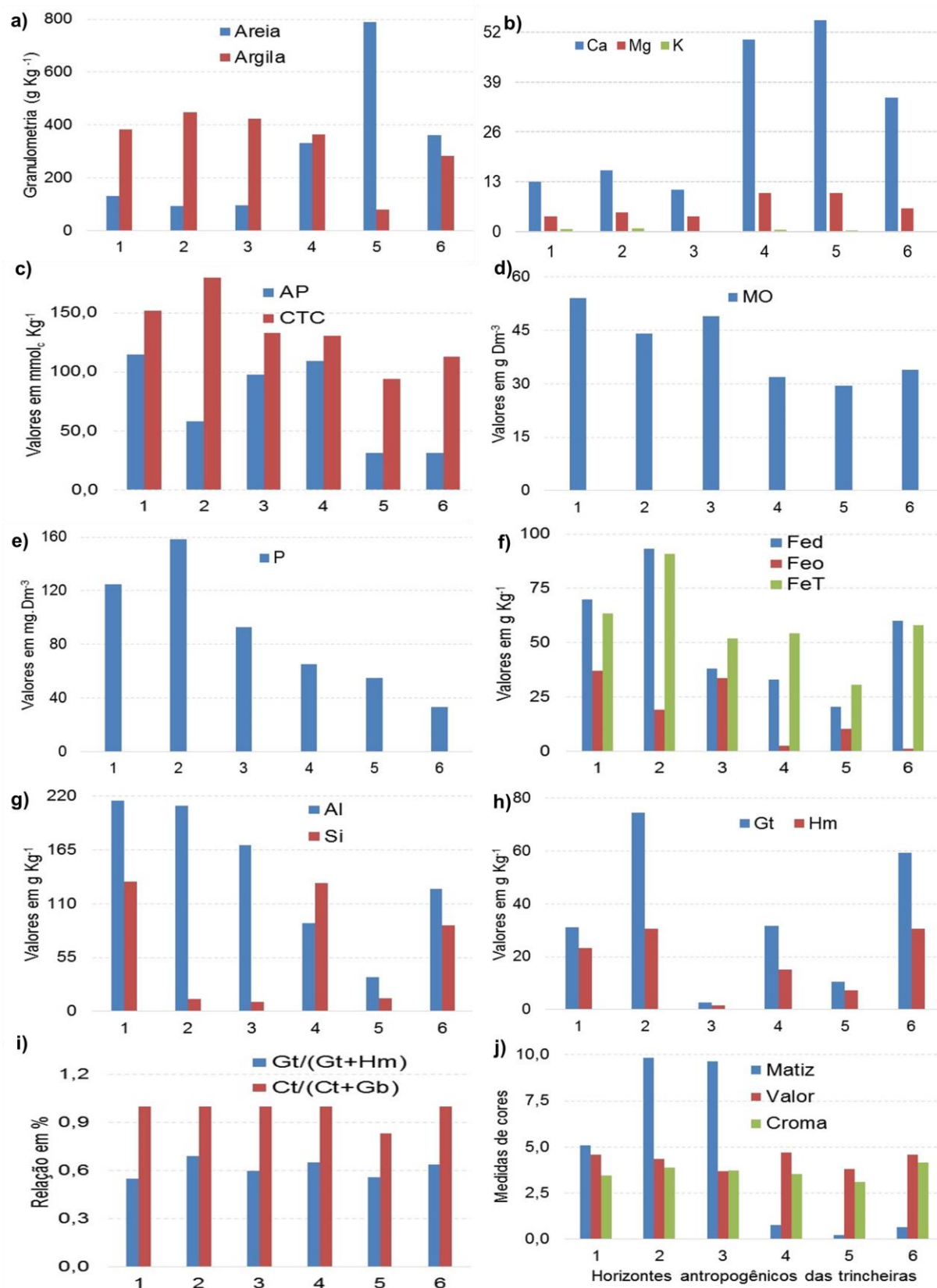
### **2.2.3 Determinação da assinatura espectral**

Para a obtenção dos espectros da assinatura espectral, as avaliações foram feitas com o sensor de laboratório Lambda 950 UV/Vis/NIR (PerkinElmer, United Kingdom). Foi moído aproximadamente 0,5 g de terra fina seca ao ar até obtenção de coloração constante e colocado em um porta-amostra (16 mm). Os valores de reflectância foram determinados a cada 0,5 nm no intervalo de 250 a 2500 nm (VIS e NIR). Para a identificação da Gt, foram utilizados os intervalos mínimos de 415-425 nm e máximos de 440-450 nm, e para a hematita, intervalos mínimos de 530-545 nm e máximos de 575-590 nm, caulinita e gibbsita na faixa espectral entre 1880 a 2300 nm.

Em seguida foram determinados os valores de triestímulo XYZ definidos pela Comisión Internacional de L'Eclairage no intervalo de 380 a 780 nm. A partir das coordenadas XYZ foram deduzidos os valores Munsell (matiz, valor e croma), utilizando o programa Munsell Conversion versão 6.4, conforme Barrón et al. (2000) e Viscarra Rossel e Webster (2011).

## **2.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os teores de areia e argila se apresentam no horizonte antropogênico da TPI 1, 2, e 3 muito similares com a argila próxima de  $400 \text{ g Kg}^{-1}$  e teores de areia próximos a  $100 \text{ g Kg}^{-1}$ . No horizonte antropogênico da TPI 4 e 6 os teores de argila e areia encontram-se próximos ( $\sim 300 \text{ g Kg}^{-1}$ ), e no horizonte antropogênico da TPI 5 os teores de areia predominam ( $\sim 800 \text{ g Kg}^{-1}$ ) (Figura 2a). São comuns nas áreas de TPIs o predomínio da fração areia nos horizontes antropogênicos, e diminuindo em profundidade, tendendo ao maior domínio de argila ou silte, conforme afirmado por Silva et al. (2012), estudando TPIs no sudoeste da Amazônia em um Argissolo, observaram predominância da fração areia em todos os horizontes antropogênicos.



\*Adaptado de Aquino et al., 2016

**Figura 2.** Atributos do solo do horizonte antrópico (Ap1) de seis perfis com Terra Preta de Índio no município de Apuí no sul do Amazonas. Ca= cálcio; Mg= magnésio; K= potássio; AP= acidez potencial; CTC= capacidade de troca catiônica; MO= matéria orgânica; P= Fósforo; Fed= ferro ditionito; Feo= ferro oxalato; FeT= ferro total; Al= alumínio; Si= Silício; Gt= goethita; Hm= Hematita; Ct= caulinita; Gb= gibbissita.

Os teores de Ca são bem superiores as demais bases, seguido pelo Mg e de maneira pouco incipiente o K. (Figura 2b). Já a CTC e AP se encontram com maior variação de seus valores entre os horizontes analisados (Figura 2c). Os maiores teores de Ca ocorrem devido à incorporação de ossos ricos em Ca ou pela maior afinidade do Ca pelas superfícies de troca, resultando em sua menor lixiviação, conforme destacado por Barros et al. (2012). De acordo com Falcão e Borges (2006), a elevada acidez potencial deve-se à presença da matéria orgânica que, em seu processo de decomposição, libera hidrogênio ( $H^+$ ).

Já a MO e P contém os valores mais significativos no horizonte antropogênico da TPI, onde os teores de MO variam de aproximadamente 30 a 55  $g.dm^{-3}$  e o P apresenta o maior teor no horizonte antropogênico da TPI 2 ( $\sim 160 mg dm^{-3}$ ) (Figura 2d, e). Sabe-se que o fósforo apresenta origem orgânica, o que pode explicar suas maiores concentrações. Já os elevados teores de MO podem ser provenientes de restos de ossos humanos e de animais, podendo ser seis vezes mais estáveis que a de solos não antrópicos (PABST, 1991).

O Fed (ferro ditionito) e FeT (ferro total) têm seu maior valor no horizonte antropogênico da TPI 2 e o Feo no horizonte antropogênico da TPI 1 ( $\sim 80, 78$  e  $35 g Kg^{-1}$ ), respectivamente (Figura 2f). Um dos motivos para os baixos teores de Fed são atribuídos ao grande volume pluviométrico na região Amazônica (SILVA NETO et al., 2008), caracterizando ambientes submetidos a condições redutoras, bem como a presença de matéria orgânica que atua como fator inibidor da cristalização dos óxidos de ferro (MEIRELLES et al., 2012).

Os teores de Gt e Hm encontrados nos horizontes antropogênicos ( $\sim 75$  e  $35 g Kg^{-1}$ ), indicam domínio de Gt, confirmado pela relação  $Gt/(Gt+Hm)$ . Da mesma forma o predomínio de Ct é evidenciado pela relação  $Ct/(Ct+Gb)$  (Figura 2h, i). O predomínio da presença de Gt nestes solos pode ser justificado pelo acúmulo de MO nestes perfis, devido a sua formação antrópica (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989). Além disso, a MO favorece a formação da Gt em relação à Hm por condicionar um ambiente redutor e complexação do Fe e Al. Sobre estas condições, uma das fases precursora da Hm é inibida, a ferrihidrita (CURI; FRANZMEIER, 1984).

O maior domínio da Ct é justificado pela sua formação e nucleação ser favorecida pela menor atividade do Al em solução, haja vista que grande parte está complexado a MO (Figura 2c e 3) (SILVA et al., 2012).



Em relação as medidas de cores apenas o matiz teve um comportamento irregular, com valores próximos a 10 no horizonte antropogênico da TPI 2 e 3 e próximos a 0 no horizonte antropogênico da TPI 4, 5 e 6. O valor e o croma em todos os seis horizontes antropogênico da TPI apresentaram comportamento muito similares, sendo, portanto, um fator que irá possibilitar utiliza-los como possíveis preditores de atributos do solo em TPI (Figura 2j).

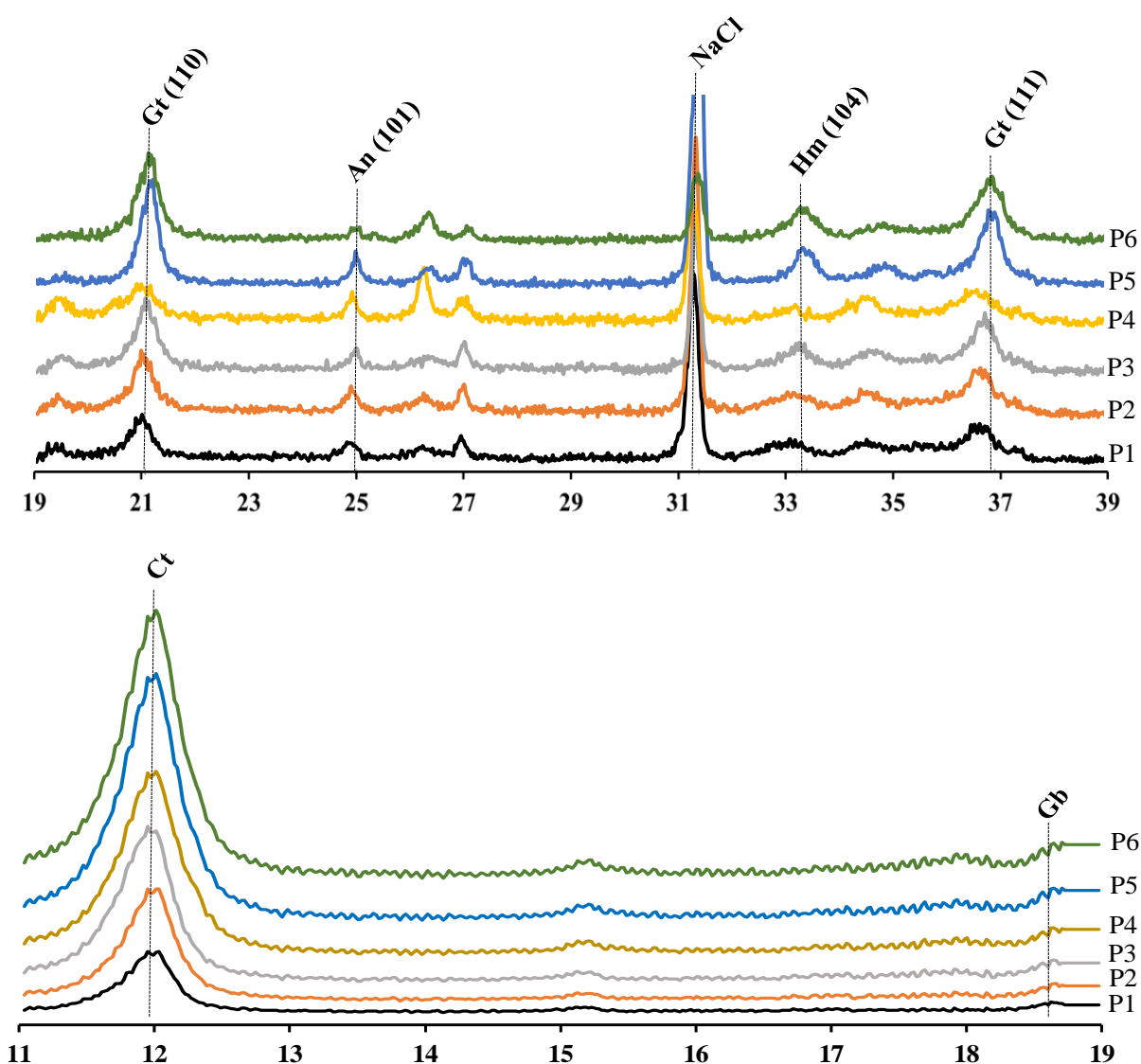
Por outro lado, a variabilidade dos atributos do solo apresentada na figura 2 referentes aos solos com TPI são comentados em outros trabalhos, onde indicam que essa variação pode ocorrer entre as manchas e na mesma mancha de TPI (CAMPOS et al., 2011; SANTOS et al., 2013; AQUINO et al., 2016). Outro aspecto importante são os indicativos de um solo com boa fertilidade oriundos de sua característica antropogênica, representados pelos teores de Ca, Mg, P, SB, CTC, e MO, principalmente quando comparados aos solos comuns da região amazônica que são normalmente de fertilidade pobre (MOREIRA, 2006).

De forma geral, os solos estudados apresentam composição mineralógica semelhante, concentrando os oxihidróxidos de Fe e Al (Hm, Gt, Gb) com dominância de Ct e Gt (Figura 3). Entre os óxidos, a Gt predomina nesses solos, com menores expressões da Hm. De acordo com Costa (1997), a presença de Hm nos solos do Amazonas tem sua formação a partir da destruição de concreções ferruginosas lateríticas decorrentes dos períodos mais secos. Essas concreções são facilmente observadas nos Latossolos Amazônicos.

No horizonte antropogênico da TPI 2, 4 e 5 (Figura 3) foram evidenciados ausência ou Hm de baixa cristalinidade. Este comportamento deve-se, sobretudo as condições pedoambientais dos solos de TPI, como condições redutoras em virtude do elevado teor de material orgânico. Além disso, o clima tropical úmido associado a influência da floresta (antes do desmatamento), favoreceu o intemperismo desses solos por processo de hidratação, redução e lixiviação, em que a Hm é parcialmente transformada em Gt (BEAUVAIS; TARDY, 1993). Este comportamento, justifica a predominância dos Latossolos Amarelos na região Amazônica.

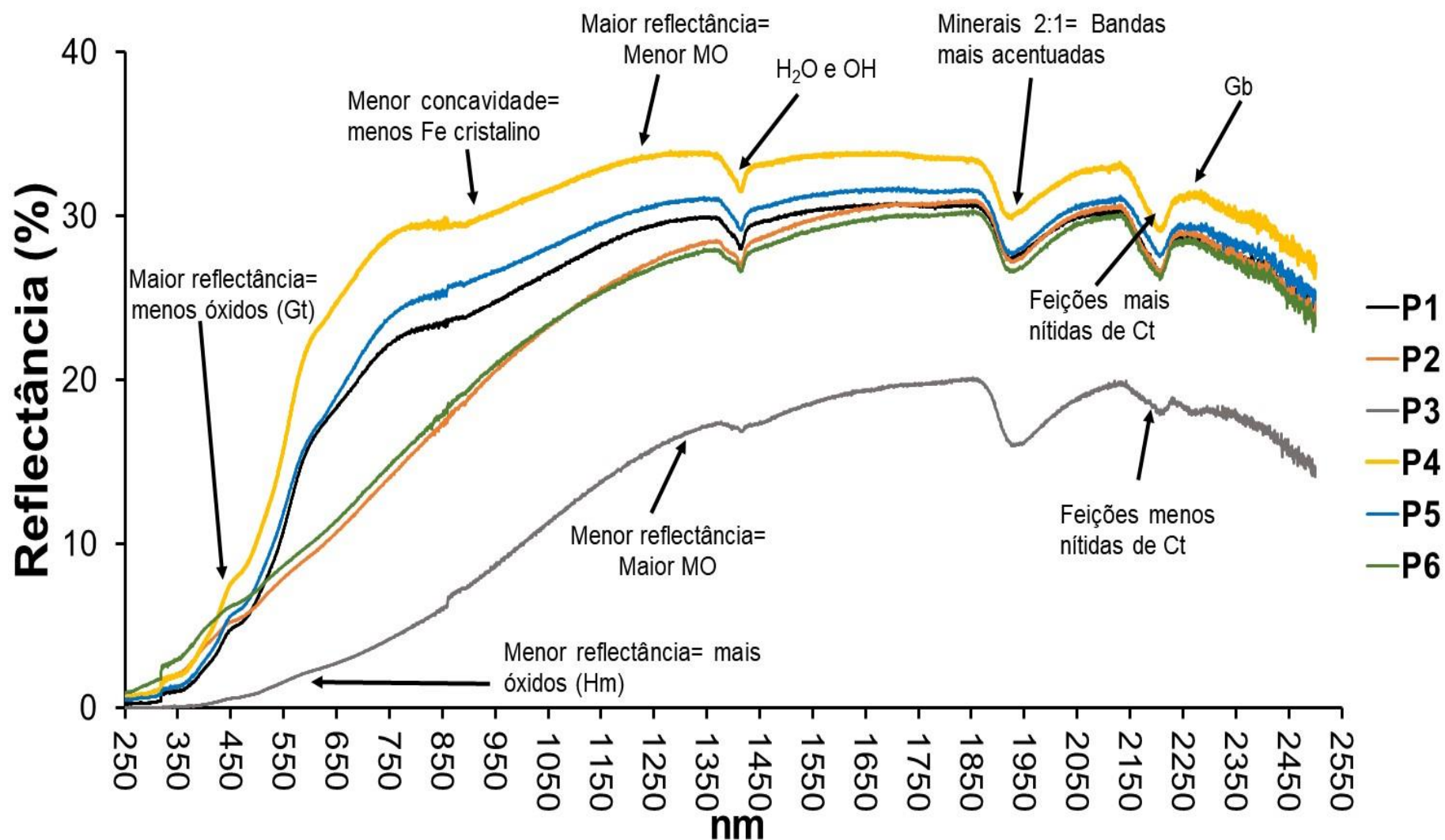
Em todos os horizontes antropogênico da TPI não foi possível identificar a Gb. Evidentemente, a predominância de Ct nos horizontes antropogênico da TPI coibiu a formação de Gb (Figura 3). Trabalhos de Cornu et al. (1998) mostram que a relação Si/Al é da ordem de 8/1 nos solos da Amazônia. Neste caso, o elevado teor de Si

tem promovido a conservação e a estabilidade da Ct e, em contrapartida, preveniu a formação da Gb.



**Figura 3.** Difratogramas do horizonte antrópico (Ap1) de seis perfis com Terra Preta de Índio no município de Apuí no sul do Amazonas. Gt= goethita; NaCl= cloreto de sódio; Hm= hematita; Ct= caulinita; Gb= gibbissita.

Considerando que as informações fornecidas por assinatura espectral de amostras podem ser usadas para gerar informações de maneira mais prática e precisa, verificou-se que a assinatura espectral consegue trazer informações dos atributos do solo compatíveis com os valores obtidos nas análises tradicionais do solo. Porém, o comportamento da assinatura espectral dos solos é afetado por diversos fatores,



**Figura 4.** Curvas espectrais no horizonte antrópico (Ap1) de seis perfis com Terra Preta de Índio no município de Apuí no sul do Amazonas. Gt= goethita; Fe= ferro; H<sub>2</sub>O= água; OH= hidroxila; Gb= gibbissita; MO= matéria orgânica; Ct= caulinita;

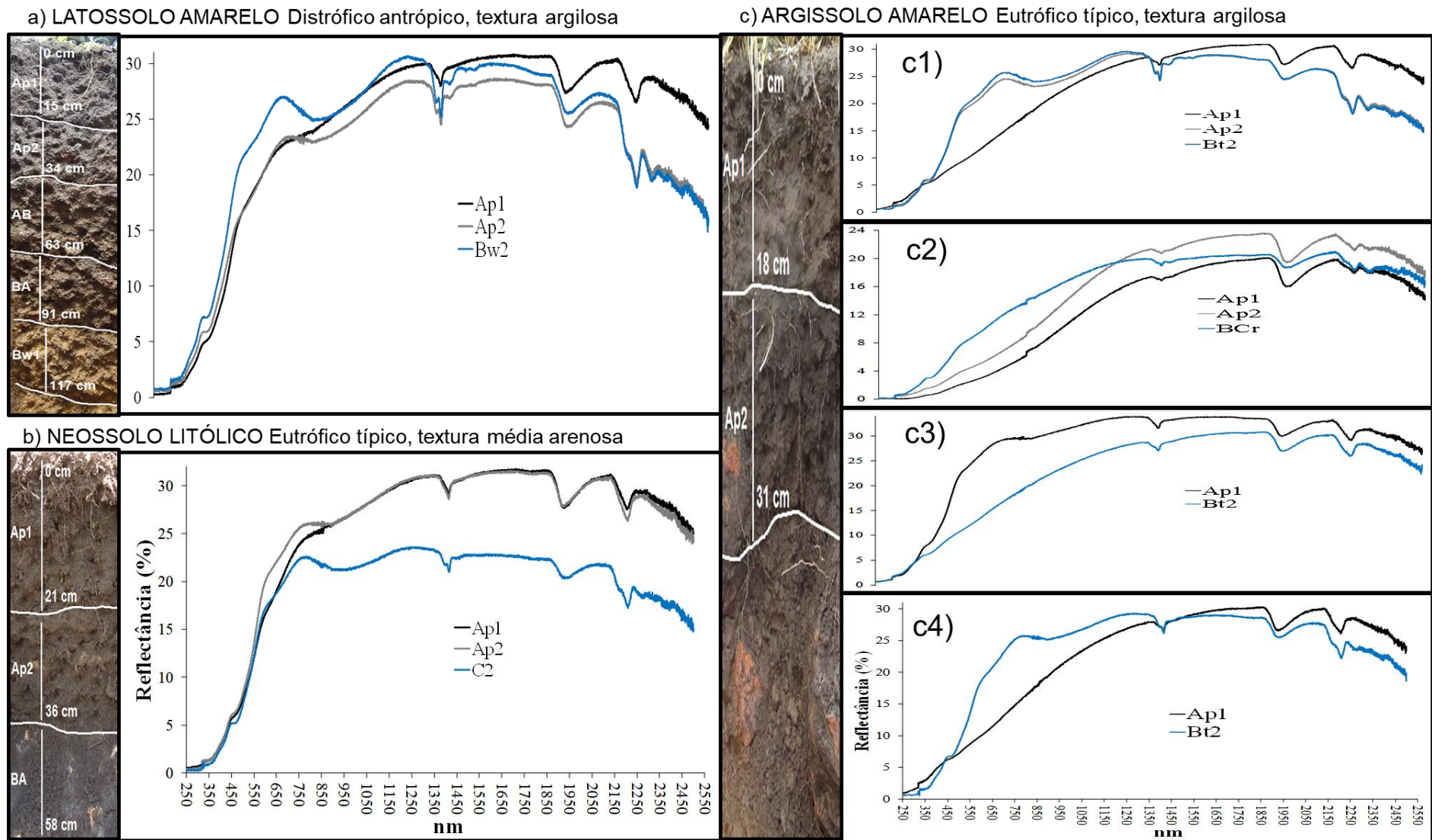
destacando-se, a cor, a classe de solos, composição mineralógica, teor de umidade e granulometria (EIPHANIO et al., 1992, DEMATTÊ et al., 2015).

Os maiores valores de reflectância na faixa da Gt (420 a 450 nm) foram encontrados em todos os horizontes antropogênicos da TPI com exceção do P3 que apresentou valores baixos de reflectância. Menores valores de reflectância indicam maiores valores de absorvância que expressa indiretamente a quantidade de determinado constituinte do solo. Nesta faixa espectral é a Gt, onde os valores de reflectância são inversamente proporcionais aos teores dos minerais no solo. Já os maiores valores de reflectância na faixa da Hm (530 a 570 nm) apresentam variação, onde o P3 contém baixa reflectância, e os demais apresentam aumento gradativo nesta sequência P2, P6, P1, P5 e P4 (Figura 4).

Os maiores valores de reflectância na faixa da Gt (420 a 450 nm) foram encontrados em todos os horizontes antropogênicos da TPI com exceção do horizonte antropogênico do P3 que apresentou valores baixos de reflectância (Figura 4).

Em relação a faixa da Ct e Gb (1400 a 2200 nm) os espectros indicam presença mais nítida da Ct (1400 a 1900 nm) evidenciados pela concavidade mais nítida em todos os horizontes antropogênico da TPI, com exceção do P3 que indicou presença mais discreta em relação aos demais. Já a Gb (1900 a 2200 nm) indica um comportamento mais discreto, confirmando as informações apresentadas no difratograma (Figura 4, 3). Segundo Pedrotti et al. (2003) os solos com maior grau de desenvolvimento (Latosolos) apresentam enriquecimento relativo de Gb em relação aos menos evoluídos. As feições espectrais de pequena absorção na faixa dos 2.265 nm podem ser atribuídas à Gb presente nos solos (MADEIRA NETTO, 1996). A Gb atua na forma de expressão de feição, não tendo influência na intensidade da reflectância espectral (BEN-DOR, 2011).

A matéria orgânica é um constituinte primário da coloração, apresentando, portanto, uma estreita relação com a reflectância do solo e é uma das principais características dos solos de TPI (figura 2e). Pode-se inferir que os espectros do horizonte antropogênico da TPI foram influenciados pelos teores de MO presentes, onde o P3 foi o que apresentou reflectância mais baixa entre os seis horizontes antropogênico da TPI (Figura 4), contendo o segundo maior teor de MO. Conforme afirmando por Demattê et al. (2015) os teores de MO podem influenciar os



**Figura 5.** Curvas espectrais dos seis perfis do horizonte antrópico (Ap1) e do segundo horizonte diagnóstico dos seis perfis com Terra Preta de Índio no município de Apuí no sul do Amazonas.

espectros, mascarando algumas de suas feições. Devido à opacidade de minerais como a magnetita e ilmenita, abundantes em solos derivados de rochas eruptivas básicas, há alteração em todo o espectro óptico, reduzindo sua reflectância (HUNT et al., 1971). Estas absorções responsáveis pela opacidade são atribuídas à transferência de carga entre os íons de ferro e oxigênio (SELLITTO et al., 2009).

Na figura 5 foi apresentado as curvas espectrais dos horizontes antropogênicos e do segundo horizonte diagnóstico com o intuito de ter um horizonte mais puro pedogeneticamente, considerando que podem ocorrer influência dos horizontes antropogênicos nos horizontes diagnósticos (CAMPOS et al., 2012; SANTOS et al., 2013) nos solos com presença de TPI.

Observando as curvas espectrais dos seis horizontes antropogênico da TPI é possível afirmar que as formas e feições de cada tipo de solo são diferentes, porém quando analisados as variações entre horizonte em cada perfil e de forma mais detalhada ainda, observando os espectros dos horizontes antropogênicos em relação ao diagnóstico é possível notar que ocorre distinção em suas feições principalmente do primeiro horizonte antropogênico em relação ao diagnóstico.

As curvas espectrais e suas feições apresentam variações no mesmo tipo de solo, evidenciando a influência antrópica como por exemplo a presença variável de MO que ocorre com o aumento em profundidade de cada perfil e entre os perfis de TPI (AQUINO et al., 2016) (Figura 5c). Demattê e Garcia (1999), apontam a relação entre o processo de formação dos solos, sua mineralogia e as curvas espectrais. No tocante, Demattê et al. (2015) afirma que no geral os solos com maior grau de intemperismo apresentam intensidade de reflectância mais baixas e feições de absorção menos pronunciadas, ou seja, cada solo classificado individualmente, deve possuir características espectrais próprias. Souza Jr et al. (2008) verificou que os atributos areia grossa, argila, matéria orgânica e cor mostraram boa relação com a variação da reflectância dos solos, onde o aumento no teor de matéria orgânica, argila e óxidos de Fe do solo resulta na diminuição da intensidade de reflectância do solo. Em contrapartida, o incremento do teor de areia aumenta a reflectância e o comportamento espectral dos solos em profundidade mostrou-se relacionado

principalmente com o teor de matéria orgânica das camadas e com as variações nos teores de argila e areia ao longo do perfil.

## 2.4 CONCLUSÕES

A goethita e caulinita foram os minerais que apresentaram dominância nos ambientes de Terra Preta de Índio, evidenciados pelas faixas espectrais e corroborado pelos difratogramas, reforçando a eficiência da assinatura espectral para a caracterização de Terra Preta de Índio.

A assinatura espectral foi eficiente para diferenciar as classes de solos, apresentando sensibilidade principalmente aos teores de matéria orgânica presentes em abundância nas Terras Preta de Índio.

## 2.5. REFERÊNCIAS

AQUINO, R. E.; MARQUES JR, J.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; BAHIA, A. S. R.; SANTOS, L. A. C. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in archaeological dark earth in Apuí county, southern Amazonas. **Geoderma**. Amsterdam, v. 262, p. 35-44, 2016.

BAHIA, A. S. R.; MARQUES JR, J.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; SIQUEIRA, D. S.; LA SCALA JR, N. Iron oxides as proxies for characterizing anisotropy in soil CO<sub>2</sub> emission in sugarcane areas under green harvest. **Agriculture Ecosystem Environment**, Amsterdam, v. 192, p. 152–162, 2014.

BAHIA, A. S. R.; MARQUES JR, J.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. B.; LA SCALA JR, N. Field-scale spatial correlation between contents of iron oxides and CO<sub>2</sub> emission in an Oxisol cultivated with sugarcane. **Science Agricola**, Piracicaba (USP. Impresso), v. 72, p. 157-166, 2015.

BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. **Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.), Tópicos em ciência do solo 1. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, Viçosa, pp. 139–162, 2000.

BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V.; CANELLAS, L. P.; KERN, D. C. Fracionamento químico da matéria orgânica e caracterização física de Terra Preta de Índio. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 55, p. 44-51, 2012.

BEAUVAIS, A.; TARDY, Y. Degradation and dismantling of iron crusts under climatic changes in Central Africa. **Chemical Geology**, v. 107, p. 277-280, 1993.

BEN-DOR, E. **Characterization of soil properties using reflectance spectroscopy**. In: THENKABAIL, P. S.; LYON, J. G.; HUETE, A. (Ed.) Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. Boca Raton: CRC press. p. 513-557, 2011.

BOTELHO, M. R.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; AZEVEDO, A. C.; RODRIGUES, R. B. A.; MIGUEL, P. Medida da cor em solos do Rio Grande do Sul com a carta de Munsell e por colorimetria. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 1179-1185, 2006.

BROWN, D. J.; SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G.; MAYS, M. D.; REINSCH, T. G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 132, n. 3-4, p. 273–290, 2006.

CAMARGO, A. O.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106).

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. Caracterização e Classificação de Terras Pretas Arqueológicas na região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, Campinas, v. 70, p. 18-27, 2011.

CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.853-863, 2004.

CARMO, D. A. B.; MARQUES JR, J.; SIQUEIRA, D. S.; BAHIA, A. S. R. S.; SANTOS, H. M.; POLLO, G. Z. Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1261-1271, 2016.

CERNANSKY, R. State of the art soil. **Nature**, London, v. 517, p. 258-260, 2015.

CEZAR, E.; NANNI, M. R.; CHICATI, M. L.; SOUZA JR, I. G.; COSTA, A. C. S. Avaliação e quantificação das frações silte, areia e argila por meio de suas reflectâncias. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1.157-1.165, 2012.

CORNU, S.; LUCAS, Y.; AMBROSI, J. P.; DESJARDINS, T. Transfer of dissolved Al, Fe and Si in two Amazonian forest environments in Brazil. **European Journal Soil Science**, Oxford, v. 49, p. 377-384, 1998.

COSTA, M. L. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**, Porto Alegre, v. 21, p. 146-160. 1991.

CPRM - **Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens**. Manaus, 2001. 93p. (Relatório Técnico).

CURI, N. FRANZMEIER, D. P. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Science Societ of American Journal**, Madison, v. 48, p. 341-346, 1984.



DANTAS, J. S.; MARTINS FILHO, M. V.; MARQUES JR, J.; RESENDE, J. M. A.; TEIXEIRA, D. B.; BARBOSA, R. S.; SIQUEIRA, D. S. Coeficiente de erodibilidade em sulcos e entressulcos de Argissolos coesos estimado pela cor do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v.49, p.700-707, 2014a.

DANTAS, J. S.; MARQUES JR, J. MARTINS FILHO, M. V.; RESENDE, J. M. A.; CAMARGO, L. A.; BARBOSA, R. S. Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.38, p.1039-1050, 2014b.

DEMATTÊ, J. A. M.; ARAÚJO, S. R.; FIORIO, P. R.; FONGARO, C. T.; RAFAEL, M. Espectroscopia VIS-NIR-SWIR na avaliação de solos ao longo de uma topossequência em Piracicaba (SP). **Ciência Agrônômica**, Ceará, v. 46, n. 4, p. 679-688, out-dez, 2015.

DEMATTÊ, J. A. M., BORTOLETTO, M. A. M.; VASQUES, G, M.; RIZZO, R. Quantificação de matéria orgânica do solo através de modelos matemáticos utilizando colorimetria no sistema Munsell de cores. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p. 590-597, 2011.

DEMATTÊ, J. A. M.; GARCIA, G. J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. **Soil Science Societ of American Journal**, Madison, v. 63, n. 2, p. 327-342, 1999.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1992. p. 131.

FALCÃO, N. P. S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (Carica papaya L.). **Acta Amazônica**, Manaus, v. 36, p. 401-406, 2006.

FERRARESI, T. M.; SILVA, W, T. L.; MATIN-NETO, L.; SILVEIRA, P. M.; MADARI, B. E. Espectroscopia de infravermelho na determinação da textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n. 6, p.1769-1777, 2012.

HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W.; LENHOFF, C. J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides. **Modern Geology**, v. 2, p. 195-205, 1971.

KAMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic Soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.29, p. 27-39,1983.

KÖPPEN, W. **Climatologia: com um estúdio de los climas de la tierra. Publications**, In: Climatology. Laboratory of Climatology, New Gersey, 1948, 104p.

MADEIRA NETTO, J. S. **Spectral reflectance properties of soils**. Photo Interpretation, v. 34, p. 59-70, 1996.

MARQUES JR, J. SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, Amsterdam, v.219-220, p.63-71, 2014.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clay Minerals**, New York, v. 7, n. 2, p. 317-327, 1960.

MEIRELLES, H. T.; MARQUES JR, J.; CAMPOS, M. C. C.; PEREIRA, G. T. Relações solo-paisagem em topossequência de origem basáltica. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, p. 129-136, 2012.

MOREIRA A. Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia Ocidental. **Bragantia**, Campinas, v. 66, p. 307-315, 2006.

MOUAZEN, A. M.; BAERDEMAEKER, J.; RAMON, H. Effect of wavelength range on the measurement accuracy of some selected soil constituents using visible-near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, Chichester, v. 14, p. 189–199, 2006.

NORRISH, K.; TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. **Journal Soil Science**, Oxford, v. 12, p. 294-306, 1961.

PABST E. **Critérios de distinção entre Terra Preta e Latossolo na região de Belterra e os seus significados para discussão pedogenética**. B. Mus. Paranaense Emilio Goeldi, Série Antropol., v. 7, p. 5-19, 1961.

PEDROTTI, A.; FERREIRA, M. M.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; LIMA, J. M.; CARVALHO, R. Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 1-9, 2003.

PELUCO, R. G.; MARQUES JR, J.; SIQUEIRA, D. S.; BARBOSA, R. S.; PEREIRA, G. T.; TEIXEIRA, D. B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Viçosa, v.50, p.259-266, 2015.

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. Á.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. **Análise química de solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fund. Cargill, 1987, 170p.

RESENDE, J. M. A.; MARQUES JR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; DANTAS, J. S.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. B. Variabilidade espacial de atributos de solos coesos do leste Maranhense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1.077-1.090, 2014.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORREA, G. F. **Pedologia: Base para distinção de ambientes**. 5. ed. rev. UFLA, Lavras-MG (322 p.il), 2007.

SANTOS, L. A. C.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. M. P.; MARQUES JR, J.; FRANCA, A. B. C. Caracterização e gênese de terras pretas arqueológicas no sul do Estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 825-836, 2013.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; ANJOS, L. H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 5. ed. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), **Minerals in soil environments**, 2.ed. SSSA, Madison, pp. 379–438 (Book Series, 1), 1989.

SDS - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Relatório técnico síntese dos diagnósticos: Área estadual sul de Apuí e Manicoré**. Manaus, 2004. 20p.

SELLITTO, V. M.; FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; COLOMBO, C. Comparing two different spectroscopic techniques for the characterization of soil iron oxides: diffuse versus bi-directional reflectance. **Geoderma**, Amsterdam, v. 149, n. 1/2, p. 2-9, 2009.

SILVA NETO, L. F.; INDA JUNIOR, A. V.; BAYER, C.; DICK, D. P.; TONIN, A. T. Óxidos de ferro em Latossolos tropical e subtropical brasileiros em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1873-1881, 2008.

SILVA, A. K. T.; GUIMARÃES, J. T. F.; LEMOS, V. P.; COSTA, M. L.; KERN, D. C. Mineralogia e geoquímica de perfis de solo com Terra Preta Arqueológica de Bom Jesus do Tocantins, sudeste da Amazônia. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 42, p. 477-490, 2012.

SILVA, D. M. P.; CAMPOS, M. C. C.; FRANCISCON, U; ALHO, L. C.; SANTOS, L. A. C.; PAULA NETO, P.; BERGAMIN, A. C.; SOUZA, Z. M. Spatial variability of soil properties in Archeological Dark Earth Sites under Cacao Cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. 816-828, 2016.

SOUZA JR, J. G. A.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENÚ, A. M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, viçosa, v. 32, p. 727-738, 2008.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; BEHRENS, T. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. **Geoderma**, Amsterdam, v. 158, p. 46-54, 2010.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; MCBRATNEY, A. B.; JANIK, L. J.; SKJEMSTAD, J. O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 131, n. 1-2, p. 59–75, 2006.

YOEMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Commun Soil Sci Plant**. New York, v.19, p.1467-1476, 1988.

### **CAPÍTULO 3 – Assinatura espectral na identificação do potencial de efluxo de CO<sub>2</sub> e estoque de Carbono em Terra Preta de Índio**

**RESUMO** – A cor escura das Terra Pretas de Índio (TPIs) é uma característica morfológica peculiar desses solos na Amazônia, indicativo dos teores elevados de matéria orgânica estável, com sua origem cronologicamente associada as suas atividades antrópicas. A riqueza da matéria orgânica nos solos de TPIs funcionam como dreno natural responsável pela mitigação do efluxo de CO<sub>2</sub> (fCO<sub>2</sub>) do solo para a atmosfera no agrossistema tropical. Por essas razões, o objetivo deste estudo foi identificar através da assinatura espectral o potencial de fCO<sub>2</sub> e do estoque de C em TPIs na região sul do estado do Amazonas. O estudo foi desenvolvido em um Argissolo Amarelo eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico. Na amostragem do solo foi estabelecida uma malha com espaçamento regular de 10 metros, perfazendo um total de 64 pontos na profundidade de 0,0 a 0,10 m, com dimensões de 70 x 70 m. No campo registrou-se o efluxo de CO<sub>2</sub> do solo com um sistema automatizado portátil de fluxo de CO<sub>2</sub> do solo. No laboratório, a cor foi caracterizada usando a assinatura espectral. Em seguida foram determinados os valores de triestímulo XYZ, para dedução das componentes da cor de Munsell (matiz, valor e croma), e RGB (R: red; G: green; B: blue). Os valores de matiz, valor e croma foram utilizados no cálculo do índice de avermelhamento (IAV). Por sua vez, foi realizada a caracterização da variabilidade espacial dos atributos da cor para compreensão do fluxo de CO<sub>2</sub>, e est. C através do uso da análise geoestatística. Construiu-se o triângulo de cor para identificar locais com diferentes potenciais de fCO<sub>2</sub> e est. C, com base no conceito do diagrama de cromaticidade elaborado a partir dos valores triestímulos (XYZ). A assinatura espectral mostrou que é uma ferramenta eficiente na identificação de áreas como a TPIs na identificação do potencial de efluxo de CO<sub>2</sub> e monitoramento do potencial do estoque de carbono no solo através do triângulo de cor.

**Palavras-chave-** Cor do solo, espectroscopia de reflectância difusa, fluxo de CO<sub>2</sub>.

### 3.1 INTRODUÇÃO

No cenário global a intensa busca por soluções para o aquecimento global através da contenção da emissão de gases que contribuem para o aumento do efeito estufa, têm sido assunto constante, assim como o papel inconstentável da floresta amazônica na manutenção dos estoques e no efluxo global de carbono (HOUGHTON et al., 2000; MALHI et al., 2008).

Neste sentido, os solos na região amazônica oferecem condições para a produção e evolução de CO<sub>2</sub> com umidade e temperaturas elevadas que favorecem a decomposição da matéria orgânica, a respiração das raízes e a respiração microbiana, aumentando o fCO<sub>2</sub> (efluxo de CO<sub>2</sub>) do solo para a atmosfera (DIAS, 2006).

Um outro componente importante é o estoque de carbono no solo, que é resultado da retirada do CO<sub>2</sub> da atmosfera, neste caso, contribuindo para a diminuição do efluxo de gases de efeito estufa (CERRI et al., 2010), e está associado ao aporte de resíduos vegetais e à ausência da mobilização excessiva do solo via seu preparo, o qual diminui a exposição do C protegido nos agregados ao ataque da comunidade microbiana, retardando o processo de decomposição (AL-KAISI; YIN, 2005).

Ocorrem na Amazônia solos com presença de horizonte antropogênico, estes compreendem cerca de 6.000 a 18.000 Km<sup>2</sup> na região Amazônica (SOMBROEK et al., 2003) e apresentam cores escuras, teores elevados de matéria orgânica, fósforo, cálcio, dentre outros e podem apresentar, em média, até 6 vezes mais carbono orgânico estável que os solos adjacentes (sem a presença de horizonte antropogênico) (GLASER, 2001), figurando como grande reservatório de carbono orgânico.

Nos estudos de Glaser (2001) foi mostrado que materiais carbonizados provenientes de combustão incompleta de materiais orgânicos, são responsáveis pela manutenção de altos níveis de matéria orgânica estável em solos antropogênicos. A razão provável da estabilidade do carbono orgânico nestes solos é a abundância de carvão (GLASER, 1999). Estes solos podem vir a ser reservatórios importantes do CO<sub>2</sub> atmosférico, participando significativamente no sequestro global de C (SCHMIDT; NOACK, 2000) e, provavelmente, na redução da liberação de gases do efeito estufa para a atmosfera, que têm motivado diversos estudos voltados para o entendimento

da  $fCO_2$  e est. C (MORAIS et al., 2015) e de sua variabilidade espacial (CAMPOS et al., 2016; SILVA et al., 2016; CUNHA et al., 2017).

Neste sentido, o uso de técnicas indiretas tem sido comprovadamente eficiente na caracterização de diversos atributos de solos nos trópicos (DANTAS et al., 2014; MARQUES JR et al., 2014; PELUCO et al., 2015; AQUINO et al., 2016; CARMO et al., 2016). Oliveira et al. (2015), avaliaram a variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos do solo em Argissolos da região de Manicoré, AM. Os autores concluíram que as áreas com TPI apresentaram maior variabilidade espacial para alguns atributos, incluindo a argila, e que a suscetibilidade magnética mostrou comportamento similar aos atributos do solo nos ambientes estudados, apresentando mesmos ajustes de semivariograma, podendo ser uma propriedade do solo utilizada como indicador para estimar/compreender os atributos do solo.

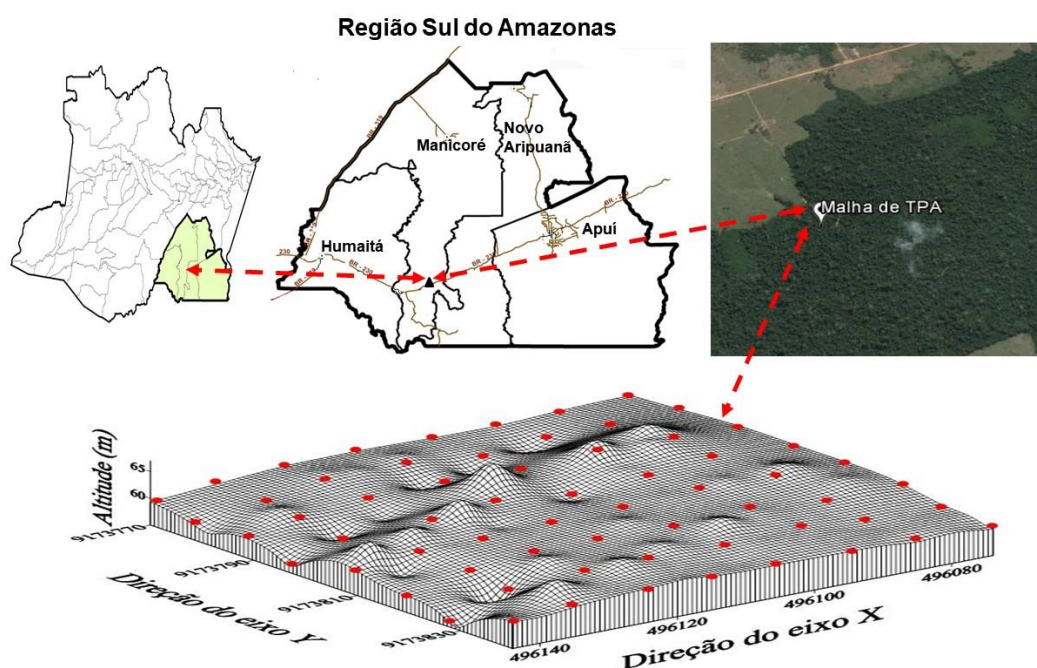
Por outro lado, a assinatura espectral é uma ferramenta que pode ser utilizada atribuindo valores numéricos e precisos para cada cor gerada, que pode ser associada aos valores dos atributos do solo obtidos em análises convencionais (TORRENT; BARRÓN 2008), sendo possível concilia-los com a análise geoestatística (VISCARRA ROSSEL; WEBSTER, 2011; CARMO et al., 2016).

Contudo, considerando que a TPI é um solo de origem antrópica e possui características muito particulares em relação aos demais ambientes adjacentes da região Amazônica, contendo grande potencial histórico, agrícola e ambiental, a hipótese deste trabalho é que dado o potencial dos ambientes de TPI em conter grandes quantidades de C no solo e a necessidade de ter meios que possam mensurá-los com maior facilidade e rapidez, a assinatura espectral adequa-se como uma ferramenta capaz de estimar/compreender estes atributos. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é identificar através da assinatura espectral o potencial de efluxo de  $CO_2$  e do estoque de C em TPI na região sul do estado do Amazonas.

## 3.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 3.2.1 Caracterização da área e plano de amostragem

O estudo foi realizado em uma propriedade rural, localizada ao sul do Estado do Amazonas, no distrito de Santo Antônio de Matupí, município de Manicoré-AM, em uma área com TPI (Figura 1). A área de TPI encontra-se situada nas coordenadas geográficas 07° 55' 02,1" S e 61° 31' 45,2" W, com altitude média de 102 m, no momento da coleta encontrava-se sob cultivo de milho, com aproximadamente 120 dias após o plantio.



**Figura 1:** Localização da malha amostral de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen (1948), é do tipo tropical chuvoso, com um período seco de pequena duração (Am), temperaturas variando entre 25 °C e 27 °C, e precipitações pluviais entre 2.250 e 2.750 mm, com chuvas concentradas no período de outubro a junho (BRASIL, 1978).

O material de origem é proveniente de saprólito de granitos Rondonianos, do Pré-Cambriano Superior, sedimentos coluviais, depositados nas partes mais baixas da paisagem e coberturas terciárias (BRASIL, 1978). A configuração do relevo é marcada pela presença de platôs que exibem superfícies topográficas planas, sendo a zona de borda marcada por colinas e cristas alinhadas e localmente escarpadas, com desníveis entre 50 e 100 m,



enquanto que as áreas de planícies têm como principais características a presença de uma superfície pediplanada, localmente interrompida por colinas de topo plano (CPRM, 2001). A vegetação característica desta região é a Floresta Tropical Densa constituída por árvores adensadas e multiestratificadas entre 20 a 50 metros de altura, com clima úmido, elevadas temperaturas e alta precipitação.

O solo nesta área foi classificado conforme Embrapa (2013) como Argissolo Amarelo eutrófico típico, textura argilosa, A antrópico (Santos et al., 2013). Na amostragem do solo foi estabelecida uma malha com espaçamento regular de 10 metros, perfazendo um total de 64 pontos na profundidade de 0,0 a 0,10 m, com dimensões de 70 x 70 m.

### 3.2.2 Análise dos atributos do solo

A densidade do solo ( $D_s$ ) foi calculada pela relação entre a massa seca a 105 °C, durante 24 h, da amostra de solo do cilindro volumétrico e o volume do mesmo cilindro (EMBRAPA, 1997).

O estoque de carbono (est. C) calculado pela expressão (Veldkamp, 1994):

$$\text{est. C} = (\text{CO} \times D_s \times e)/10 \quad (1)$$

em que:

est. C = estoque de carbono em determinada profundidade ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); COT = teor de carbono orgânico total na profundidade amostrada ( $\text{g kg}^{-1}$ );  $D_s$  = densidade do solo da profundidade ( $\text{kg dm}^{-3}$ ); e = espessura da camada considerada (no caso 10 cm). O est. C é apresentado, conforme o Sistema Internacional de unidades, megagrama por hectare ( $\text{Mg/ha}$ ), sendo Mg equivalente à tonelada.

O efluxo de  $\text{CO}_2$  ( $f\text{CO}_2$ ) do solo foi registrada com um sistema automatizado portátil de fluxo de  $\text{CO}_2$  do solo LI-COR (LI-8100). Em seu modo de medição, o sistema LI-8100 monitora as mudanças na concentração de  $\text{CO}_2$  dentro da câmara, por meio de espectroscopia, na região do infravermelho (IRGA Infrared Gas Analyzer). A câmara para solos tem um volume interno de  $854,2 \text{ cm}^3$ , com área de contato de  $83,7 \text{ cm}^2$ , e foi colocada sobre colares de PCV previamente inseridos no solo, a uma profundidade de 0,03 m. A temperatura do solo foi monitorada concomitantemente às avaliações de

respiração do solo, utilizando-se de um sensor de temperatura, que é parte integrante do sistema ao LI-8100. Tal sensor consiste em uma haste de 0,2 m, que é inserida no interior do solo, na região próxima ao local onde foram instalados os colares de PVC. A umidade do solo foi registrada, utilizando-se de um aparelho TDR (Time Domain Reflectometry) - Campbell® (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Austrália). Para o estudo da variabilidade espacial, onde as avaliações foram realizadas nos 64 pontos em cada gradeado, as medidas foram realizadas no mês de janeiro de 2010, ambas no período da manhã das 7 às 10 horas.

### **3.2.3 Determinação da assinatura espectral**

Para a obtenção da assinatura espectral, as avaliações foram feitas com o sensor de laboratório Lambda 950 UV/Vis/NIR (Perkin Elmer, United Kingdom).

Foi moído aproximadamente 0,5 g de terra fina seca ao ar até obtenção de coloração constante e colocado em um porta-amostra (16 mm). Os valores de reflectância foram determinados a cada 0,5 nm no intervalo de 380 a 780 nm.

Em seguida foram determinados os valores de triestímulo XYZ definidos pela Comisión Internacional de L'Eclairage. A partir das coordenadas XYZ foram deduzidos os valores Munsell (matiz, valor e croma), e RGB (R: red; G: green; B: blue) utilizando o programa Munsell Conversion versão 6.4, conforme Barrón et al. (2000) e Viscarra Rossel e Webster (2011).

Os valores de matiz, valor e croma, conforme método de Munsell, foram utilizados no cálculo do índice de avermelhamento (IAV), pela equação 1 (TORRENT; BARRÓN, 2008).

$$IAV = (10 - H) \times C/V \quad (2)$$

em que: V é o valor Munsell; C é o valor numérico do croma; e H é o valor numérico que corresponde ao matiz.

### **3.2.4 Análise dos dados**

Foi realizada análise exploratória dos dados, calculando-se a média, erro padrão da média (EM), desvio padrão (DP), mínimo, máximo e coeficiente de variação (CV) (MINITAB, 2000). O CV foi calculado com base no critério de

Warrick e Nielsen (1980), que classifica o CV como baixo < 12%, médio de 12% a 24% e alto > 24%.

Para a caracterização da variabilidade espacial, utilizou-se da análise geoestatística. Sob teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela equação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

Em que:  $\gamma(h)$  - valor da semivariância para uma distância  $h$ ;  $N(h)$  - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;  $Z(x_i)$  - valor do atributo  $Z$  na posição  $x_i$ ;  $Z(x_i+h)$  - valor do atributo  $Z$  separado por uma distância  $h$  da posição  $x_i$ .

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de  $\hat{\gamma}(h)$ , são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (o efeito pepita,  $C_0$ ; variância estrutural,  $C_1$ ; patamar,  $C_0 + C_1$ ; e o alcance,  $a$ ). O efeito pepita é o valor da semivariância para uma distância maior do que zero e menor do que a menor distância de amostragem, e representa o componente da variação ao acaso; o patamar é o valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante; o alcance é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando a distância além da qual as amostras não são correlacionadas (TRANGMAR et al., 1985).

Com o intuito de verificar a correlação da assinatura espectral através das medidas de cores (valor, matiz, croma, IAV, R, G, B) com a  $fCO_2$  e o est. C, foi realizado o uso do semivariograma cruzado, que evidencia a ocorrência ou não da dependência espacial entre duas variáveis amostradas nos mesmos locais e que apresentam certo grau de correlação. Se existir dependência espacial para cada uma das variáveis ( $Z_1$  e  $Z_2$ ), a existência de dependência espacial entre  $Z_1$  e  $Z_2$  pode ser testada. O cálculo do semivariograma cruzado é usado para avaliar a autocorrelação espacial entre os pares de variáveis ( $Z_1$  e  $Z_2$ ) (DEUTSCH; JOURNAL, 1998) (Equação).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)] [y(x_i) - y(x_i + h)] \quad (4)$$

em que:

$\hat{\gamma}(h)$  - valor da semivariância para o vetor  $h$ ;  $N(h)$  - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;  $Z(x_i)$  - valor do atributo  $Z$  na posição  $x_i$ ;  $y(x_i)$  o valor

da variável secundária no ponto  $i$ ;  $Z(x_i+h)$  - valor do atributo  $Z$  separado por uma distância  $h$  da posição  $x_i$ .

Para analisar o grau da dependência espacial (GDE) foram consideradas duas metodologias:

A classificação de Cambardella et al. (1994), em que são considerados como dependência espacial fraca os semivariogramas que têm um efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e forte quando for maior que 75%.

A segunda metodologia foi uma nova proposta apresentada por Seidel e Oliveira (2016) em que são considerados a dependência espacial:

Para o semivariograma esférico: GDE  $\leq 7\%$  (fraca dependência espacial); GDE entre 7 e 15% (moderada dependência espacial); GDE  $\geq 15\%$  (forte dependência espacial).

Para o semivariograma exponencial: GDE  $\leq 6\%$  (fraca dependência espacial); GDE entre 6 e 13% (moderada dependência espacial); GDE  $\geq 13\%$  (forte dependência espacial).

Para o semivariograma gaussiano: GDE  $\leq 9\%$  (fraca dependência espacial); GDE entre 9 e 20% (moderada dependência espacial); GDE  $\geq 20\%$  (forte dependência espacial).

Como os pontos de amostragem das medidas de cores (valor, matiz, croma, IAV, R, G, B), fCO<sub>2</sub> e est. C são exatamente os mesmos e na mesma densidade de amostragem, foi construído apenas o semivariograma cruzado para verificar a correlação da dependência espacial, pois não haverá ganho no uso de cokrigagem em relação à krigagem simples.

Na determinação da existência ou não da dependência espacial, utilizou-se do exame de semivariogramas, por meio do programa GS+ (ROBERTSON, 1998). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, considerou-se o melhor R<sup>2</sup> (coeficiente de determinação) e a validação cruzada.

A veracidade do modelo na interpolação foi testada através da técnica de validação cruzada, a qual se baseia em comparar valores reais com os do resultado de interpolação, o que permite avaliar se o modelo escolhido na interpolação garante previsão precisa (LEUANGTHONG et al, 2004). Para Landim (2003), a validação cruzada é um importante técnica para ponderar o

ajuste do semivariograma, porém não comprova que o modelo escolhido é o mais correto nem inteiramente correto.

No sentido de afirmativa das correlações espaciais entre os atributos, foi realizada a correlação linear de Pearson agrupando cada atributo em 05 grupos considerando o valor mínimo e máximo, determinando-se o grau de coeficiente de correlação (R). A média dos resultados referentes as medidas de cores (valor, matiz, croma, IAV, R, G, B), fCO<sub>2</sub> e est. C, para cada um dos grupos de resposta da planta, foi utilizada para construir gráficos de dispersão e representar a relação das variáveis dependentes (resposta dos atributos), em função das variáveis independentes (atributos da cor). Utilizou-se o método dos mínimos quadrados, para ajustar o modelo de regressão ao conjunto de pontos das variáveis dependentes e independentes. Para tal procedimento, foi utilizado o aplicativo computacional Excel (Office 2010).

### **3.2.5 Triângulo de cor (Diagrama ternário)**

Construiu-se o triângulo de cor para identificar locais com diferentes potenciais de fCO<sub>2</sub> e est C, com base no conceito do diagrama de cromaticidade elaborado a partir dos valores triestímulos (XYZ). A construção do triângulo foi feita em duas etapas. Na primeira etapa, os intervalos dos modelos de regressão para valor, croma, matiz, R, G e B foram subdivididos em quatro grupos, com base no intervalo do modelo de regressão da fCO<sub>2</sub> e est C.

Na segunda etapa, foi feita a integração dos triângulos para valor, croma e matiz. Cada intersecção das componentes da cor corresponde aos locais com diferentes características físicas e químicas que, por sua vez, condicionam diferentes potenciais de fCO<sub>2</sub> e est C na área estudada. Esse tipo de representação gráfica elaborada a partir da ERD pode mostrar a interação existente entre os três parâmetros da cor, no sistema Munsell, e uma quarta variável de interesse agrônômico (fCO<sub>2</sub> e est C). Assim, esta é uma alternativa rápida e viável, para a elaboração de triângulos de cor para diferentes regiões, com o objetivo de auxiliar a identificação de áreas de manejo no campo.

## **3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os componentes da cor indicaram boa precisão na representação das amostras, evidenciados pelo EM, tendo os melhores resultados o matiz, valor,

croma e IAV. O DP que têm a função de indicar quanto as amostras encontram-se espalhadas, apresentou valores baixos para o matiz, valor, croma e IAV, em contrapartida o R, G e B apresentaram valores elevados. O fCO<sub>2</sub> e est. C apresentaram EM baixos conforme os componentes da cor, porém os valores de DP encontram-se elevados, principalmente o est. C (Tabela 1), evidenciando maior distanciamento das amostras, o que pode ser confirmado pelos valores de mínimo e máximo. Carmo et al. (2016) encontrou valores similares de DP para o matiz, valor, croma e IAV ao avaliar áreas com diferentes potenciais de produtividade do café.

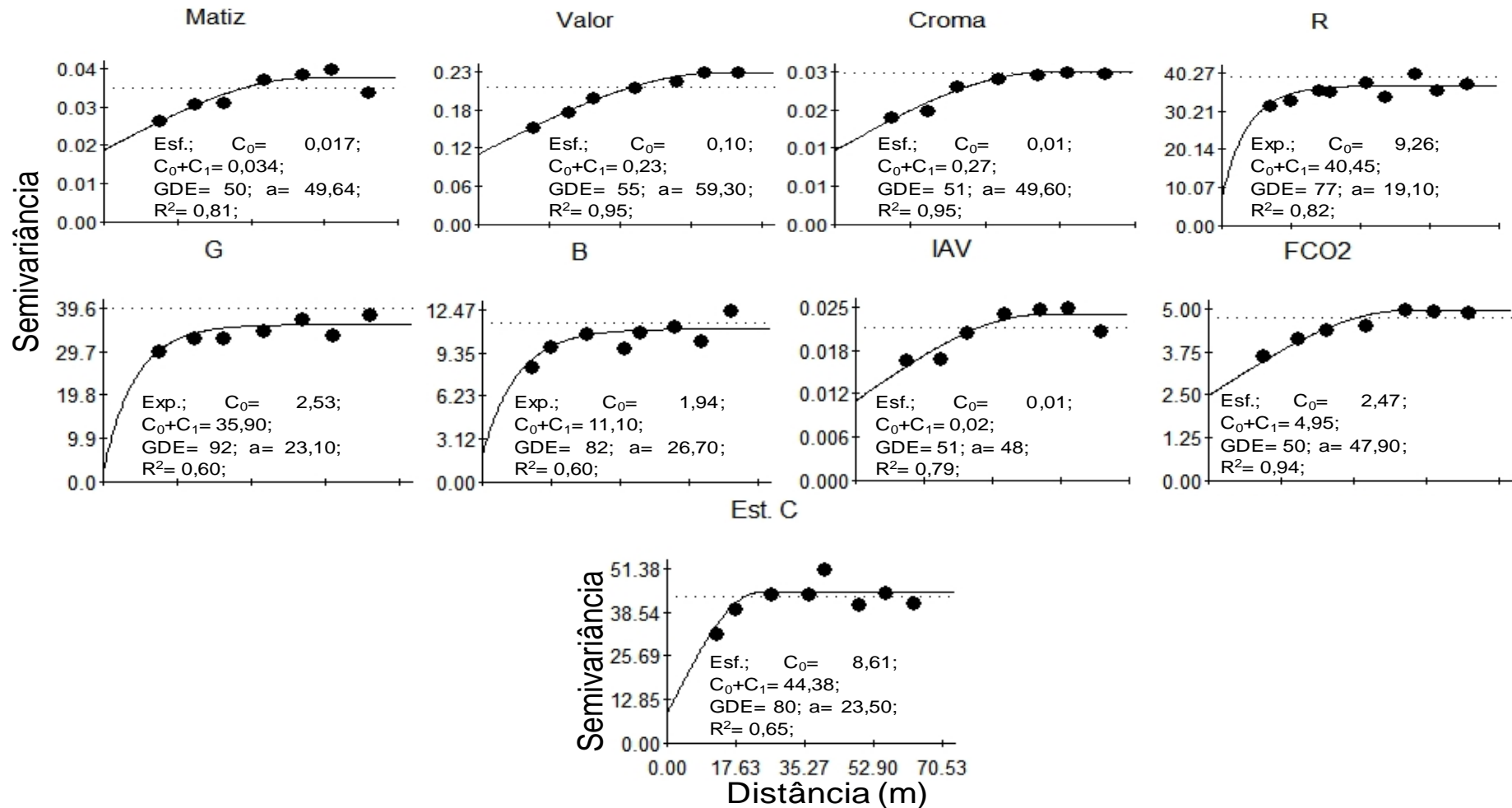
**Tabela 1.** Análise exploratória dos componentes da cor do solo, fCO<sub>2</sub> e estoque de carbono da malha de Terra Preta de Índio no sul do Amazonas.

Variável	Média	EM	DP	CV	Mín.	Max.
Matiz	9,58	0,02	0,20	2,16	8,90	9,30
Valor	3,74	0,05	0,45	12,25	2,37	5,17
Croma	2,70	0,02	0,21	7,78	2,23	3,64
IAV	0,30	0,02	0,17	58,33	0,04	1,10
R	109,38	0,81	6,46	5,91	95,00	125,00
G	89,50	0,68	5,40	6,04	78,00	102,00
B	67,52	0,53	4,21	6,24	58,00	85,00
fCO <sub>2</sub>	7,35	0,26	2,05	27,87	3,32	17,78
est. C	34,96	0,76	6,03	17,27	22,01	46,89

n= 64; IAV: índice de avermelhamento; R: red; G: green; B: blue; fCO<sub>2</sub>= efluxo de CO<sub>2</sub> no solo ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ); est. C= estoque de carbono no solo (Mg/ha); EM: erro padrão da média; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação (%); Mín.: mínimo; Max.: máximo.

O CV é um bom indicativo para conhecer a variabilidade dos dados, neste sentido, foram classificados segundo os critérios de Warrick e Nielsen (1980). Os componentes da cor matiz, croma, R, G, e B apresentou baixa variabilidade, enquanto que o valor, e o est. C apresentam variabilidade média e somente o IAV e o fCO<sub>2</sub> enquadram-se com alta variabilidade. A alta variabilidade apresentada por IAV pode ser justificado pela sua estimativa que ocorre por dados já estimados (matiz, valor e croma), aumentando assim o erro, enquanto o fCO<sub>2</sub> por ser um atributo muito variável no solo. Peluco et al. (2016) encontrou para o IAV baixo CV ao avaliar P adsorvido por meio da cor, já Bahia et al. (2014) encontrou para o fCO<sub>2</sub> alto CV ao avaliar óxidos de ferro e efluxo de CO<sub>2</sub> em Latossolo e Cunha et al. (2017) avaliando TPI em floresta na Amazônia, encontrou CV moderado para o est. C.

O CV é eficiente para comparar a variabilidade entre diferentes variáveis com unidades diferentes, porém, não permite analisar a variabilidade espacial



**Figura 2.** Variogramas simples dos componentes da cor do solo, fCO<sub>2</sub> e estoque de carbono da malha de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas. n= 64; IAV: índice de avermelhamento; R: red; G: green; B: blue; fCO<sub>2</sub>= efluxo de CO<sub>2</sub> no solo( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ); est. C= estoque de carbono no solo (Mg/ha); C<sub>0</sub> = Efeito Pepita; C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub> = Patamar; a= alcance; GDE: grau de dependência espacial  $\{[C_0/(C_0+C_1)] \times 100\}$ ; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinação; Exp = exponencial; Esp = esférico; Gau= gaussiano;

dos atributos do solo nem seu padrão espacial, justificando, portanto, o uso da geoestatística para facilitar o entendimento do padrão de ocorrência dos atributos analisados.

Os modelos que se ajustaram aos variogramas individuais isotrópicos foram o esférico (matiz, valor, croma, IAV, fCO<sub>2</sub> e est. C) e o exponencial (R, G e B) (Figura 2). O modelo esférico indica mudanças bruscas do padrão de variabilidade entre pontos mais distantes (CAMBARDELLA et al., 1994); o exponencial indica padrões de variabilidade mais irregulares em distâncias curtas (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Os modelos esféricos e exponenciais apresentam-se como os modelos teóricos mais comuns aos atributos do solo (OLIVEIRA et al., 2017). Nos trabalhos de Bahia et al. (2014) com fCO<sub>2</sub>, no de Carmo et al. (2016) utilizando o matiz, valor, croma e IAV, o modelo esférico foi o que melhor representou estes atributos.

A maioria dos modelos ajustados apresentou altos valores de coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), variando de 0,60 a 0,95, justificando, assim, os modelos ajustados aos atributos (Figura 2).

O GDE segundo Cambardella et al. (1994) foi classificado como fraco para o R, G, B e est. C, enquanto para o matiz, valor, croma, IAV e fCO<sub>2</sub> o GDE foi moderado. Segundo a nova classificação do GDE apresentada por Seidel e Oliveira (2016) todos os atributos analisados apresentaram forte dependência espacial (Figura 2). Estudando TPI na Amazônia Silva et al., (2016) encontrou para o est. C moderado GDE, o mesmo encontrado nos estudos de Silva et al. (2013) ao verificar a delimitação de classes de solos para o IAV.

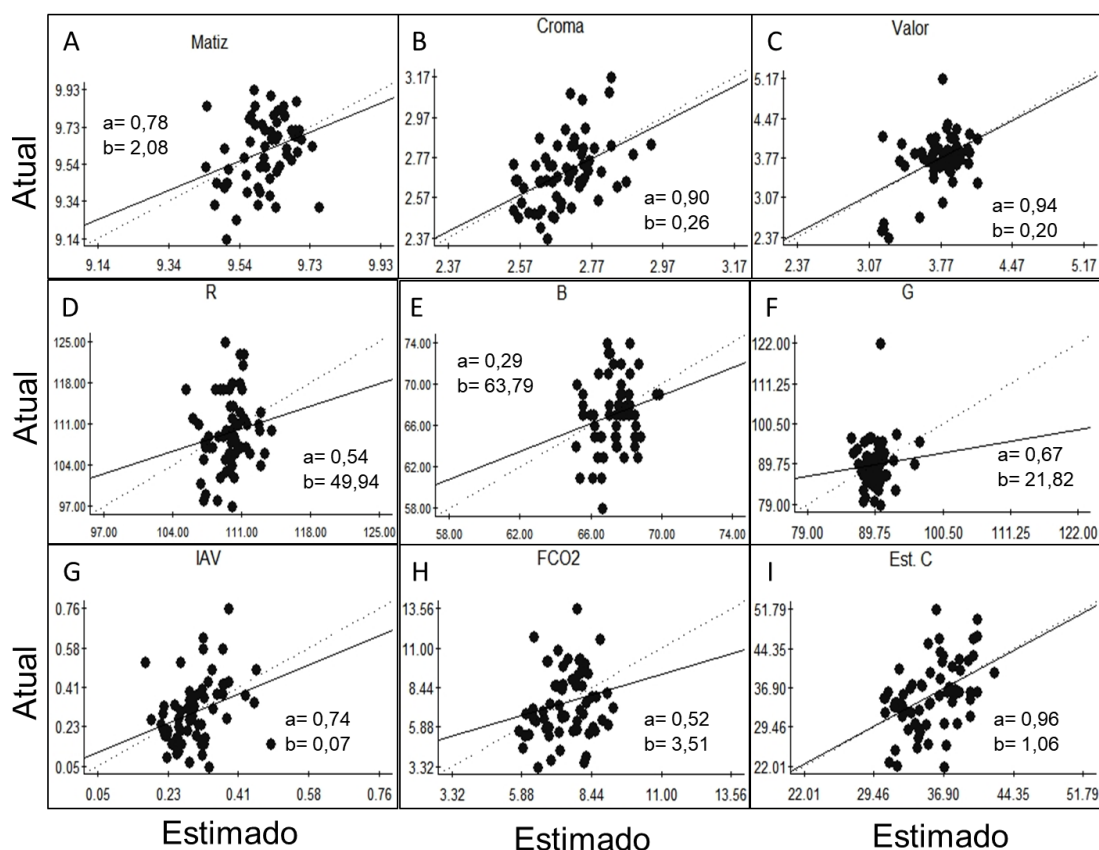
Conforme explicado por Cambardella et al. (1994) as variáveis que apresentam forte dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, ou seja, pelos fatores de formação do solo, enquanto a dependência espacial moderada deve-se à homogeneização do solo, ao passo que aos extrínsecos atribui-se fraca dependência.

O alcance pode fornecer importantes informações a respeito da heterogeneidade da distribuição espacial em relação aos atributos estudados. Nesse sentido, verificou-se dois padrões de alcance que se assemelhou aos padrões já descritos pelo GDE. Os valores entre 47,90–59,30 m se enquadraram



o matiz, valor, croma, IAV e  $f\text{CO}_2$ , enquanto que os valores de alcance entre 19,10–23,10 se enquadraram o R, G, B e est. C.

Estes valores observados de alcance indicam que a continuidade espacial para o matiz, valor, croma, IAV e  $f\text{CO}_2$  é duas vezes maior em relação as demais variáveis (Figura 2). Valores de alcance entre 21 e 49 metros em campo natural e floresta, respectivamente foram observados por Alho et al. (2014) para o atributo est. C., enquanto Campos et al. (2016) observou alcance variando de 33,90 a 40,0 metros para TPI sobre cultivo de cacau e café para o atributo  $f\text{CO}_2$ , respectivamente, ambos na região sul do Amazonas.



**Figura 3.** Gráficos de validação cruzada dos componentes da cor do solo,  $f\text{CO}_2$  e estoque de carbono da malha de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas.  $a$ = coeficiente de regressão;  $b$ = intercepto em Y; IAV: índice de avermelhamento; R: red; G: green; B: blue;  $f\text{CO}_2$ = efluxo de  $\text{CO}_2$  no solo ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ); est. C= estoque de carbono no solo (Mg/ha);

Utilizou-se da validação cruzada para analisar a estimativa da krigagem. Observa-se que, quanto mais afastado estiver o modelo teórico (reta) da linha pontilhada, maiores serão os desvios entre as observações reais amostradas em campo e as estimadas pela krigagem. Sendo que, quando a reta estiver acima da linha pontilhada ela estará superestimando e quando abaixo, subestimando os valores das observações, com o valor do intercepto da reta

passando a ser negativo. Neste sentido, foi observado que o matiz, valor, croma, IAV e  $fCO_2$  apresentaram os melhores valores de CR (0,74-0,96), enquanto que o R, G, B e est. C variou entre 0,29-0,67 (Figura 3), indicando a proporção de simetria entre a reta de  $45^\circ$ , pontilhada no gráfico, e a obtida pelos valores estimados versus reais dos atributos da cor, est. C e  $fCO_2$  e quanto mais próximo o valor for de 1 melhor é a estimativa.

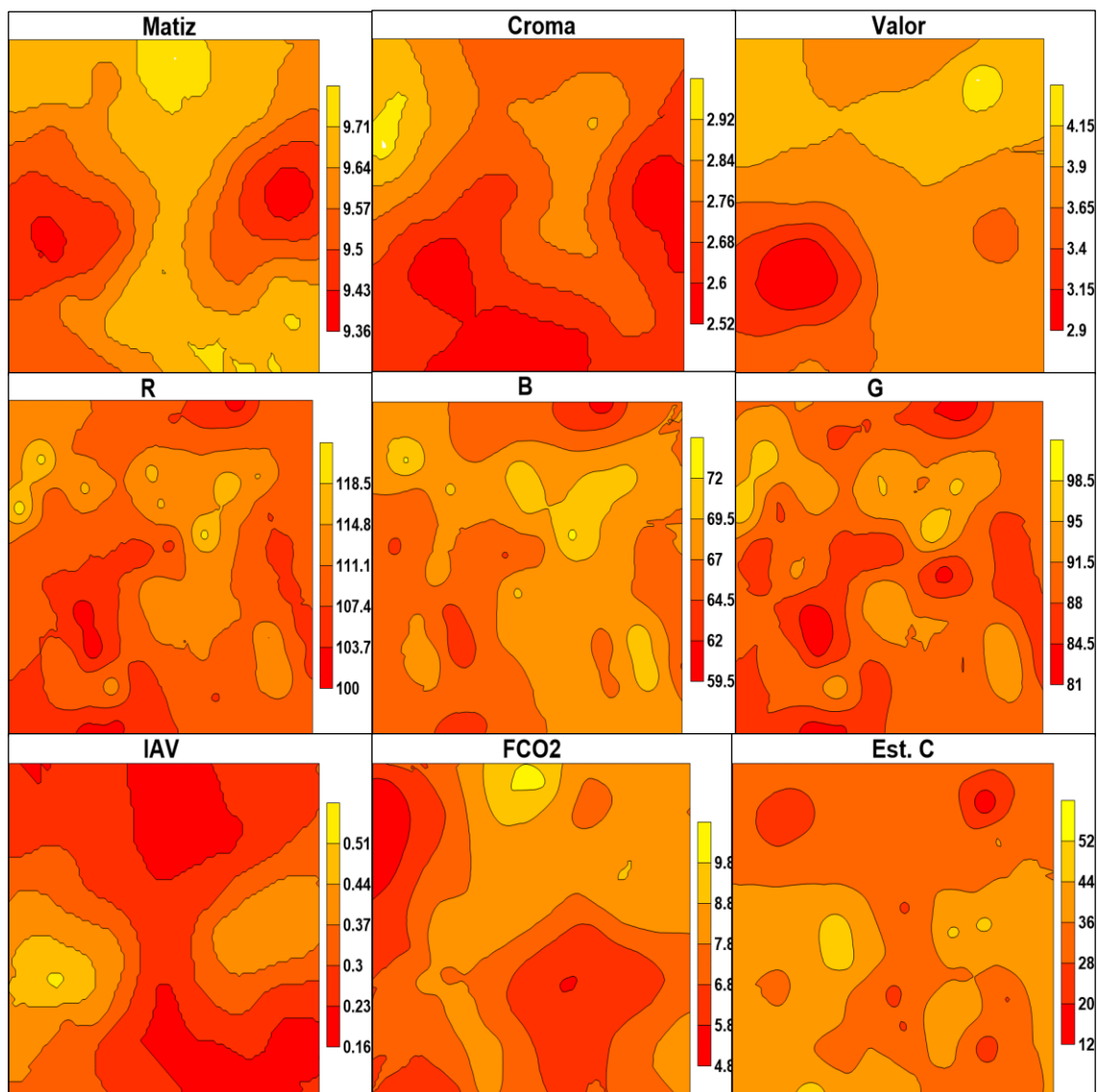
Já o Y indicou que o menor erro ocorre no valor (0,20), croma (0,26) e  $fCO_2$  (1,06), os demais tiveram erros elevados. Para o Y quanto mais o valor se aproxima de 0, menor é o erro (Figura 3). Para Bottega et al. (2013), baixo coeficiente de regressão é decorrente da dispersão da nuvem de pontos em torno da reta ideal, que possui coeficiente angular de valor 1 e corta a origem do eixo y (intercepto) no valor zero.

Com o objetivo de verificar a distribuição espacial dos atributos analisados e também a correlação das medidas de cores com o  $fCO_2$  e est. C, foram construídos mapas de krigagem. Verifica-se que o matiz, valor e croma apresentam maior similaridade as isolinhas do  $fCO_2$ , onde concentram-se os maiores valores de  $fCO_2$ , concentram-se também os maiores valores de matiz, valor e croma que também apresentam maior continuidade espacial juntamente com o IAV (Figura 4).

As medidas de cores de R e G apresentam-se mescladas e não apresentam nenhuma similaridade próxima ao comportamento espacial do  $fCO_2$  e est. C. Já o B e o IAV apresentam maior similaridade ao est. C, principalmente o IAV onde seus menores valores se relacionam aos maiores valores de est. C (Figura 4). Carmo et al. (2016) observou relação do matiz, valor e croma com a espessura do horizonte A+E, e Peluco et al. (2015) verificou que as isolinhas do IAV foram semelhantes aos mapas de argila e P adsorvido, concluindo que o IAV pode auxiliar no mapeamento e na identificação de áreas com maior potencial de adsorção de P.

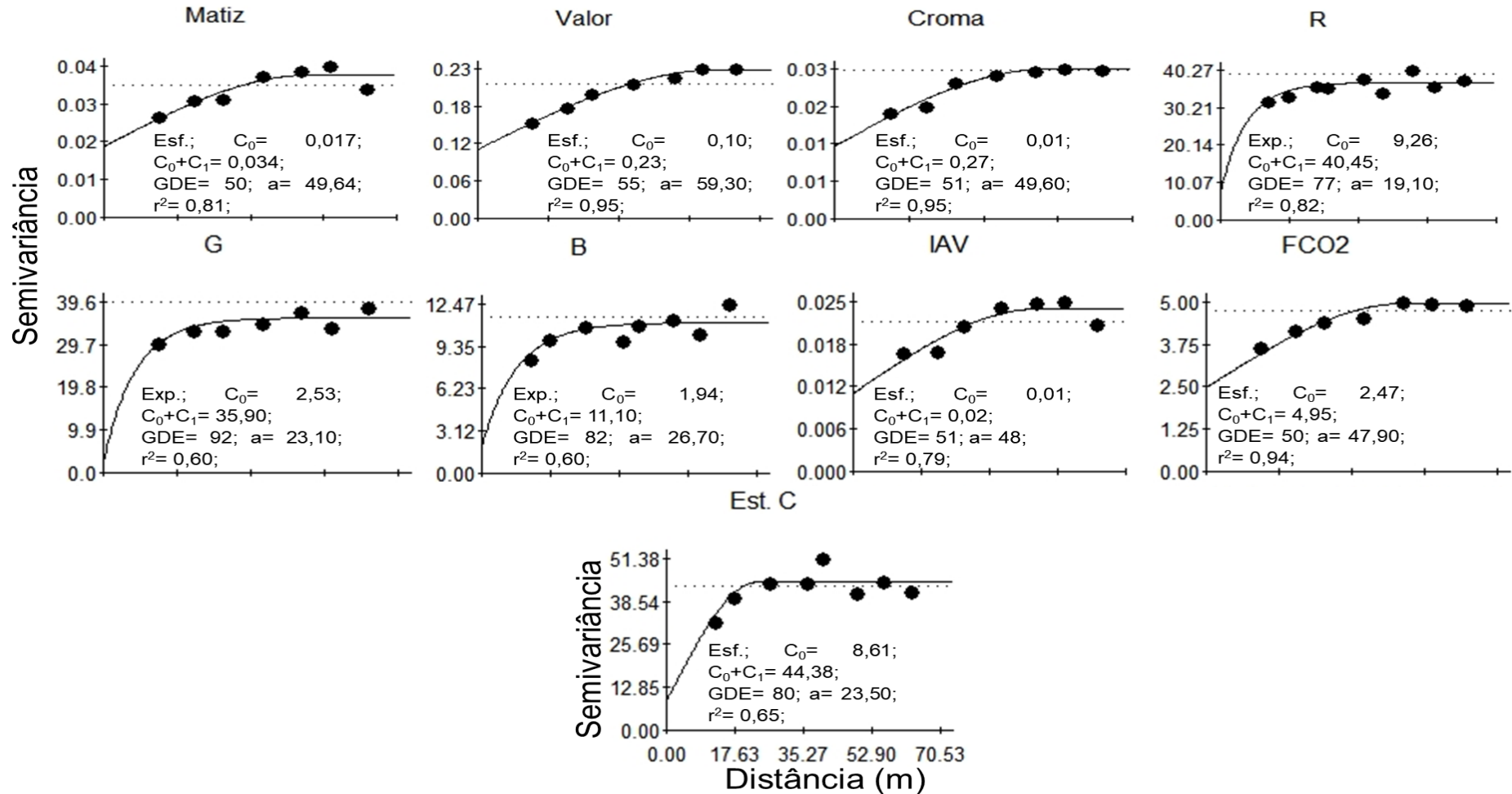
As medidas de cores foram correlacionadas espacialmente com o  $fCO_2$  e est. C através do semivariograma cruzado que apresentou correlação negativa em todos os semivariograma cruzados, sendo exceção apenas o IAV x est. C que apresentou correlação positiva (Figura 5), isto implica dizer que a relação entre estes atributos é diretamente proporcional, ou seja, com o aumento do est. C o IAV também se eleva. A forma obtida para o gráfico do

semivariograma cruzado experimental tem significado diferente do obtido pelo semivariograma simples. Nele, o alcance representa a distância máxima da dependência espacial entre as duas variáveis em estudo, e o patamar, se existir, deve aproximar-se do valor da covariância entre duas variáveis (SILVA et al., 2003).

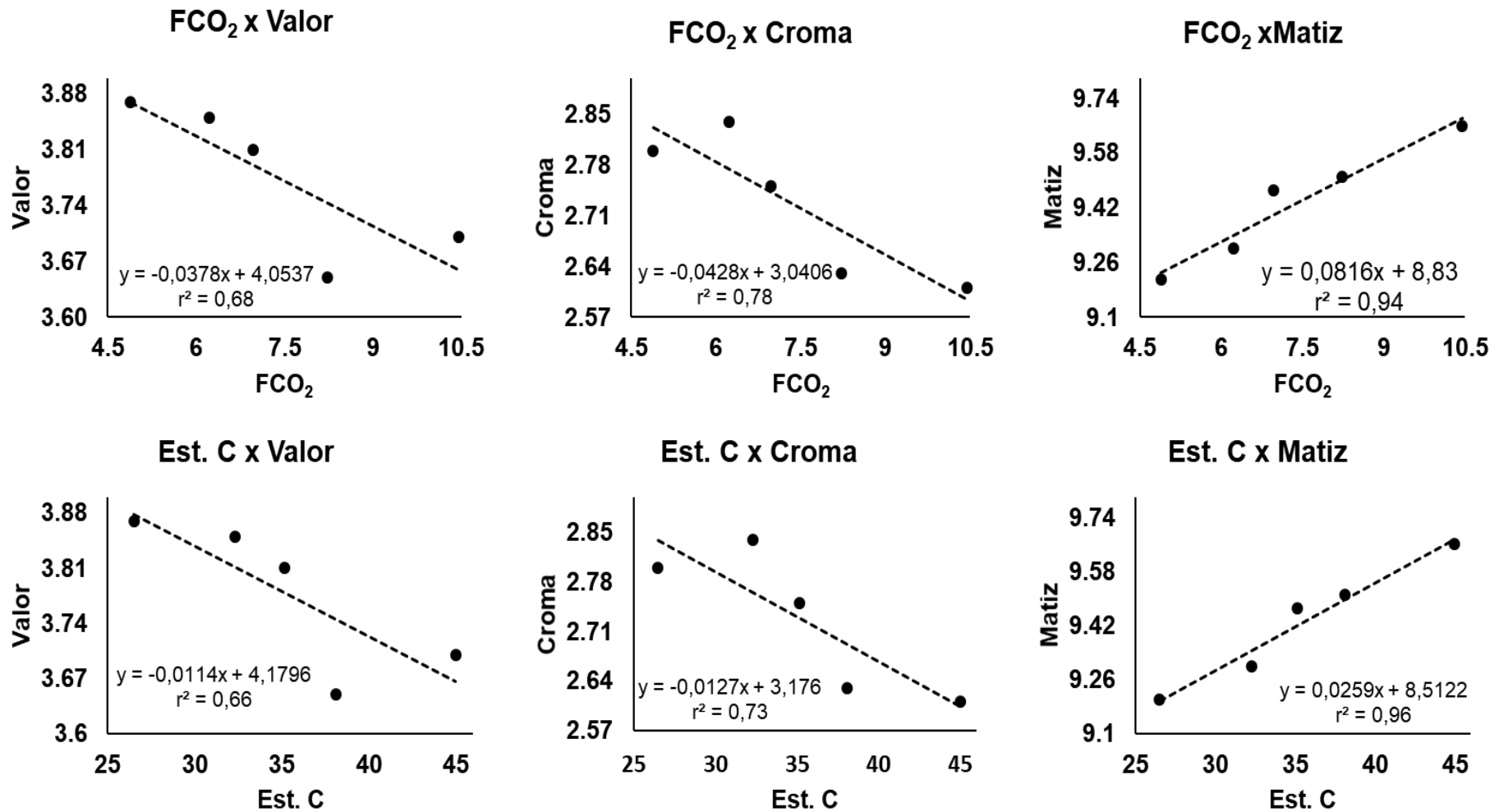


**Figura 4.** Mapas de krigagem dos componentes da cor do solo, fCO<sub>2</sub> e estoque de carbono da malha de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas. IAV: índice de avermelhamento; R: red; G: green; B: blue; fCO<sub>2</sub>= efluxo de CO<sub>2</sub> no solo ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ); est. C= estoque de carbono no solo (Mg/ha);

O fCO<sub>2</sub> correlacionado espacialmente com os atributos de cor, ajustou-se ao modelo esférico (matiz, cromas, IAV, R, B) e gaussiano (valor e G), enquanto que a correlação espacial do est. C ajustou-se aos modelos esférico (matiz, IAV, R e B), gaussiano (valor e cromas) e exponencial (G).



**Figura 5.** Variogramas cruzados dos componentes da cor do solo, fCO<sub>2</sub> e estoque de carbono da malha de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas.  $n=64$ ; IA V: índice de avermelhamento; R: red; G: green; B: blue; fCO<sub>2</sub>= efluxo de CO<sub>2</sub> no solo ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ); est. C= estoque de carbono no solo (Mg/ha);  $C_0$  = Efeito Pepita;  $C_0+C_1$  = Patamar;  $a$ = alcance; GDE: grau de dependência espacial  $\{[C_0/(C_0+C_1)] \times 100\}$ ;  $R^2$  = Coeficiente de determinação; Exp = exponencial; Esf = esférico; Gau= gaussiano;



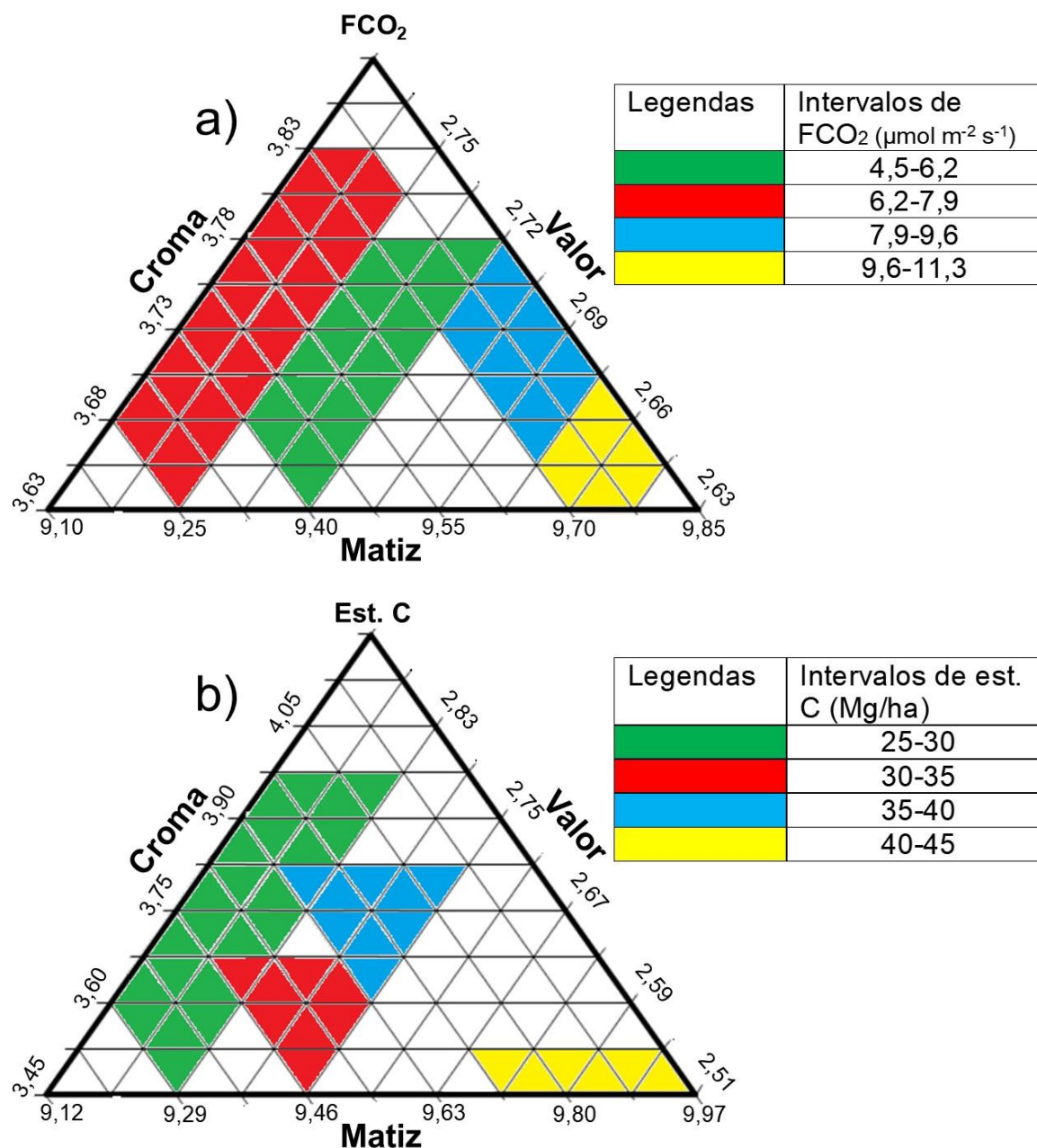
**Figura 6.** Gráfico de correlação dos componentes da cor (valor, cromagem, matiz) com a fCO<sub>2</sub> e Est C da malha de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas. IAV: índice de avermelhamento; R: red; G: green; B: blue; fCO<sub>2</sub>= efluxo de CO<sub>2</sub> no solo (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>); est. C= estoque de carbono no solo (Mg/ha);

A relação negativa espacial entre os componentes da cor com o  $f\text{CO}_2$  e est. C podem estar associada a características presentes nestes solos como elevada porosidade e densidade do solo que são dependentes dos teores de argila e areia, conforme afirmado por Leal et al. (2015) promovem aumento na capacidade de difusão de gás em todo o solo e, conseqüentemente, aumenta a  $f\text{CO}_2$ . La Scala et al. (2000) verificaram modelos de efluxos similares aqueles ajustados para o teor de carbono orgânico e capacidade de troca catiônica do solo em Latossolo desprovido de vegetação, demonstrando a influência do teor de carbono do solo na  $f\text{CO}_2$ .

Na figura 6, são apresentados os gráficos de correlação dos componentes da cor (valor, croma, matiz) com a  $f\text{CO}_2$  e est. C nos solos de TPI. Verificou-se que todas as correlações apresentam ajustamento do modelo ( $R^2$ ) acima de 0,6, indicando que mais de 60% pode ser explicado confiavelmente por esse modelo. Entre os parâmetros avaliados, apenas o matiz apresentou correlação positiva e forte correlação ( $R^2 > 90$ ) com  $f\text{CO}_2$  e est. C. Provavelmente esse resultado seja decorrente da cor escura das TPIs proporcionada pela matéria orgânica e, essa, por sua vez, responsável pela agregação do solo, conseqüentemente, aumento do espaço poroso (D'ANDRÉA et al., 2011), o que repercute no maior  $f\text{CO}_2$ .

Com o auxílio do gráfico de correlação dos componentes da cor (Figura 6), foi construindo o triângulo de cor (triângulo ternário) para identificar os parâmetros que mais contribuem no potencial de  $f\text{CO}_2$  e est. C, com base no conceito do diagrama de cromaticidade elaborado a partir dos valores triestímulos (XYZ). As medidas de cor que melhor relacionaram com os atributos  $f\text{CO}_2$  e est. C, foram o matiz, valor e o croma.

A representação gráfica com as três componentes da cor possibilitou enquadrar o  $f\text{CO}_2$  em quatro classes (Figura 7a). Observou-se que os ambientes com menor  $f\text{CO}_2$  ( $4,5 - 6,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) estão relacionados a combinação do valor 2,75, matiz 9,40 e croma 3,78. Podendo, portanto, ser classificada com muito baixo potencial de efluxo de  $\text{CO}_2$ . A combinação de matiz 9,25, valor de 2,75 e croma 3,83, pode considerar de baixo potencial, no  $f\text{CO}_2$  ( $6,2 - 7,9$ ). Ambiente com potencial intermediário quando os valores de matiz de 9,55, valor de 2,2,67 e croma de 3,78 resultam em  $f\text{CO}_2$  variando de 7,9 a 9,6. Por sua vez, valores de  $f\text{CO}_2$  ( $9,6 - 11,3$ ) foram considerados altos, no presente estudo, quando relacionados ao matiz 9,70, valor de 2,64 e croma 3,70.



**Figura 7.** Triângulo ternário da  $fCO_2$  e Estoque de Carbono, estimados pelos componentes da cor (matiz, valor, croma) da malha de Terra Preta de Índio na região sul do Amazonas.  $fCO_2$ = efluxo de  $CO_2$  no solo ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ); est. C= estoque de carbono no solo (Mg/ha);

Como a  $fCO_2$  é função dependente, entre outras condições do solo, da quantidade de  $CO_2$  no solo, foi construído o triângulo de cor também para entre os parâmetros da cor com o est. C (Figura 7b). De modo que melhor explique o comportamento do  $fCO_2$ .

O triângulo de cor do est. C revelou que o croma de 3,95, o matiz de 9,29 e valor de 2,83 estão relacionados a classe de menor valor (25 a 30 Mg/há). A classe de 30 a 35 Mg/há estão relacionados ao croma (3,60), matiz (9,46) e valor (2,75). A

terceira classe (35 a 40 Mg/há) está relacionado ao croma 3,83, o matiz 9,63, e o valor de 2,75. A classe com os valores mais elevados (40 a 45 Mg/há) o croma apresentou valores de 3,53, o matiz 9,73 e o valor 2,51. Todos estes valores aproximados (Figura 7b).

De certa forma, era esperado que no ambiente de TPI, em virtude da preservação da matéria orgânica no interior dos agregados, menor fracionamento dos resíduos e menor área de contato dos resíduos com o solo, condicionasse a redução da taxa de mineralização da matéria orgânica no solo, o que proporcionaria maior est. C. Esse comportamento também é verídico, entretanto, a aparente contradição, pode ser atribuída a imensa diversidade biológica (LA SCALA JR. et al., 2006; COSTA et al., 2008) que é comum nos ambientes com presença de horizonte antropogênico da TPI. Sendo assim, grande parte do carbono estocado é emitido na forma de CO<sub>2</sub>, numa escala bem maior se comparado aos solos de outras origens. Essa característica peculiar das TPIs explicam o comportamento para fCO<sub>2</sub> e est. C, conforme constato.

Embora a dinâmica do CO<sub>2</sub> no solo seja um fenômeno de natureza complexa, não sendo possível identificar um único atributo do solo ou do ambiente que, isoladamente, explique sua variação no espaço. Os resultados da estimativa da cor obtidos por assinatura espectral mostram-se indicador seguro do comportamento de est. C e fCO<sub>2</sub> nas TPIs. Esta interpretação é apoiada pela observação dos mapas de variabilidade espacial do CO<sub>2</sub> e atributos covariativos (matiz, croma, valor, IAV, RGB). O uso da cor, via métodos indiretos, torna possível zonear áreas com baixo e alto potencial de fCO<sub>2</sub>, e assim, orientar o manejo agrícola adequado das TPIs de maneira sustentável, dada sua contribuição no equilíbrio climático do ecossistema.

### **3.4. CONCLUSÕES**

1. A assinatura espectral mostrou que é uma ferramenta eficiente na identificação de áreas como a Terra Preta de Índio na identificação do potencial de efluxo de CO<sub>2</sub> e monitoramento do potencial do estoque de carbono no solo através do triângulo de cor.

2. Os atributos da cor matiz, valor e croma se mostraram eficientes na identificação e caracterização de áreas com Terra Preta de Índio, apresentando menor variabilidade espacial e melhor correlação com o efluxo de CO<sub>2</sub> e estoque de carbono.



### 3.5. REFERÊNCIAS

- ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 3, p. 246-254, 2014.
- AL-KAISI, M. M.; YIN, X. H. Tillage and crops residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations. **Journal of Environmental Quality**, v.34, p.437-445, 2005.
- AQUINO, R. E.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; BAHIA, A. S. R.; SANTOS, L. A. C. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in archaeological dark earth in Apuí county, southern Amazonas. **Geoderma**. Amsterdam, v. 262, p. 35-44, 2016.
- BAHIA, A. S. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; SIQUEIRA, D. S.; LA SCALA JR, N. Iron oxides as proxies for characterizing anisotropy in soil CO<sub>2</sub> emission in sugarcane areas under green harvest. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 192, p. 152–162, 2014.
- BARRÓN, V., MELLO, J. W. V., TORRENT, J. **Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa**. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V., V. H., SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds.), Tópicos em ciência do solo 1. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, Viçosa, pp. 139–162, 2000.
- BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.
- BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIRO, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Belém, v. 6, n. 2, p. 331-336, 2011.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Projeto Radambrasil**, folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro, 1978, 561p.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1501-1511, 1994.
- CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; NASCIMENTO, M. F.; SILVA, D. M. P. Estoque de carbono no solo e agregados em Cambissolo sob diferentes manejos no sul do Amazonas. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, vol. 11 n. 2 Taubaté, 2016.
- CARMO, D. A. B.; MARQUES JR, J. SIQUEIRA, D. S.; BAHIA, A. S. R. S.; SANTOS, H. M.; POLLO, G. Z. Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1261-1271, 2016.

CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; MAIA, S. M. F.; CERRI, C. E. P.; COSTA JÚNIOR, C.; FEIGL, B. J.; FRAZÃO, L. A.; MELLO, F. F. C.; GALDOS, M. V.; MOREIRA, C. S.; CARVALHO, J. L. N. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.67, p.102-116, 2010.

CPRM - Centro de Pesquisa de Recursos Minerais. **Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens**. Manaus, 2001. 93p. (Relatório Técnico).

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, MG, v.32, n.1, p. 323-332, 2008.

CUNHA, J. M.; GAIO, D. C.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. R.; SILVA, D. M. P.; LIMA, A. F. Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica da Amazônia. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 12, n. 2, Taubaté, 2017.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. A. F.; CURI, N.; SILVA, C. A. Variabilidade espacial do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo em povoamento de eucalipto. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 2, p. 407-422, 2011.

DANTAS, J. S.; MARTINS FILHO, M. V.; MARQUES JÚNIOR, Jr.; RESENDE, J. M. do A.; TEIXEIRA, D. B.; BARBOSA, R. S.; SIQUEIRA, D. S. Coeficiente de erodibilidade em sulcos e entressulcos de Argissolos coesos estimado pela cor do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.49, p.700-707, 2014.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide**. 2.ed. Oxford: Oxford University Press, 1998. 366p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

GLASER, B. **Eigenschaften und Stabilität des Humuskörpers der "Indianerschwarzerden" Amazoniens**. Bayreuther Bodenkundliche Berichte 68, University of Bayreuth, Germany, 196 p. 1999.

GLASER, B. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian amazon region. **Organic Geochemistry**, v. 31, n. 4, p. 669-678, 2001.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

HOUGHTON, R. A.; SKOLE, D. L.; NOBRE, C. A.; HACKLER, J. L.; LAWRENCE, K. T.; CHOMENTOWSKI, W. H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. **Nature**, Londres, v. 403, p. 301–304, 2000.

KÖPPEN, W. **Climatologia: com um estúdio de los climas de la tierra**. Publications In: Climatology. Laboratory of Climatology, New Gersey, 1948, 104p.

LA SCALA Jr., N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G. T. Shortterm soil CO<sub>2</sub> emission after conventional and reduced tillage of a no till sugar cane area in Southern Brazil. **Soil Tillage Research**, v. 91, n. 244-248, 2006.

LA SCALA, N.; MARQUES JÚNIOR, J. ; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO<sub>2</sub> emissions from a Brazilian bare soil. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1459-1462, 2000.

LEAL, F. T.; FRANÇA, A. B. C.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, B. ; MARQUES JÚNIOR, J.; SCALA JÚNIOR, N. Characterization of potential CO<sub>2</sub> emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 72, n.6, p. 535-539, 2015.

LANDIM, P. M. P. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 2003, 253 p.

LEUANGTHONG, O.; MCLENNAN, J. A.; DEUTSCH, C. V. Minimum acceptance criteria for geostatistical realizations. **Natural Resources Research**, v.13, p.131–141, 2004.

MALHI, Y.; TIMMONS R. J.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate change, deforestation and the fate of the Amazon. **Science**, 319: 169-172, 2008.

MARQUES Jr., J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, Amsterdam, v.219-220, p.63-71, 2014.

MINITAB Release 14.1, **Statistical Software**. US/ Canadá, 2000.

MORAIS, R. R.; MUNIZ, A. W.; TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C. Efluxo de CO<sub>2</sub> do Solo em Terra Preta de Índio em Iranduba, AM (Soil CO<sub>2</sub> efflux in Amazonian Dark Earth in Iranduba, AM). **Comunicato técnico 112**. Embrapa. 2015. 5p. DOI: 10.13140/RG.2.1.1652.2083

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JR, J.; MILTON CÉSAR COSTA CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; FERRAUDO, A. S. Multivariate technique for determination of soil pedoenvironmental indicators in Southern Amazonas. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 39, n. 1, p. 99-108, 2017.

OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 668-81, 2015.

PELUCO, R. G.; MARQUES Jr, J.; SIQUEIRA, D. S.; BARBOSA, R. S.; PEREIRA, G. T.; TEIXEIRA, D. B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, p.259-266, 2015.

ROBERTSON, G. P. **GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design, 1998.

SANTOS, L. A. C. dos; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. M. P.; MARQUES JR, J.; FRANCA, A. B. C. Caracterização e gênese de terras pretas arqueológicas no sul do Estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso)**, Viçosa, v. 37, p. 825-836, 2013.

SCHMIDT, M. & NOACK, A. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications, and current challenges. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, n. 3, p. 777 -793, 2000.

SEIDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. A Classification for a Geostatistical Index of Spatial Dependence. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. 1-10, 2016.

SILVA, D. M. P.; CAMPOS, M. C. C.; ALHO, L. C.; CUNHA, J. M.; PAULA NETO, P. Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e estoque de carbono em área de terra preta arqueológica sob cultivo de cacau. **Revista Brasileira de agroecologia**. v. 11, n. 3, 2016.

SILVA, A. F.; HALMEMAN, R. J.; ZIMBACK, C. R. L. Dependência espacial de atributos diagnósticos para delimitação de classes de solos. **Geociências**, São Paulo, v. 32, n.1, p. 93-100, 2013.

SILVA, E. A. A.; URIBE-OPAZO M. A.; SOUZA, E. G.; ROCHA, J. V. Um estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos de solo e planta. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 2, p. 365-371, 2003.

SOMBROEK, W.; RUIVO, M. L.; FEARNSIDE, P. M.; GLASER, B.; LEHMANN, J. **Amazonian Dark Earths as carbon stores and sinks**. In: LEHMANN, J.; KERN, D.C.; GLASER, B. & WOODS, W.I., eds. Amazonian Dark Earths. Origin, properties and management. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2003. p.125-139.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse reflectance spectroscopy. In: ULERY, A.L.; DREES, L. R. (Ed.). Methods of soil analysis: part 5: mineralogical methods. Madison: **Soil Science Society of America Journal**, Madson, 2008. p.367-387. (SSSA Book Series, 5).

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advance in Agronomy**, 38:54-94, 1985.

VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v.58, p.175-180, 1994.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; WEBSTER, R. Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible–near infrared spectra. **European Journal of Soil Science**, v. 62, p. 637-647, 2011.

## **CAPÍTULO 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

No capítulo 2 a assinatura espectral conseguiu identificar as características presentes na Terra Preta de Índio, principalmente em relação a sua mineralogia e a presença da matéria orgânica.

No capítulo 3 a assinatura espectral através das medidas de cores (matiz, valor e croma) principalmente, apresentaram relações com os atributos efluxo de CO<sub>2</sub> e estoque de carbono, onde possibilitou fazer inferências para estes atributos através do triângulo de cor.

Os resultados apresentados neste trabalho com a Terra Preta de Índio, mostram que a assinatura espectral é uma técnica rápida, prática e precisa, tornando-se uma alternativa atraente para auxiliar a quantificação indireta de atributos do solo, especialmente da mineralogia, fCO<sub>2</sub> e estoque de carbono, mostrando seu potencial em substituir ou associar em grande parte das análises laboratoriais convencionais.

Em um momento em que as mudanças climáticas estão em grande destaque, dada as consequências das atitudes antrópicas ao meio ambiente, este trabalho pode auxiliar como uma base para futuros estudos visando entender melhor o potencial das Terras Pretas de Índio nos ambientes amazônicos. Sendo importantes contínuos estudos com a assinatura espectral em Terra Preta de Índio visando validar e aperfeiçoar as informações espectrais, sendo interessante gerar um banco de dados espectral de solos com presença de Terra Preta de Índio da região Amazônica, servindo de base técnica alternativa para validação de informações dos seus atributos e geração de mapas mais elaborados.