

UFRRJ
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

DISSERTAÇÃO

**Funções de Pedotransferência para Estimativa da
Densidade de Solos da Bacia do Solimões, sob
Floresta Tropical Amazônica**

Andréa da Silva Gomes

2014



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DA
DENSIDADE DE SOLOS DA BACIA DO SOLIMÕES, SOB
FLORESTA TROPICAL AMAZÔNICA

ANDRÉA DA SILVA GOMES

Sob a Orientação do Professor

Marcos Bacis Ceddia

e Co-orientação da Professora

Michele Duarte de Menezes

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo.

Seropédica, RJ

Fevereiro de 2014

UFRRJ / Biblioteca Central / Divisão de Processamentos Técnicos

631.43

G633f

T

Gomes, Andréa da Silva, 1988-

Funções de pedotransferência para estimativa da densidade de solos da Bacia do Solimões, sob floresta tropical amazônica / Andréa da Silva Gomes. – 2014. 50 f.: il.

Orientador: Marcos Bacis Ceddia.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, 2014.

Bibliografia: f. 38-41.

1. Solos – Densidade - Medidas – Teses. 2. Amazônia – Solos - Teses. 3. Solimões, Rio (AM) - Teses. 4. Carbono - Teses. I. Ceddia, Marcos Bacis, 1968-. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo. III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO

ANDRÉA DA SILVA GOMES

Dissertação/Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 18/02/2014

Marcos Bacis Ceddia. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Gustavo Souza Valladares. Dr. UFPI

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ

*"Eu sou de uma terra que o povo padece
Mas não esmorece e procura vencer.
Da terra querida, que a linda cabocla
De riso na boca zomba no sofrer
Não nego meu sangue, não nego meu nome
Olho para a fome, pergunto o que há?
Eu sou brasileiro, filho do Nordeste,
Sou cabra da Peste, sou do Ceará."*

Patativa do Assaré

*A Deus, minha família e amigos, pelo apoio, carinho e confiança,
Por serem meu porto seguro e o motivo pelo qual não me deixo vencer pelos obstáculos
encontrados no meio do caminho e sempre sigo em frente.*

Ofereço

*Á minha querida mãe, Antônia Cláudia, pela dedicação, preocupação, paciência, pelas
lágrimas que já derramou por mim, pelo amor incondicional e por ter sido o meio sagrado
pelo qual Deus me propiciou a vida.*
Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus que é conforto, guia, refúgio, me deu forças para chegar até aqui e está presente em todos os momentos de minha vida, dádiva dada por Ele.

À minha família pelo apoio e por terem investido na minha educação por tantos anos, sempre compreensivos e atenciosos.

A Selenobaldo Sant'Anna, pessoa especial, companheira e que sempre esteve ao meu lado, torcendo, incentivando, cuidando e ajudando sempre da melhor forma.

Ao professor Marcos Bacis Ceddia pela orientação nesse trabalho, pela atenção, empenho com a pesquisa, paciência, pelo exemplo de profissional, competente, ético, responsável, por sempre ter uma boa idéia (várias idéias) para sugerir, pelos ensinamentos, pelos risos, por ter confiado em minha capacidade e esforço.

A professora Michele por contribuir enormemente com a realização desse trabalho, sempre disponível, interessada, pronta para me ouvir e colaborar com soluções, sempre sensata, agradável e sorridente.

Ao grupo Água e Solos, ao qual tenho o prazer e a alegria de fazer parte, por todos os bons frutos que irão surgir da união desse grupo.

Aos pesquisadores Guilherme Kangussu Donagemma e Sebastião Barreiros Calderano da EMBRAPA Solos pela ajuda nas análises de mineralogia dos solos da área de estudo. Em especial ao Dr Guilherme, pela atenção, disponibilidade, incentivo e boa vontade.

Ao técnico do laboratório de Raio-X da Embrapa Solos, Gilson Gregoris, por ter me recebido de forma muito gentil, sempre muito atencioso, disponível, paciente, me fazendo sentir a vontade para trabalhar ao seu lado.

Ao professor Gustavo Souza Valladares, por ter sido meu primeiro orientador, profissional que tenho me espelhado pelo exemplo que representa para mim, por ter dado meus primeiros passos na pesquisa científica sob sua competente orientação, pelo incentivo a fazer a seleção para o mestrado na Rural, por sempre acreditar em mim, por ter sido um grande amigo e pela ajuda em todos os momentos.

Aos amigos da turma do mestrado 2012.1, em especial Silvana Gomes, Iara Lopes Leilson Arruda, Esdras, pela amizade, carinho e horas de estudo compartilhadas.

As amigas Khadidja Dantas, Gabriela Cemirames e Arleudina, companheiras nordestinas, pela força, confiança, carinho e apoio.

Aos amigos Sandra Lima, Jakson Leite e Alessandro de Paula pela amizade e carinho.

A todos os professores da UFRRJ, em especial Lúcia Helena e Marcos Gervasio, por terem marcado minha passagem por esta Universidade com as aulas fantásticas de Formação do solo, uma disciplina que me encantou e contribuiu de forma singular para uma melhor compreensão do mundo "Ciência do Solo" e Érika Pinheiro pelos ensinamentos da disciplina Dinâmica da matéria orgânica, simpatia, espontaneidade, disponibilidade, carinho e por ter me recebido tão bem e despertado meu respeito, admiração e carinho.

Aos funcionários da secretaria do CPGA-CS, Marquinhos, Michele e Wagner pela atenção e gentileza.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, uma instituição de tradição, com excelentes profissionais e ao CPGA-CS pela oportunidade de ter estudado e conhecido todos os amigos e professores que com certeza vão fazer parte da minha história para sempre.

A CAPES pela concessão de bolsa no primeiro ano de curso e a FAPERJ pela concessão de bolsa no segundo ano, recursos indispensáveis para realização do trabalho de pesquisa.

BIOGRAFIA

Andréa da Silva Gomes, filha de Francisco Antônio Gomes e Antônia Cláudia da Silva Santos, nasceu em 10 de setembro de 1988 na cidade de Fortaleza, Estado do Ceará. Ingressou na Universidade Federal do Ceará em fevereiro de 2008 no curso de Zootecnia. Em 2010 iniciou trabalhos de iniciação científica na área de solos, atuando nos temas geoprocessamento e pedologia, sendo bolsista PIBIC/CNPq. Formou-se em 2011 e em março de 2012 iniciou o mestrado no Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

RESUMO

GOMES, Andréa da Silva. **Funções de pedotransferência para estimativa da densidade dos solos da Bacia do Solimões, sob Floresta Tropical Amazônica**. 2014. 50f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2014.

Dados de densidade do solo (Ds), frequentemente, não estão disponíveis em relatórios de levantamento de solos dificultando a geração de mapas de atributos como disponibilidade de água e estoque de carbono (EC). A carência de dados de Ds é ainda mais limitante em regiões como a Amazônia brasileira. Nessas regiões, a mata densa e o limitado número de vias de acesso elevam sobremaneira os custos de mapeamento e amostragem de solos. Diante da ausência de dados medidos, pesquisadores desenvolvem funções de pedotransferência (FPTs) para estimar este atributo. Embora essas funções permitam sobrepor a limitação de dados medidos, poucos trabalhos na literatura aprofundam medidas de acurácia dessas funções que têm como base um conjunto de dados externos. Além disso, também são raros os estudos que quantificam os efeitos de diferentes FPTs na qualidade final de mapas de variabilidade espacial, de atributos tais como estoque de carbono. Considerando o exposto, esse trabalho teve os seguintes objetivos: a) desenvolver FPTs para estimar a Ds em solos da Bacia do Solimões; b) comparar o desempenho dos modelos gerados com os demais modelos encontrados na literatura; e c) quantificar o efeito do uso de FPTs para estimar a densidade do solo, na variabilidade espacial de EC. Para geração das FPTs para estimar Ds, foram utilizados dados de atributos físicos e químicos de 96 perfis, originados de levantamento detalhado de solos da Base de Operação Geólogo Pedro de Moura (Coari-Amazonas). Foram desenvolvidos modelos de regressão linear múltipla e comparado o seu desempenho com o de modelos existentes na literatura para a região Amazônica Brasileira (Bernoux et al., 1998; Tomasella & Hodnett, 1998; e Benites et al., 2007), sendo aplicados os seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), o erro médio de predição (MPE), a Raiz do Quadrado médio do erro de predição (RMSPE) e o erro médio absoluto (MAE). A partir de diferentes dados de Ds (medido e estimados pelas FPTs), foram gerados mapas de variabilidade espacial de EC através de krigagem ordinária. Ainda para comparar os mapas gerados a partir de diferentes dados de Ds, foi realizada a análise espacial através de álgebra de mapas, subtraindo-se o mapa gerado com dados medidos dos mapas gerados a partir de FPTs. Na etapa de validação, os modelos MG1, MG2 e MG3 apresentaram os melhores índices de MEP, MAE, RMSPE e R^2 ; contudo o MG3 selecionou menor número de variáveis e, desta forma, o modelo foi o mais simples. Os mapas de variabilidade de EC gerados com Ds estimada pelos modelos MG1, MG3 e de Tomasella & Hodnett (1998) apresentaram amplitude de valores bem próxima aos valores encontrados para o mapa de EC medido; já os mapas estimados pelos modelos de Benites et al. (2007) e Bernoux et al. (1998) tenderam a superestimar esses valores. O MG3 foi mais eficiente na predição da Ds para os solos da Bacia do Solimões, o que era esperado devido à função ter sido desenvolvida com banco de dados obtido nesse ambiente. Quanto aos mapas de variabilidade de EC, o gerado a partir de valores de EC calculados com a Ds estimada pelo modelo MG3 foi o que mais se aproximou do mapa de EC medido. Os resultados da análise espacial mostram os menores valores de erro nos mapas EC MG1 e EC MG3, que foram de $0,09 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$ e $0,05 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$, respectivamente. Já os mapas com os maiores valores de erro foram os obtidos segundo Benites et al. (2007) e Bernoux et al. (1998), que foram de $1,56 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$ e $1,44 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$, respectivamente; em relação ao mapa EC medido.

Palavras-chave: Amazônia Brasileira. Estoque de carbono. Regressão linear múltipla.

ABSTRACT

GOMES, Andréa da Silva. **Pedotransfer functions to estimate soil bulk density for soils in the Solimões Basin, under Amazon Tropical Forest.** 2014. 50p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science) Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2014.

Soil bulk density (BD) data, commonly, are not available in soil survey reports making difficult the generation of soil attributes maps such as availability of water and carbon stock (CS). Lack of BD data is even more limiting in regions such as the Brazilian Amazon. In these regions, the dense forest and the limited access roads increase costs of soil mapping and sampling. In the absence of measured data, researchers have developed pedotransfer functions (PTFs) to estimate this attribute. Although these functions allow overcome the limitation of measured data, few studies in the literature get deeper on measuring the accuracy of these functions based on a set of external data. Furthermore, few studies quantify the effects of different PTFs on the final quality of maps of spatial variability of attributes such as carbon storage. Considering this explanation, this study had as objectives: a) to develop PTFs for estimating BD in soils of the Solimões Basin; b) to compare the performance of the models generated against other models found in the literature; and, c) to quantify the effect of using PTFs to estimate the BD, on the quality of spatial variability of CS. For the generation of PTFs to estimate BD, physical and chemical data measures in 96 soil profiles were used. The soils were sampled during a detailed soil survey carried out in the *Base Operacional Geólogo Pedro de Moura*, located in Coari, Amazonas State. Multiple linear regression models were developed and their performance was compared with those existing in the literature for the Brazilian Amazon region (Bernoux et al., 1998; Tomasella & Hodnett, 1998; and Benites et al., 2007). The following statistical indicators were applied: coefficient of determination (R^2), the mean prediction error (MPE), the Root mean Square error of prediction (RMSPE), and the mean absolute error (MAE). From the different BD data (measured and estimated by PTFs), maps of spatial variability of CS were generated by using ordinary kriging. Also, to compare the maps obtained from the distinct BD data, spatial analysis was performed using map algebra, which consisted on subtracting the generated map with measured data from the maps generated with the PTFs. It was observed that the MG1, MG2 and MG3 models showed the best levels of MEP, MAE, and R^2 RMSPE, in the validation phase. However, the MG3 selected the lowest number of variables, thus it was considered the best model. The maps of spatial variability generated for CS estimated by using BD from the models MG1, MG3, and Tomasella & Hodnett (1998) showed a range of values very close to the values found for the map of CS measured. On the other hand, the maps obtained by the models of Benites et al. (2007) and Bernoux et al. (1998) tended to overestimate the CS values. The MG3 was more efficient in predicting the BD for soils of Solimões Basin; which was expected, since the function was developed with the database collected in the same environment condition. As for the CS spatial variability, the map generated using the values calculated with the BD estimated by the MG3 model, presented the closest similarity to the map from CS measured values. The results of spatial analysis showed that the CS estimated by the MG1 and MG3 models had the lowest error, with values of $0.09 \pm 0.5 \text{ kg C m}^{-2}$ and $0.05 \pm 0.5 \text{ kg C m}^{-2}$, respectively. Besides, the maps showing the greatest errors were those generated using PTFs published by Benites et al. (2007) and Bernoux et al. (1998), with values of $1.56 \pm 0.5 \text{ kg C m}^{-2}$ and $1.44 \pm 0.5 \text{ kg C m}^{-2}$, respectively; when compared to the map of CS with measured values.

Key Words: Brazilian Amazon. Carbon stock. Multiple linear regression.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de solos da área de estudo (município de Coari, Estado do Amazonas) (Fonte: Petrobras, 2010).	6
Figura 2. Parâmetros do semivariograma experimental (Autoria própria).....	8
Figura 3. Localização da área de estudo (município de Coari, Estado do Amazonas). (Fonte: Petrobras, 2010).	10
Figura 4. Distribuição dos pontos amostrados na área de estudo (Fonte: Petrobras, 2010)....	11
Figura 5. Perfis das principais ordens de solos selecionados para este trabalho: A - Cambissolo, B - Argissolo, C - Espodossolo, D - Neossolo e E - Planossolo.....	12
Figura 6. Mineralogia da fração argila dos horizontes diagnósticos subsuperficiais (Bt, Bi) dos perfis representantes das principais classes de solos da área em estudo (A – Perfis de Argissolo Vermelho-Amarelo; B – Perfis de Argissolo Amarelo e C – Perfis de Cambissolo Háplico).	19
Figura 7. Valores medidos vs valores estimados de densidade do solo ($\text{kg}\cdot\text{dm}^{-3}$).	23
Figura 8. Índices de avaliação dos modelos gerados e os da literatura para região Amazônica.	24
Figura 9. Semivariogramas de estoque de carbono nos diferentes perfis estudados.....	27
Figura 10. Mapas de variabilidade espacial de estoque de carbono pelo método de krigagem Ordinária.	30
Figura 11. Mapas de variância de Krigagem.....	32
Figura 12. Mapas de desvios de estoque de carbono em relação ao Mapa de EC Medido.	35
Figura 13. Área ocupada pelas classes de desvios de estoque de carbono em relação ao Mapa de EC medido.	36

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Número e percentagem de perfis por classes de solos selecionados para esse estudo.	12
Tabela 2. Modelos de estimativa da densidade do solo.....	15
Tabela 3. Estatística descritiva das variáveis do conjunto de dados utilizadas para geração da FPT.	20
Tabela 4. Matriz de correlação entre os atributos do solo utilizados para a geração das FPTs.	21
Tabela 5. Parâmetros dos semivariogramas experimentais.	26
Tabela 6. Parâmetros de validação (<i>Jacknife</i>) dos modelos de predição de EC.....	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Funções de Pedotransferência (FPTs)	3
2.2 Caracterização da Área de Estudo e a Fonte de Dados das FPTs Utilizadas na Literatura para Predição de Densidade do Solo para Região Amazônica	4
2.3 Geoestatística e Mapas de Variabilidade Espacial de Estoque de Carbono	7
3 MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1 Localização	10
3.2 Banco de Dados	11
3.3 Caracterização Mineralógica	13
3.4 Desenvolvimento das FPTs	13
3.4.1 Seleção dos perfis	13
3.4.2 Análise de dados	14
3.4.3 Índices de avaliação dos modelos	14
3.4.4 Modelos na literatura para a região Amazônica	15
3.5 Mapas de Variabilidade Espacial de Estoque de Carbono e Análises Espaciais	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
4.1 Mineralogia da Fração Argila dos Solos da Área de Estudo	17
4.2 Estatística Descritiva do Banco de Dados	20
4.3 FPTs Geradas	21
4.4 Comparação do Desempenho das FPTs Geradas com as Apresentadas na Literatura	23
4.5 Análise Geoestatística	25
5 CONCLUSÕES	37
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
7 ANEXOS	42

1 INTRODUÇÃO

A densidade do solo tem relevante aplicação para o cálculo de outros atributos do solo como estoque de carbono, porosidade total, conversão de massa para volume entre outros, além disso, é indicador de compactação/adensamento do solo. No passado, como o objetivo principal dos levantamentos de solos era a geração de mapas de solos, os atributos coletados e analisados eram aqueles que davam subsídios à classificação, o que, geralmente, não incluía a determinação da densidade do solo.

Atualmente tem crescido a demanda por mapas de atributos do solo de interpretação mais específica, tais como estoque de carbono do solo, disponibilidade de água, resistência à penetração radicular entre outros. No caso do estoque de carbono, os mapas são demandados para dar suporte ao entendimento da dinâmica do carbono em agroecossistemas e sua relação com mudanças climáticas e emissões de gases de efeito estufa. Para se calcular o estoque de carbono é necessário o conhecimento do teor de carbono e da densidade do solo em diferentes profundidades (comumente até 1 metro). Geralmente, o que limita os cálculos de estoque de carbono é a ausência de valores quantificados de densidade do solo, uma vez que a determinação desse atributo é comparativamente mais trabalhosa e demorada, sobretudo abaixo de 30 cm de profundidade. Com exceção de algumas regiões que possuem levantamentos de solos mais detalhados, a ausência dessa informação é ainda mais crítica para as regiões centro oeste, norte e nordeste do Brasil.

A região Amazônica brasileira é carente de informações detalhadas sobre o meio físico e são poucas as informações sobre os atributos físicos, químicos e mineralógicos dos solos. Dentre as poucas fontes de dados de solos disponíveis para a região, o projeto RadamBrasil (1978) ainda é a principal base usada por pesquisadores nacionais e internacionais. Esta base de dados, embora de boa qualidade, foi publicada em escala pequena (1:1.000.000 - nível exploratório). Na área de estudo, o menor detalhamento das informações de solos se devem, principalmente, a dificuldade de acesso, que se dá somente por barco ou avião; e ao risco à saúde dos técnicos que precisam trabalhar nas condições da Floresta Amazônica densa.

Na literatura são encontrados alguns trabalhos que desenvolveram funções de FPTs para estimativa de densidade do solo da região Amazônica. Dentre esses, estão os modelos desenvolvidos por Bernoux et al. (1998), Tomasella & Hodnett (1998) e mais recentemente Benites et al (2007). Os autores desenvolveram funções de pedotransferência (FPTs) para estimativa da densidade dos solos brasileiros a partir de diferentes bases de dados gerados em diferentes épocas. Bernoux et al. (1998) e Tomasella & Hodnett (1998) utilizaram banco de dados com informações da região Amazônica contidas no projeto RadamBrasil para o desenvolvimento dos modelos. Já Benites et al. (2007) utilizaram dados de praticamente todos os biomas brasileiros contidos em levantamentos realizados pela Embrapa Solos. Os modelos desenvolvidos por esses autores são amplamente utilizados (Bernoux et al, 2002; Fidalgo et al. 2007; Araújo et al., 2011). No entanto, considerando a grande extensão territorial do Brasil e a variabilidade dos solos nestes biomas, se percebe a necessidade de aprofundar na avaliação da qualidade desses modelos.

De acordo com Minasny et al. (2003), para evitar o mau uso do conceito de FPTs, os princípios da eficiência (Não prognosticar algo que é mais fácil e mais barato medir ou determinar) e da incerteza (Não usar FPTs, a menos que se possa avaliar a incerteza associada) devem ser observados.

Esse estudo buscou desenvolver FPTs para solos da Bacia do Solimões localizados no estado do Amazonas, considerando os princípios da eficiência e incerteza. Especificamente os objetivos são:

- a) desenvolver modelos de FPTs para estimar a densidade do solo empregando atributos físicos e químicos para solos da Bacia do Solimões, sob Floresta Tropical Amazônica;
- b) comparar o desempenho dos modelos desenvolvidos nesse estudo com outros na literatura (Bernoux et al., 1998; Tomasella & Hodnett, 1998; e Benites et al., 2007); e
- c) quantificar o efeito do uso de FPTs para estimar a densidade do solo, na variabilidade espacial do estoque de carbono em solos da Bacia do Solimões.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Funções de Pedotransferência (FPTs)

A expressão Função de Pedotransferência foi criada por Bouma (1989) e significa “*transformando dados que possuímos em dados que necessitamos*”. Utilizando essas funções é possível se estimar dados de difícil mensuração, laboriosa e de custo elevado, a partir de informações de menor custo e fáceis de serem obtidas, como dados morfológicos (através de árvores de regressão) e granulométricos. Segundo Minasny et al (2003), quando a pedotransferência é expressa por meio de equações matemáticas, ela passa a ser designada por Funções de Pedotransferência – FPT (*Pedotransfer Functions*). De acordo com Pachepsky (2005), as FPTs surgiram como forma de relacionar os parâmetros hidráulicos do solo e as propriedades mais fáceis de serem mensuradas, que estão geralmente disponíveis em relatórios de levantamento de solos.

O desenvolvimento de novas FPTs é uma tarefa árdua (Minasny et al., 2003), pois necessita de ampla base de dados de solos contendo muitos dados morfológicos e determinações de laboratório. A princípio esses autores recomendam que se utilize FPTs já desenvolvidas, mas atentando para o fato de que a validade de uma determinada FPT não deve ser interpolada ou extrapolada além do ambiente pedológico ou tipo de solo em que foi desenvolvida, e que, a aplicação direta de uma FPT em solos com propriedades distintas só deve ser feita após o teste de seu desempenho, para que FPTs mais adequadas possam ser identificadas.

Com a evolução do uso e desenvolvimento de FPTs, surgiram e foram discutidos alguns problemas relacionados à aplicação das funções (Benites et al., 2007). A precisão das FPTs é limitada, apesar da utilização de preditores potencialmente úteis e uso de ferramentas sofisticadas de processamento de dados. A aplicabilidade das FPTs também é limitada, pois funções desenvolvidas para uma região ou com determinado banco de dados não podem ser aplicadas para condições bioclimáticas diferentes sem serem validadas (Williams et al., 1992; Tietje & Tapkenhinrichs, 1993; Kern, 1995; Wosten et al., 2001). Uma explicação hipotética para as limitações das FPTs, é que elas não descrevem a estrutura do espaço poroso e, portanto, não representam bem as relações entre estrutura e função do solo. Os preditores típicos nas FPTs, textura do solo, densidade do solo, teor de carbono orgânico, estão relacionados com a estrutura do solo em um sentido amplo, mas não são suficientes para caracterizar a porosidade do solo (tamanho e geometria).

A estrutura do solo pode ser definida como o arranjo de partículas do solo. Esse arranjo pode ser de partículas primárias (areia, silte e argila) ou secundárias (agregados ou *peds*). O termo agregado ou *ped* se aplica para partícula secundária formada a partir da agregação de partículas primárias do solo e que não apresentam superfície de fraqueza quando submetidos a uma determinada pressão, isto é, o agregado se quebra sem uma determinada forma e tamanho, produzindo fragmentos de conformações não específicas. Portanto, é a estrutura do solo que define o espaço poroso e sua complexidade de geometria. No entanto, a informação sobre estrutura dos diferentes solos é geralmente descrita de forma qualitativa (tipo, tamanho, forma e grau de desenvolvimento). Esses dados categóricos são de difícil uso em modelos estatísticos para estimar propriedades físico-hídricas do solo. Recentemente, o método de classificação e árvores de regressão foi reconhecido como uma técnica estatística adequada para uso de variáveis categóricas como preditores (Clark & Pregibon, 1992).

Segundo Minasny et al. (2003), para evitar o mau uso do conceito de pedotransferência, foram definidos dois princípios de FPTs: eficiência e incerteza. O princípio

da eficiência é “*Não prognosticar algo que é mais fácil e mais barato medir ou determinar*”. As FPTs têm como objetivo estimar propriedades que são difíceis, laboriosas ou de custo elevado para determinação, então, é necessário que os preditores sejam de obtenção mais fácil e barata. Caso contrário, não seria vantajosa a utilização das FPTs. O princípio da incerteza é “*Não usar FPTs, a menos que se possa avaliar a incerteza associada e, para um determinado problema, se um conjunto de FPTs alternativas está disponível, usar aquela com menor variância*”. Isso significa que é mais conveniente escolher a função que tenha o menor erro de variância ou que se ajuste melhor ao tipo de solo e que a incerteza das FPTs deve ser quantificada, assim, a estimativa das variáveis preditas será a mais realista possível.

A pedotransferência é um assunto relativamente novo no Brasil, embora se tenha aplicação potencial deste recurso quando se estima uma classe de aptidão agrícola ou uma classe de risco de erosão (Minasny et al., 2003). Trabalhos foram realizados utilizando FPTs para estimar variáveis de difícil determinação, a partir de variáveis de fácil obtenção como granulometria, densidade do solo, teor de carbono orgânico (Almeida, 2008; Marcolin, 2009; Michelon et al., 2010; Nascimento et al., 2010). A densidade do solo tem reconhecida aplicação para cálculo de atributos dos solos (porosidade total, estoque de carbono e armazenamento de água), bem como a execução de transformações de massa para volume e vice-versa. Portanto, é um preditor chave no prognóstico de retenção e movimento da água e estoque de carbono no solo, além disso, indica a existência de compactação/adensamento. No entanto, a densidade do solo não é frequentemente determinada durante a execução de levantamentos de solos para todos os tipos de horizontes e solos.

A amostragem de campo e a obtenção de amostras para determinar a densidade do solo (Ds) são etapas laboriosas e fatigantes, principalmente abaixo de 30 cm de profundidade (Benites et al., 2007) e para determinar o estoque de carbono, geralmente são necessários dados de densidade até 1 m de profundidade. Araújo et al. (2012) usaram equações lineares múltiplas que relacionaram teor de argila, C e pH, para estimar Ds nas camadas de 20–40 cm com intuito de calcular o estoque de carbono em solos na região leste do Acre. Fidalgo et al. (2007) estimaram o estoque de carbono no solo no Brasil considerando os diferentes tipos de solo sob diferentes sistemas de uso e distribuídos nos diversos biomas brasileiros. Para isso, a Ds foi estimada a partir de uma FPT utilizando valores de argila, carbono e soma de bases.

Bernoux et al. (1998) e Tomasella & Hodnett (1998) publicaram os primeiros trabalhos de predição de densidade do solo a partir das propriedades dos solos na Amazônia brasileira. O modelo proposto por Bernoux et al. (1998) incluiu os atributos argila, carbono orgânico total, pH e areia, já o modelo proposto por Tomasella & Hodnett (1998) incluiu carbono orgânico total, silte e argila. Esses autores utilizaram como fonte de dados, as informações contidas no projeto RadamBrasil. Mais recentemente, Benites et al. (2007) desenvolveram um procedimento estatístico para predizer densidade dos solos brasileiros presentes na maior parte dos biomas a partir de propriedades do solo de fácil obtenção e compararam o modelo gerado com três modelos existentes na literatura, dois para o Brasil (Bernoux et al., 1998; Tomasella & Hodnett, 1998) e um para os EUA (Manrique & Jones (1991). O modelo incluiu teor de argila, carbono orgânico total e soma de bases e a fonte de dados utilizadas na geração do modelo foram as informações contidas em levantamentos de solos da Embrapa Solos. Os autores concluíram que comparado aos três modelos existentes, o proposto apresentou menor viés, maior precisão e maior exatidão, ou seja foi o mais preciso.

2.2 Caracterização da Área de Estudo e a Fonte de Dados das FPTs Utilizadas na Literatura para Predição de Densidade do Solo para Região Amazônica

O bioma Amazônia abrange no Brasil área de aproximadamente 5.217.423 km², correspondendo a cerca de 61% do território brasileiro. Esse bioma engloba os estados do

Pará, Amazonas, Maranhão, Tocantins, Mato Grosso, Acre, Amapá, Rondônia e Roraima. O estado do Amazonas, onde a área de estudo está localizada, apresenta superfície aproximada de 1.577.820 km² (CPRM, 2006). Duas bacias sedimentares fanerozóicas recobrem o Estado, a bacia do Solimões e a bacia do Amazonas. Essas bacias correspondem à primitiva Bacia do Amazonas, dividida em três domínios: Alto, Médio e Baixo Amazonas, separados, respectivamente, pelo Alto de Purus e pelo Alto de Monte Alegre. Caputo (1984) sugeriu a substituição do nome Alto Amazonas por Solimões e o nome Bacia do Amazonas corresponde atualmente à antiga Bacia do Médio e Baixo Amazonas (Eiras et al. 1994). A área de estudo se insere na bacia do Solimões, que apresenta uma área sedimentar total de 950.000 km², correspondendo a 60% do estado do Amazonas (Barata & Caputo, 2007).

No início da década de 1970, com o intuito de promover a ocupação da região e sua integração à economia nacional o governo brasileiro desenvolveu o projeto RADAM, tendo como produto diversos mapas e relatórios dos seguintes temas: topografia, geologia, geomorfologia, solos, vegetação e aptidão das terras. Até hoje, a principal fonte de dados de solos da região Amazônica é o projeto RADAM, o qual, apesar da qualidade, ainda não atende adequadamente a grande demanda por informações necessárias para o planejamento e execução de projetos e estudos ambientais na região.

De acordo com Brasil (1978), com exceção do fator relevo, os solos ao longo da área de estudo apresentam certa similaridade em relação aos fatores de formação, ou seja, são solos formados a partir do mesmo material de origem, clima, tempo e sob mesmo tipo de vegetação. Os solos da formação Solimões se desenvolveram a partir de sedimentos Terciário - Quaternários, compostos de argila, silte e areia muito fina. Durante o período Neoplioplestocênio e Holoceno o clima passou por flutuações de estações úmidas e secas bem marcadas, culminando com o clima atual classificado como Af (Classificação de Köppen), com temperatura média do mês mais frio sempre superior a 18°C e distribuição uniforme de chuva durante o ano todo sempre acima de 60 mm ao mês.

Nesse ambiente, a principal fonte do carbono estocado nos solos é proveniente da Floresta Pluvial Tropical Densa de Terra Firme (baixos platôs) e Floresta Pluvial Tropical Aberta (áreas aluviais periodicamente inundadas e de terraços). Assim, as maiores variações dos solos estão associadas ao fator relevo, sendo observados relevos dissecados em interflúvios tabulares, superfícies pediplanadas, colinas e planícies fluviais.

O mapa de solos da área de estudo está apresentado na Figura 1 e as unidades de mapeamento estão descritas de forma detalhada no Anexo A. As ordens de solos predominantes na área de estudo foram Argissolos e Cambissolos.

Em geral, os solos apresentam predomínio de areia fina em relação à areia grossa e quantidade elevada de silte em relação aos solos brasileiros. Do ponto de vista químico apresentam baixos valores de pH e saturação por bases e elevados valores de alumínio, conferindo a alguns perfis caráter aluminico (teor de alumínio extraível ≥ 4 cmol_c kg⁻¹ de solo associado a atividade de argila < 20 cmol_c kg⁻¹ de argila, além de apresentar saturação por alumínio $\geq 50\%$ e/ou saturação por bases $< 50\%$) ou alítico (teor de alumínio extraível ≥ 4 cmol_c kg⁻¹ de solo, associado à atividade de argila ≥ 20 cmol_c kg⁻¹ de argila e saturação por alumínio $\geq 50\%$ e/ou saturação por bases $< 50\%$) (Embrapa, 2013). Esses níveis de alumínio são tóxicos para a maioria das culturas e se apresentam como limitação de ordem química para o desenvolvimento de culturas agrícolas.

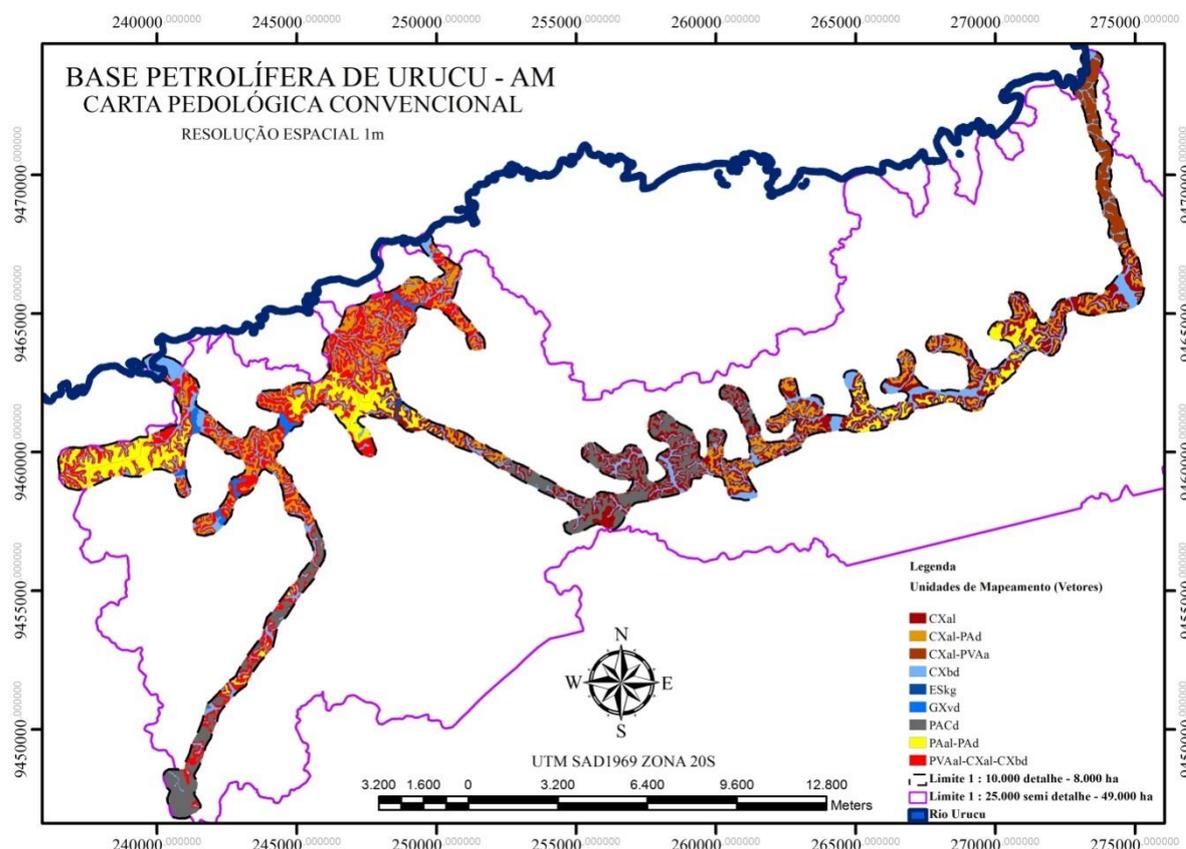


Figura 1. Mapa de solos da área de estudo (município de Coari, Estado do Amazonas) (Fonte: Petrobras, 2010).

A fonte de dados utilizada por Bernoux et al. (1998) e Tomasella & Hodnett (1998) para o desenvolvimento de FPTs para estimar densidade do solo, foi o projeto RadamBrasil, os autores usaram apenas informações sobre a região Amazônica. As ordens de solo predominantes identificadas foram os Latossolos e Argissolos. Em geral, os solos desses estudos apresentaram médias de $388,4 \text{ g kg}^{-1}$ de argila e $388,9 \text{ g kg}^{-1}$ de areia e baixos valores de pH e soma de bases (SB) e baixos. Esses trabalhos não trazem informações mais detalhadas sobre os dados utilizados na geração e validação das FPTs, o que torna o uso desses modelos limitado ou com maiores probabilidades de uso inadequado, causando maiores erros nas estimativas.

McBratney et al. (2011) discorrem sobre recomendações para se desenvolver FPTs, os autores sugerem que todas as FPTs publicadas deveriam conter informações básicas sobre o conjunto de dados original, de treinamento e validação, apresentando a estatística básica e a acurácia das funções. Essas informações podem ajudar o usuário a decidir se a FPT pode ser aplicada para o conjunto de dados que o mesmo irá trabalhar.

Benites et al. (2007) utilizaram arquivos de levantamentos realizados pela Embrapa Solos, com informações de quase todos os biomas. As ordens de solo predominantes foram os Latossolos e Argissolos, os horizontes variaram consideravelmente em seus atributos químicos e físicos, considerando a grande extensão territorial do Brasil. Foram utilizados 363 perfis distribuídos por quase todos os biomas brasileiros e destes, apenas 21 (5, 8%) estavam localizados no bioma Amazônia. Em geral, os solos nesse estudo apresentaram valores médios de argila, areia e silte de 405 g kg^{-1} , 402 g kg^{-1} , 193 g kg^{-1} , respectivamente. Altos valores de SB e baixos valores de Al^{3+} , além de valores de pH mais elevados (média 5, 2) em relação aos valores apresentados nos demais bancos de dados. A FPT proposta por Benites et al. (2007) é um modelo geral, e devido a pouca densidade de observações no bioma Amazônia, assim se

espera que o erro associado a esse modelo, quando comparado a FPTs específicas para essa região, seja maior. Segundo Minasny et al. (2003), a validade de uma FPT não deve ser extrapolada além do ambiente pedológico em que foi desenvolvida.

2.3 Geoestatística e Mapas de variabilidade Espacial de Estoque de Carbono

A Geoestatística é definida como um tópico especial da estatística aplicada que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, as quais têm um padrão espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias (apresentam irregularidades e variação imprevisível de um ponto para outro) e as totalmente determinísticas (apresentam relações existentes entre os pontos no espaço motivadas pela sua gênese) (Landim, 2006). Portanto, a análise geoestatística se aplica quando uma determinada propriedade ou atributo varia de um local para outro com certo grau de organização ou continuidade, expresso pela dependência espacial (Vieira, 2000).

O uso da estatística clássica em experimentos da ciência do solo deve ser feita de forma cuidadosa, pois para alguns atributos a hipótese de independência estatística ou distribuição espacial aleatória não se aplica. Na maioria dos casos o que se tem observado é a existência de dependência espacial, ou seja, o atributo de um fenômeno varia com a distância e a direção e nesse caso uso de geoestatística é mais apropriado (Valencia et al., 2004).

A geoestatística se baseia na determinação e modelagem do semivariograma experimental, através do qual se quantifica a variabilidade espacial entre as amostras (Gonçalves et al. 2005). O semivariograma é definido pela equação:

$$\gamma(h) = (1/2N(h)) E\{[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2\} \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

$2\gamma(h)$ – é a variância em função do vetor h ;

E – valor esperado;

$Z(x_i)$ – valor da variável na posição x_i

$Z(x_i+h)$ - valor da variável na posição x_i+h .

N – Número de pares distantes em um vetor h

Os parâmetros numéricos do semivariograma (Figura 2) são importantes para o ajuste de um modelo teórico que melhor represente a distribuição espacial dos dados e para a etapa de krigagem (estimação de dados em locais não amostrados). O efeito pepita (C_0) revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. O patamar ($C_0 + C_1$) é aproximadamente igual a variância dos dados. O alcance (a) é a distância na qual $\gamma(h)$ atinge o patamar e é a distância limite de dependência espacial, a partir da qual tem distribuição espacial aleatória. A contribuição (C_1) é a variância estrutural, ou seja, corresponde a variação modelada pelo semivariograma e é calculada pela diferença entre o patamar e o efeito pepita (Vieira, 2000; Valencia et al., 2004).

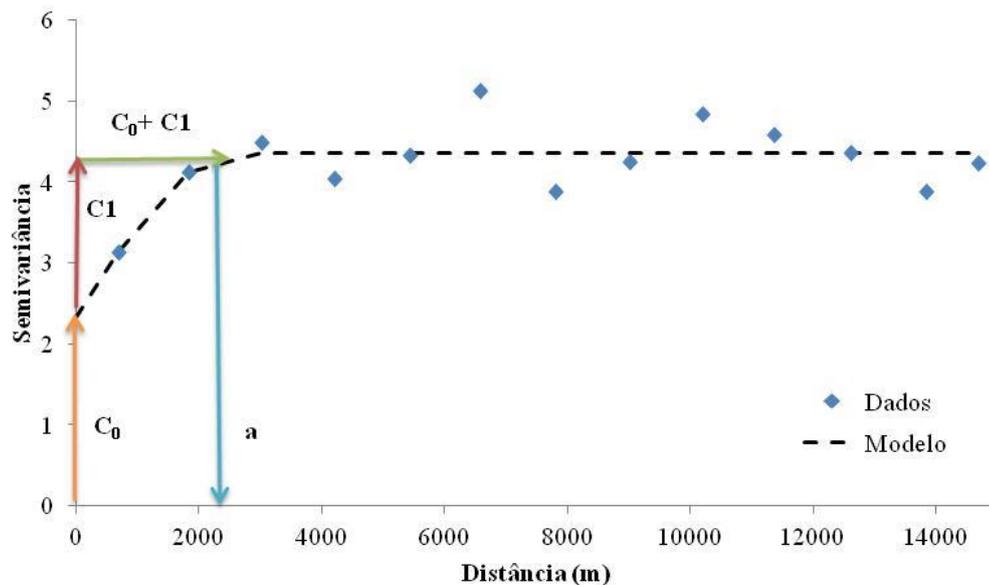


Figura 2. Parâmetros do semivariograma experimental (Autoria própria).

O semivariograma é necessário para a verificação da existência de dependência espacial, e quando detectada, é possível o ajuste de um modelo teórico que melhor represente a distribuição espacial dos dados (linear, esférico, exponencial, gaussiano). O ajuste de um modelo teórico ao semivariograma experimental é um dos pontos mais relevantes das aplicações da Teoria das Variáveis Regionalizadas e acaba sendo uma das maiores fontes de ambiguidade e polêmica nessas aplicações, pois se o modelo ajustado estiver errado todos os cálculos das próximas etapas da análise também estarão (Vieira, 2000).

Com os parâmetros do semivariograma com o modelo ajustado, é possível se estimar valores para locais não amostrados através do método de krigagem. Landim (2006) define krigagem (Eq. 2) como sendo o processo de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, e/ou no tempo, a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma.

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que:

$z^*(x_0)$ – valor a ser estimado;

N – número de valores medidos, $z(x_i)$, envolvidos na estimativa; e,

λ_i – são os pesos associados a cada valor medido, $z(x_i)$.

Segundo Vieira (2000), no método da krigagem, os pesos são variáveis e dependem da variabilidade espacial expressa no semivariograma. Esse estimador nada mais é que uma média móvel ponderada, o que torna a krigagem um interpolador ótimo (sem tendência e com variância mínima), então, é a forma como os pesos são distribuídos. Esse método de interpolação vem sendo bastante aplicado em estudos de variabilidade espacial de atributos do solo.

A geoestatística vem sendo bastante aplicada em pesquisas na ciência do solo, se tornando uma ferramenta importante na verificação da correlação espacial entre os atributos do solo, possibilitando estudar o padrão da variabilidade espacial, permitindo a interpretação

dos resultados com base na estrutura dessa variabilidade, além de a poder quantificar (Cavalcante et al. 2007).

Diante disso, o uso de técnicas geoestatísticas se apresenta como ferramenta importante para o mapeamento digital de solos, auxiliando na estimativa de atributos que não foram medidos e na geração de mapas de atributos de solos, facilitando a delimitação de unidades de mapeamento de maneira mais precisa.

O interesse pelas consequências globais das mudanças climáticas devido ao efeito estufa levou os pesquisadores a estudarem o ciclo global do carbono (Bernoux et al. 2002). Os estudos relacionados ao ciclo do carbono são ainda mais importantes no Brasil e em ambientes sob vegetação nativa, pois o armazenamento de carbono depende da capacidade do ecossistema em sequestrar C.

Na literatura são encontradas algumas técnicas de mapeamento da variabilidade espacial de EC. Cerri et al. (2007) geraram mapa de estimativa de EC, usando o sistema de modelagem GEFSOC. Esse sistema de modelagem requer seis classes de dados básicos para construir o conjunto de dados necessário para uma simulação regional: vegetação nativa, histórico de manejo e uso do solo, clima, solos e latitude / longitude. Bernoux et al. (2002) geraram mapa de EC através de associações entre vegetação e solo o mapa final de EC foi gerado pela interseção de mapas de solos e de vegetação.

Chig et al. (2008) utilizaram uma abordagem diferente das citadas anteriormente, com a avaliação da dependência espacial e krigagem ordinária. Os resultados desses autores mostraram que houve dependência espacial para o atributo carbono orgânico, sendo assim, foi possível a interpolação de dados não amostrados pelo método da krigagem. Esse método se mostrou mais eficiente na estimativa desse atributo, uma vez que utiliza informações de dados medidos para a interpolação de outros não medidos, além de atribuir pesos diferentes de acordo com a distância entre vizinhos do dado a ser estimado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização

A área de estudo se localiza na província petrolífera de Urucu, numa unidade denominada Base de Operações Geólogo Pedro Moura (BOGPM), situada no município de Coari, a 650 km do sudoeste de Manaus (Petrobras, 2010). Nas Figuras 3 e 4 são apresentadas a localização da área de estudo e a distribuição dos pontos amostrados em campo.

A região é de difícil acesso e totalmente circundada por Floresta Amazônica, sendo somente acessada por via aérea e fluvial. No período entre 2008 e 2010 a Petrobras solicitou a execução do mapeamento detalhado de solos para dar subsídio aos programas de prevenção de impactos ambientais e reflorestamento. Os dados gerados no levantamento são importante fonte de informação sobre os tipos de solos, suas relações com co-variáveis ambientais (relevo, geologia e vegetação) e para pesquisas em modelagem de solos da Bacia do Solimões. Este trabalho utiliza os dados de solos levantados na BOGPM através do Projeto Erosão Hídrica em solos Amazônicos (Petrobras, 2010) e a tese de Villela (2013) para gerar, validar e comparar FPTs para estimar a densidade do solo.



Figura 3. Localização da área de estudo (município de Coari, Estado do Amazonas). (Fonte: Petrobras, 2010).

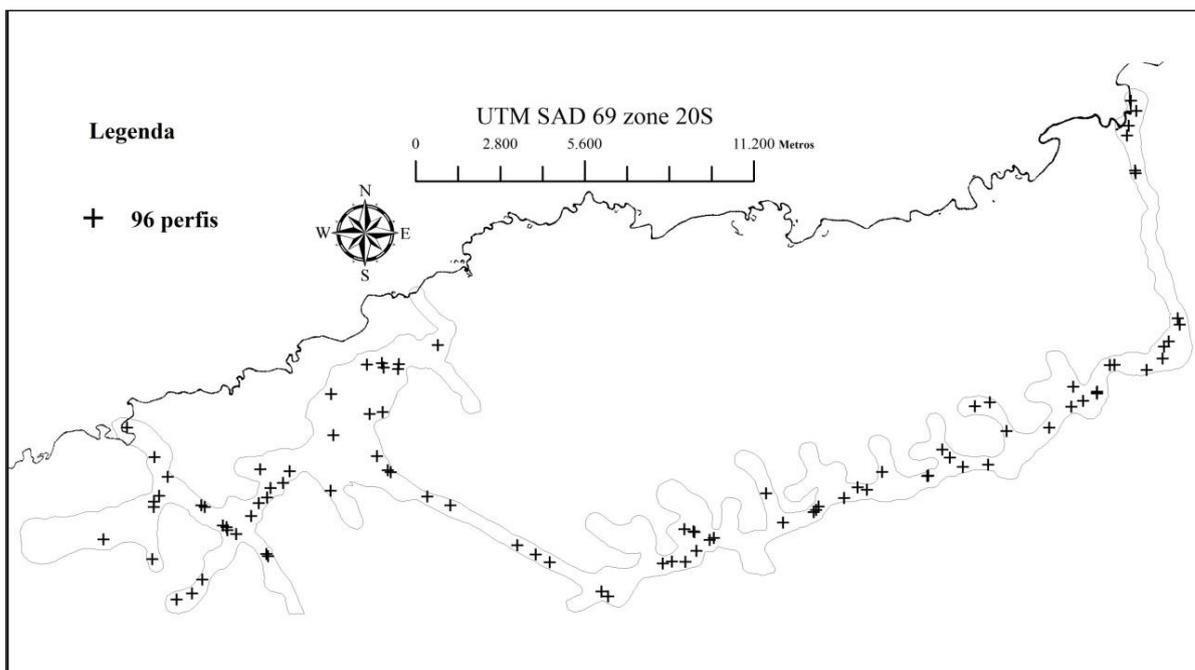


Figura 4. Distribuição dos pontos amostrados na área de estudo (Fonte: Petrobras, 2010).

3.2 Banco de Dados

O conjunto de dados foi organizado a partir de informações contidas no levantamento detalhado de solos da BOGPM (Petrobras, 2010), sendo escolhidas somente amostras que possuíam dados de densidade do solo e carbono orgânico total em todos os horizontes e camadas descritas (96 perfis – Tabela 1). O levantamento de solos em escala detalhada (1:10.000), compreendeu 7.966,5 ha, onde foram descritos 118 perfis e 197 tradagens (total de 315 observações de campo) distribuídos em nove unidades de mapeamento (UM1, UM2, UM3, UM4, UM5, UM6, UM7, UM8 e UM9), estas se encontram descritas no Anexo A. Os perfis dispunham de descrição morfológica, análises físicas e químicas dos perfis e tradagens, testes de campo referentes a resistência à penetração (113 testes em três profundidades – 0 a 60, 60 a 120 e 120 a 180 cm). Os ensaios de resistência à penetração foram feitos através do penetrômetro de impacto (modelo IAA/Planalsucar-Stolf, 1984). A densidade do solo foi determinada a partir de amostras indeformadas com anel de Kopeck (86, 35 cm³, cilindro com 2,5 cm de raio e 4,4 cm de altura) em 105 perfis.

As descrições e coletas de perfis foram feitas segundo Santos et al. (2005), as análises físicas e químicas foram realizadas de acordo com Embrapa (1997) e os solos foram classificados de acordo com Embrapa (2013).

Os perfis selecionados para esse trabalho foram: ARGISSOLO ACINZENTADO, ARGISSOLO AMARELO, ARGISSOLO VERMELHO - AMARELO, ARGISSOLO VERMELHO, CAMBISSOLO HÁPLICO, CAMBISSOLO FLÚVICO, ESPODOSSOLO FERRIHUMILÚVICO, NEOSSOLO FLÚVICO, NEOSSOLO QUARTZARÊNICO e PLANOSSOLO HÁPLICO (Tabela 1).

Na Figura 5, são apresentadas algumas imagens das principais Ordens de solos encontradas na área de estudo (Petrobras, 2010).

Tabela 1. Número e porcentagem de perfis por classes de solos selecionados para esse estudo.

Classes de solo	Nº perfis	%
CAMBISSOLO HÁPLICO	38	40
ARGISSOLO AMARELO	28	29
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	20	21
ARGISSOLO ACINZENTADO	3	3
ARGISSOLO VERMELHO	2	2
CAMBISSOLO FLÚVICO	1	1
ESPODOSSOLO FERRIHUMILÚVICO	1	1
NEOSSOLO FLÚVICO	1	1
NEOSSOLO QUARTZARÊNICO	1	1
PLANOSSOLO HÁPLICO	1	1
Total	96	100

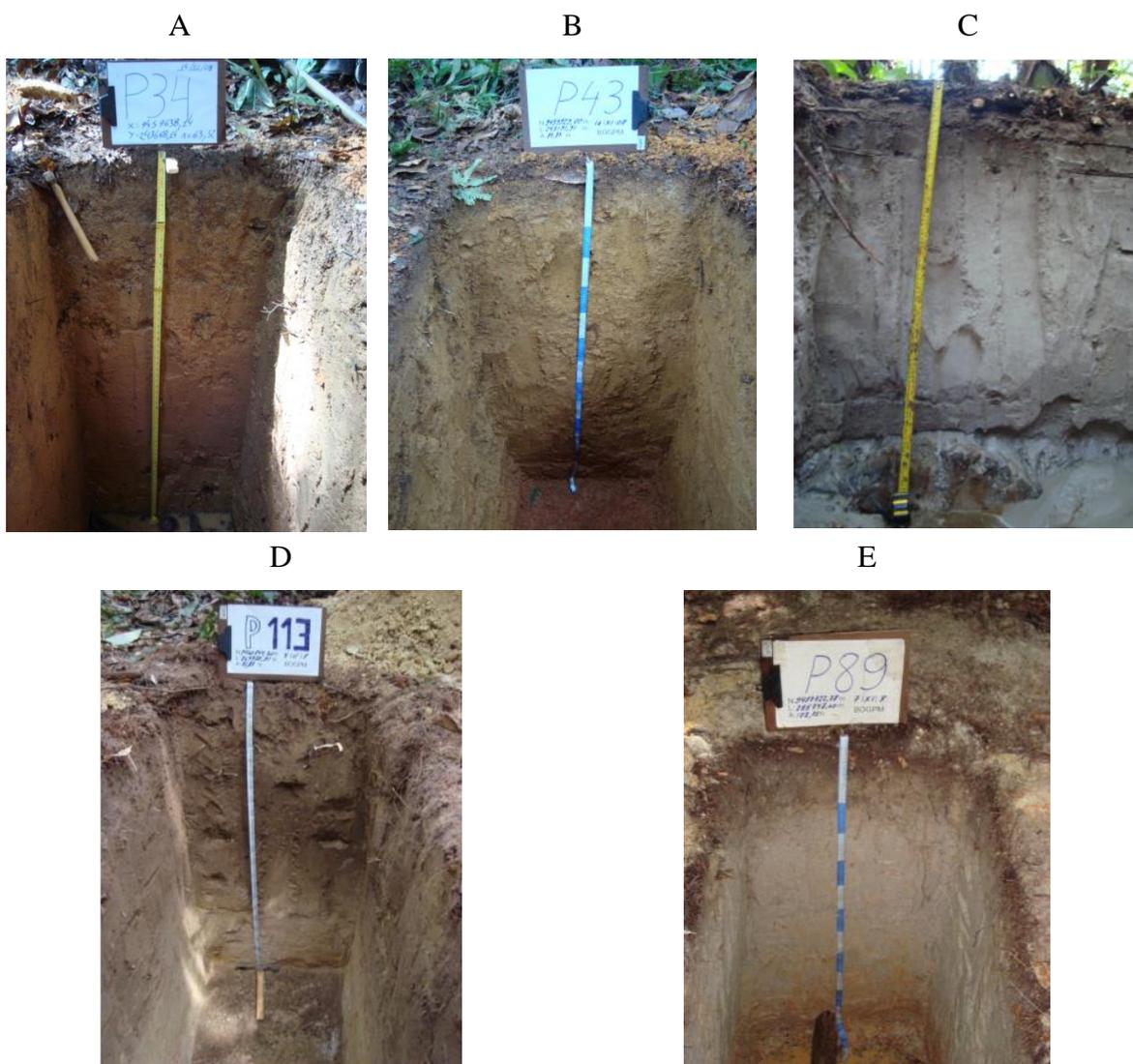


Figura 5. Perfis das principais ordens de solos selecionados para este trabalho: A - Cambissolo, B - Argissolo, C - Espodossolo, D - Neossolo e E - Planossolo.

Os atributos físicos disponíveis neste levantamento são: frações granulométricas (areia grossa, areia fina, silte e argila), argila dispersa em água, grau de floculação, relação silte/argila, densidade das partículas, porosidade total e umidade volumétrica. Os atributos químicos são: pH em água, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , soma de bases (SB), Al^{3+} , H^+ , Valor T ($\text{SB} + \text{Al}^{3+} + \text{H}^+$), saturação por bases (Valor V), saturação por alumínio, P assimilável e carbono orgânico.

3.3 Caracterização Mineralógica

São poucos os trabalhos que trazem informações sobre mineralogia dos solos, sobretudo da região de estudo. Essas informações podem permitir melhor entendimento do ambiente onde serão desenvolvidas as FPTs e também auxiliar na explicação das relações de causa e efeito entre atributos preditores do solo e a variável a ser predita (nesse caso a densidade do solo).

Como os sedimentos da Formação Solimões se estendem desde a bacia do Acre (a qual apresenta parte dos solos com argilas de atividade alta) até a foz do rio Amazonas, atravessando os Arcos de Iquitos e do Purus, se faz necessária melhor caracterização da mineralogia da argila dos solos da bacia do Solimões, para se conhecer o alcance do uso das FPTs geradas. Portanto, além das análises físicas e químicas contidas no relatório da Petrobras, foi realizada análise mineralógica da fração argila de três perfis das classes de solos representativas da área de estudo, a saber: Argissolo Vermelho - Amarelo, Argissolo Amarelo e Cambissolo Háptico.

A caracterização mineralógica da fração argila foi feita no horizonte diagnóstico subsuperficial dos perfis selecionados. Foi utilizado o difratômetro de raios-x da marca Seifert, modelo XRD-7, tubo de cobre, filtro de níquel, operado com corrente de 30 mA e diferença de potencial de 40 kV com intervalo de varredura de 2° a 45° (2 θ). As lâminas foram preparadas de forma orientada pelo método do esfregaço. As análises foram realizadas em condições naturais e sob tratamento diferentes tratamentos: desferrificação por DCB (Mehra & Jackson 1960); saturação com K e aquecimento, em forno mufla por duas horas, nas seguintes temperaturas: 25, 350 e 550°C; saturação com Mg e solvatação com etileno glicol (Embrapa, 1997).

3.4 Desenvolvimento das FPTs

3.4.1 Seleção dos perfis

Para o desenvolvimento das FPTs foram selecionados 96 perfis de solo que dispunham de dados de densidade do solo, carbono orgânico total e coordenadas geográficas (coordenadas UTM – Datum horizontal WGS84) para estudo de variabilidade espacial, bem como descrição morfológica, análises físicas e químicas. Os 96 perfis compreendiam 522 horizontes e camadas, dos quais, 418 (80% - conjunto de dados de treinamento) foram utilizados para o desenvolvimento dos modelos e 104 (20% - conjunto de dados de validação) foram sorteados, de forma aleatória, para posterior validação das equações geradas. Na literatura, são apresentadas várias combinações entre conjunto de dados de treinamento (T) e validação (V); portanto, para definir a melhor combinação entre esses conjuntos de dados foram testadas as seguintes combinações: 60% (T) – 40% (V), 75% (T) – 25% (V), 80% (T) – 20% (V) e 90% (T) – 10% (V). Os gráficos e tabelas com índices de validação dos modelos encontram-se em anexo (Anexo B).

3.4.2 Análise de dados

Estatísticas descritivas do conjunto de dados foram realizadas para avaliar a existência de dados anômalos (*outliers*), normalidade, bem como, a possível necessidade de divisão do conjunto de dados para aumentar a acurácia da função. Um exemplo que se avaliou foi se seria mais adequado gerar FPTs para horizontes superficiais (horizontes A e AB) e para subsuperficiais (horizontes BA, Bt, Bi, Bhs entre outros).

Para se aplicar a análise multivariada (regressão linear múltipla) é necessário que os dados apresentem distribuição normal (Vereecken & Herbst, 2004). A normalidade dos dados pode ser observada pela análise do coeficiente de assimetria e curtose, onde os valores mais próximos de zero para a assimetria e menores que 3 para a curtose tendem a distribuição normal (Carvalho et al., 2002).

Além desses coeficientes, foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov, o qual é mais recomendado para banco de dados que incluem mais de 50 observações (Vereecken & Herbst, 2004).

Para os dados que não apresentaram distribuição normal foi usada a transformação Box-Cox (Box & Cox, 1964). Esse é um método simples, que encontra a melhor transformação a ser usada em um conjunto de dados para obter a normalidade (ou normalidade aproximada). Para valores não negativos da variável x a transformação Box-Cox é definida como:

$$x_T = x^\beta - 1/\beta \quad \text{para } \beta \neq 0 \quad \text{Eq. 3}$$

$$x_T = \ln x \quad \text{para } \beta = 0 \quad \text{Eq. 4}$$

Em que:

x_T = valor transformado de x

β = parâmetro de transformação

Quando β for igual a:

1 \rightarrow não há transformação (os dados são normais)

0,5 $\rightarrow x_T = \sqrt{x}$

-1 $\rightarrow x_T = 1/x$

Para obtenção dos valores verdadeiros das variáveis transformadas é feito o caminho inverso da transformação Box-Cox (Eq. 5). A retransformação é indispensável quando a variável dependente (predita) precisa ser transformada, pois na etapa de validação os valores estimados precisam ser comparados aos valores medidos.

$$x = (1 + \beta x_T)^{1/\beta} \quad \text{para } \beta \neq 0 \quad \text{Eq. 5}$$

$$x = \exp(x_T) \quad \text{para } \beta = 0 \quad \text{Eq. 6}$$

O procedimento estatístico *stepwise* foi utilizado para seleção de variáveis preditoras e as FPTs foram geradas a partir de modelos de regressão linear múltipla, utilizando o programa ACTION (versão 2.4).

3.4.3 Índices de avaliação dos modelos

Índices de avaliação de desempenho de modelos de regressão foram aplicados, a fim de comparar o potencial preditivo dos modelos gerados com os existentes na literatura (Bernoux et al., 1998; Tomasella & Hodnett, 1998; Benites et al., 2007). Foi analisado

graficamente a relação 1:1 dos valores estimados vs valores medidos e aplicado indicadores estatísticos como o coeficiente de determinação (R^2), o erro médio de predição (MPE), a Raiz do Quadrado médio do erro de predição (RMSPE) (Benites et al., 2007; Michelon et al., 2010) e erro médio absoluto (MAE):

$$\text{MPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) \quad \text{Eq. 7}$$

$$\text{RMSPE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad \text{Eq. 8}$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad \text{Eq. 9}$$

Em que:

y_i = densidade do solo medida da i -ésima amostra de solo;
 \hat{y}_i = densidade do solo estimada para a i -ésima amostra de solo;
 n = número total de observações.

O MPE é um indicador da exatidão da estimativa, revelando a tendência da FPT de superestimar os valores (quando positivo) ou de subestimar (quando negativo). Quanto mais próximo de zero for o MPE, maior será a acurácia do modelo. O MAE também é indicador de exatidão, mas não revela tendência de superestimação ou subestimação, pois utiliza o valor absoluto (em módulo) das diferenças entre os valores estimados e medidos. A RMSPE quantifica a dispersão dos valores medidos e estimados em torno da linha 1:1. Quando o valor de RMSPE é igual a zero, indica que houve ajuste perfeito entre os dados estimados e medidos (Barboza, 2011).

3.4.4 Modelos na literatura para a região Amazônica

As FPTs geradas foram comparadas as funções existentes na literatura para a região Amazônica (Tabela 2). Os primeiros trabalhos com modelos para estimar densidade do solo na região Amazônica foram desenvolvidos por Bernoux et al. e Tomasella & Hodnett, em 1998. Em 2007, Benites et al. propuseram um modelo de regressão para estimar densidade de solos do Brasil, incluindo dados da maior parte dos biomas brasileiros.

Tabela 2. Modelos de estimativa da densidade do solo.

Modelo de regressão	Número de observações	Equações
Bernoux et al. (1998)	323	$D_s = 1,524 - 0,0038 (\% \text{ argila}) - 0,050 (\% \text{ COT}) - 0,0045 (\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}) + 0,001 (\% \text{ areia})$
Tomasella & Hodnett (1998)	613	$D_s = 1,578 - 0,054 (\% \text{ COT}) - 0,006 (\% \text{ silte}) - 0,004 (\% \text{ argila})$
Benites et al. (2007)	363	$D_s = 1,560 - 0,0005 (\text{g.kg}^{-1} \text{ argila}) - 0,010 (\text{g.kg}^{-1} \text{ COT}) + 0,0075 (\text{SB})$

D_s – densidade do solo; COT – carbono orgânico total; SB – soma de bases.
 Fonte: adaptado de Benites et al. (2007).

3.5 Mapas de Variabilidade Espacial de Estoque de Carbono e Análises Espaciais

Para o cálculo de EC, é necessário o conhecimento dos atributos densidade do solo e carbono orgânico. A determinação do EC foi feita seguindo o procedimento clássico, massa de C por área, para uma dada profundidade, através da soma do estoque de C dos sucessivos horizontes num respectivo perfil (Bernoux et al., 2002). Assim, foi calculado o EC até 1 m utilizando 96 dados de densidade do solo medidos em campo e carbono orgânico, além de valores de densidade do solo estimados pelas FPTs geradas e as existentes na literatura (Bernoux et al, 1998; Tomasella & Hodnet, 1998 e Benites et al, 2007), sendo os valores de carbono orgânico obtidos através de análise de amostras de terra coletadas em campo.

Foram calculados os semivariogramas experimentais para avaliação de dependência espacial e ajustado o modelo teórico que melhor representasse a variabilidade dos dados. O modelo ajustado foi validado através da ferramenta *Jack-knife* (autovalidação ou validação cruzada) e, após, foram estimados valores de EC em locais não amostrados pelo método de krigagem ordinária. Esses procedimentos foram realizados através do programa Geostat (Vieira, 1983). Os mapas de variabilidade espacial e de variância de krigagem foram feitos utilizando-se o software ArcGis 9.3 (ESRI, 2006), as planilhas com os valores de EC medidos e estimados foram exportadas para o programa e os arquivos foram convertidos para o formato Raster.

Ainda, para comparar os mapas gerados a partir de diferentes dados de densidade do solo, foi feita a análise espacial através de álgebra de mapas (Função *Raster Calculator* do ArcGis). Tendo como referência o mapa de variabilidade espacial de estoque de carbono gerado a partir dos dados medidos (96 valores medidos nos perfis), foi quantificado o quanto cada FPT usada para estimar a densidade do solo super- ou sub- estimou os valores de estoque de carbono. O procedimento permitiu assim saber os desvios de estoque de carbono até a profundidade de um (1) metro; que foi gerado em cada modelo gerou subtraindo-se, pixel a pixel, o mapa de EC medido dos mapas estimados pelas diferentes FPTs. Para esse estudo cada pixel apresenta uma área de um (1) hectare (resolução de 100 por 100 metros).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Mineralogia da Fração Argila dos Solos da Área de Estudo

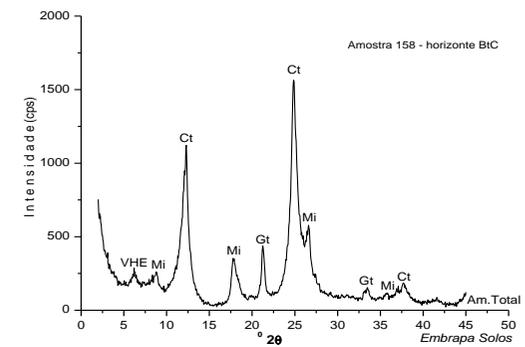
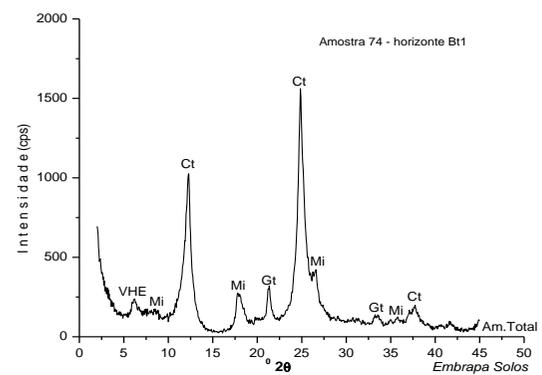
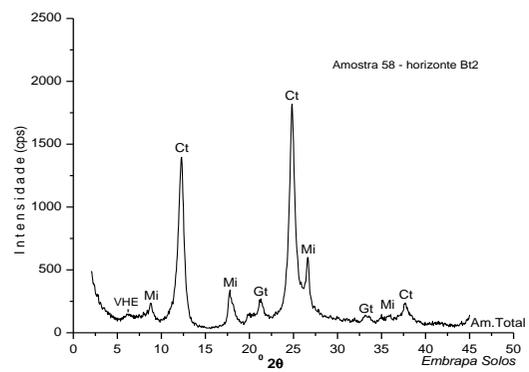
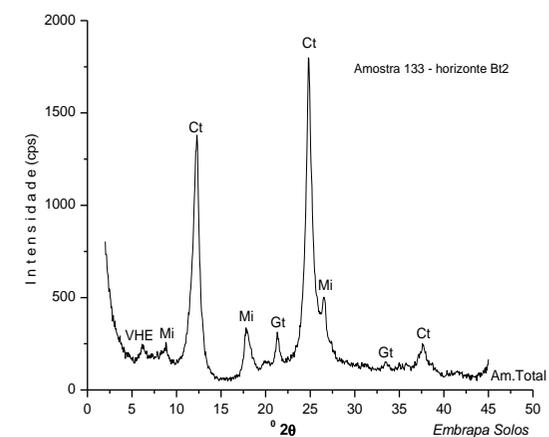
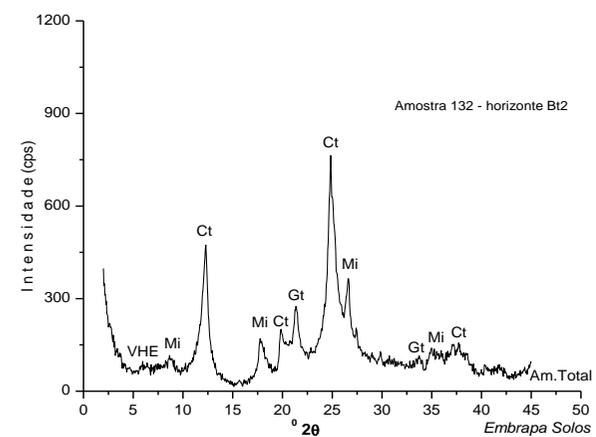
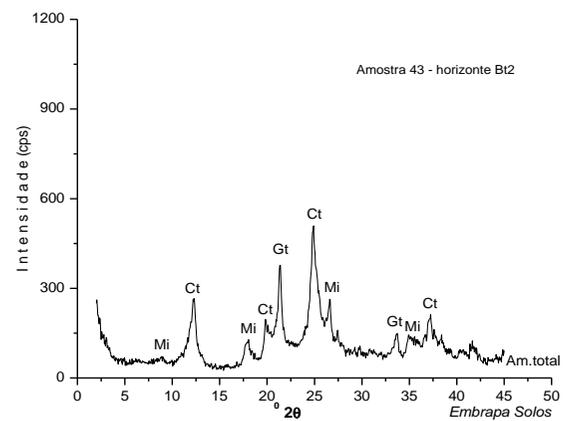
Os difratogramas de raios-X dos perfis das principais classes de solos da área de estudo estão apresentados na Figura 6. As classes de solo analisadas apresentaram mineralogia da fração argila semelhante, apresentando em sua constituição os minerais caulinita, ilita, goethita e vermiculita com hidróxi-Al entrecamadas.

A presença de caulinita e goethita nos perfis estudados está associada à pobreza do material de origem (granitos, gnaisses e seus sedimentos derivados do período terciário e quaternários) (Brasil, 1978). O predomínio de caulinita em solos da Amazônia se deve a intensa reciclagem de silício pela vegetação florestal, favorecendo a estabilidade da caulinita, mesmo em ambiente altamente intemperizado (Lucas et al., 1993; Marques et al., 2010). Além disso, de acordo com Resende et al., (2011) em condições de clima úmido a lixiviação da sílica é mais ou menos compensada pela erosão natural (rejuvenescimento da paisagem), expondo assim material novo o que não permite que o estágio gibbsítico seja alcançado.

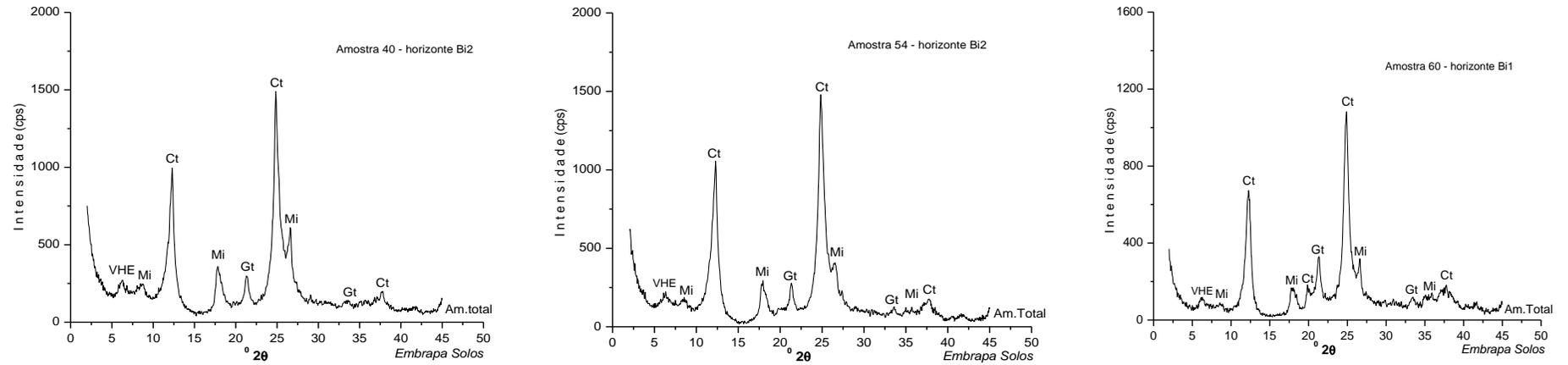
Já a presença de argilominerais do tipo 2:1, como a ilita pode ser explicada pela recente exposição de sedimentos de origem diferenciada ao intemperismo. Horbe et al. (2007) pesquisando sobre a mineralogia de solos sobre sedimentos neógenos e quaternários da bacia do Solimões na região de Coari-AM, observaram que os perfis desenvolvidos sobre a Formação Solimões apresentaram evolução pouco acentuada em relação aos perfis lateríticos localizados a leste da região, bem como desequilíbrio em relação ao clima atual quente e chuvoso da região de Coari.

A vermiculita com hidróxi-Al entrecamadas pode ter sido formada devido as condições de elevada acidez (os perfis apresentaram valores de pH menores que 5,5) e o alto teor de alumínio desses solos, com isso ocorreu deposição desses polímeros nas entrecamadas das vermiculitas. Os elevados teores de alumínio trocável observados em todos os perfis resultam da desestabilização de esmectitas, onde com a liberação do alumínio houve a deposição nas entrecamadas das vermiculitas (Volkoff et al., 1989; Bernini et al., 2013). Segundo Azevedo et al. (2012) a deposição destes polímeros entre as camadas das vermiculitas aumenta de forma expressiva a estabilidade destes minerais em relação ao intemperismo, justificando assim a presença desses argilominerais em solos tropicais intemperizados.

Em relação à mineralogia da fração argila, os perfis analisados são semelhantes, sendo assim, esse tema, importante para caracterização detalhada de uma dada área de estudo, não foi um critério imprescindível para estratificar as relações entre variáveis preditoras. Por outro lado, diante desses resultados de mineralogia, não é recomendada a extrapolação das FPTs geradas para todos os solos originados da Formação Solimões. Uma vez que está recobre grande parte da bacia do Acre, que apresenta solos com mineralogia da fração argila com predomínio de esmectitas e ilitas (Volkoff et al., 1989; Bernini et al, 2013).

A**B**

C



Ct - caulinita; Mi - mica/illita; Gt - goethita; VHE - vermiculita com hidróxi-Al entrecamada.

Figura 6. Mineralogia da fração argila dos horizontes diagnósticos subsuperficiais (Bt, Bi) dos perfis representantes das principais classes de solos da área em estudo (A – Perfis de Argissolo Vermelho-Amarelo; B – Perfis de Argissolo Amarelo e C – Perfis de Cambissolo Háplico).

4.2 Estatística Descritiva do Banco de Dados

A estatística descritiva das variáveis do conjunto de dados utilizado na geração das FPTs e a matriz de correlação entre os atributos do solo estão apresentadas nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. Na Tabela 3 são apresentadas as estatísticas: média, valor mínimo, valor máximo, desvio padrão, coeficiente de variação e coeficiente de assimetria e curtose, tanto para o conjunto total de dados como para os utilizados para treinamento do modelo de regressão linear múltipla (80% dos dados) e para validação (20% dos dados).

Tabela 3. Estatística descritiva das variáveis do conjunto de dados utilizadas para geração da FPT.

Variável	Dados	Média	Mín.	Max.	DP	CV	Ass.	Curt.	k-S	β
Ds(kg.dm ⁻³)	Comp	1,25	0,42	1,77	0,23	18	-0,73	0,45	0,014	2,2
	Trein	1,24	0,42	1,77	0,23	18	-0,73	0,46		
	Val	1,25	0,62	1,67	0,20	16	-0,69	0,07		
AT(g.kg ⁻¹)	Comp	396	22	918	177,21	45	0,57	0,05	0,002	0,4
	Trein	394	65	918	180,46	46	0,69	0,18		
	Val	404	22	753	163,44	41	-0,11	-0,55		
Silte(g.kg ⁻¹)	Comp	343	26	731	126,45	37	0,17	0,11	0,15	-
	Trein	349	26	731	128,41	37	0,12	0,15		
	Val	318	55	633	114,86	36	0,30	0,09		
Argila(g.kg ⁻¹)	Comp	261	10	640	132,96	51	0,24	0,65	0,012	0,7
	Trein	256	10	640	134,50	52	0,20	0,78		
	Val	278	31	609	125,24	45	0,50	0,13		
pH _{H2O} (adm)	Comp	4,57	3,20	6,50	0,43	9	0,05	0,75	0,009	0,9
	Trein	4,58	3,20	6,50	0,44	10	0,04	0,77		
	Val	4,49	3,60	5,30	0,35	8	-0,29	0,63		
SB(cmolc.dm ⁻³)	Comp	1,72	0,30	4,53	0,91	53	0,69	0,45	0,028	0
	Trein	1,74	0,30	4,53	0,92	53	0,67	0,46		
	Val	1,61	0,50	4,00	0,86	54	0,74	0,48		
Al ³⁺ (cmolc.dm ⁻³)	Comp	4,00	0,25	12,00	1,89	47	0,44	0,18	0,001	0,7
	Trein	4,00	0,25	12,00	1,92	48	0,34	0,08		
	Val	3,97	1,00	9,00	1,76	45	0,95	0,72		
H ⁺ (cmolc.dm ⁻³)	Comp	4,03	0,00	46,70	4,58	114	3,61	20,97	0,001	0
	Trein	4,15	0,00	46,70	4,80	116	3,63	20,76		
	Val	3,56	0,40	21,70	3,52	99	2,60	8,65		
P(mg.dm ⁻³)	Comp	1,47	0,00	13,00	1,71	117	2,33	8,44	0,001	-2,5
	Trein	1,51	0,00	13,00	1,77	117	2,31	8,19		
	Val	1,29	0,00	9,00	1,41	109	2,16	7,64		
CO(g.kg ⁻¹)	Comp	7,76	0,10	60,30	6,64	86	2,58	10,69	0,002	0
	Trein	7,90	0,10	60,30	7,01	89	2,60	10,36		
	Val	7,22	0,10	21,80	4,82	67	1,24	1,14		

Comp = conjunto de dados completos; Trein = dados utilizados para geração dos modelos de regressão; Val = dados retirados para validação dos modelos; Mín = mínimo; Max. = máximo; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação (%); Ass = assimetria; Curt. = curtose; Ds = densidade do solo; AT = areia total; SB = soma de bases; P = fósforo assimilável; CO = carbono orgânico total; k-S = teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (para $\alpha = 5\%$); β = parâmetro de transformação para dados que não apresentam distribuição normal.

Considerando as estatísticas do conjunto total de dados, se visualiza um panorama dos atributos dos solos da área de estudo. Os solos apresentam predomínio das frações areia e silte em relação à argila, com classes texturais que variam de areia a franco - siltosa. Além disso, sob o aspecto químico os solos apresentam elevada acidez e toxidez por alumínio e baixa soma de bases (valor médio de pH 4,57; H⁺ de 4,03; e Al³⁺ de 4,00 cmolc kg⁻¹ de solo).

Ainda através da Tabela 3, se verificou que as médias dos dados sorteados para treinamento e validação das FPTs são estatisticamente iguais ao do conjunto total de dados obtidos na área de estudo (teste T com 5% de significância) (Anexo C).

Dentre os atributos dos solos, os valores de H^+ , P e CO apresentaram maior desvio de assimetria e curtose em relação à referência de distribuição normal (assimetria 0 e curtose 3). Considerando o resultado do teste de Kolmogorov - Smirnov, apenas a variável silte apresentou distribuição normal, enquanto que as demais precisaram ser transformadas. Na Tabela 3 são apresentados os valores dos parâmetros β de transformação, após aplicação do teste de Box Cox, o qual foi aplicado antes de iniciar a construção das FPTs.

Na Tabela 4 são mostrados os dados de correlação entre os atributos físicos e químicos do solo. A densidade do solo apresenta correlação significativa com os atributos areia total, argila, pH, soma de bases (SB), H^+ , fósforo e carbono orgânico total. As maiores correlações são observadas com os atributos CO, H^+ e SB, respectivamente. Nos três casos, a correlação é negativa, ou seja, quanto maior os teores de carbono, H^+ e SB, menores os valores de densidade do solo. Uma possível explicação para esse padrão de correlação é que maiores teores de carbono orgânico induzem a menor relação massa do solo seco por volume total de solos. As concentrações de H^+ e SB estão relacionadas a formação de agregados, onde os cátions floculantes aproximam as partículas permitindo boa agregação e, conseqüentemente, maior porosidade total, o que implica em redução dos valores de densidade do solo. Esses resultados são importantes no entendimento das variáveis preditoras e acurácia das FPTs geradas e que são apresentadas no item seguinte.

Tabela 4. Matriz de correlação entre os atributos do solo utilizados para a geração das FPTs.

Atributos	Ds	AT	Silte	Argila	pH _{H2O}	Valor S	Al ³⁺	H ⁺	P	CO
Ds	1,000									
AT	-0,278	1,000								
Silte	0,002	-0,631	1,000							
Argila	0,362	-0,663	-0,131	1,000						
pH _{H2O}	0,474	-0,226	-0,014	0,285	1,000					
SB	-0,489	0,270	0,034	-0,380	-0,429	1,000				
Al ³⁺	0,094	-0,524	-0,015	0,673	0,026	-0,246	1,000			
H ⁺	-0,645	0,164	0,090	-0,302	-0,371	0,357	-0,157	1,000		
P	-0,301	0,290	-0,074	-0,307	-0,202	0,189	-0,252	0,315	1,000	
CO	-0,735	0,234	0,073	-0,361	-0,448	0,531	-0,090	0,566	0,340	1,000

Os valores de correlação de Pearson em negrito, são significativos (Alfa = 0,05); matriz de correlação aplicada aos dados transformados.

4.3 FPTs Geradas

Através da aplicação do procedimento estatístico *stepwise*, foram construídos três modelos de predição de Ds (FPTs), aqui denominadas de modelo gerado 1 (MG1), modelo gerado 2 (MG2) e modelo gerado 3 (MG3). A diferença entre as três FPTs é o número de variáveis e o processo de escolha das variáveis preditoras. Inicialmente, foi gerada a FPT MG1, que resultou do processo simples de escolha de variáveis preditoras através do procedimento *stepwise*. Nesse caso, foram aceitas todas as variáveis selecionadas pelo procedimento estatístico. As variáveis incluídas na função foram: carbono orgânico, hidrogênio, SB (soma de bases), pH em água, areia total, alumínio trocável e argila. A equação com as variáveis e respectivos regressores é apresentada a seguir (Equação - 10):

$$Ds = 0,637 - 0,141(\ln CO) - 0,086 (\ln H^+) - 0,042 (\ln SB) + 0,036 (pH^{0,9}-1/0,9) - 0,005 (AT^{0,4}-1/0,4) - 0,03 (Al^{0,7}-1/0,7) + 0,001 (argila^{0,7}-1/0,7) \quad \text{Eq. 10}$$

Pode se observar que no MG1 foram selecionadas variáveis que indicam um mesmo processo, porém de forma inversa, pH, hidrogênio e alumínio e apresentam correlação significativa (Tabela 4). Com o intuito de evitar a multicolinearidade, que ocorre quando duas ou mais variáveis independentes apresentam correlação, se optou pela retirada dessas variáveis da análise, uma por vez, de forma manual, para avaliar a sal importância na predição do modelo.

Assim, o segundo modelo (MG2) foi gerado com as mesmas variáveis do MG1, retirando-se apenas o pH. As variáveis incluídas nesse modelo foram: carbono orgânico, hidrogênio, SB (soma de bases), areia total, alumínio e argila (Equação 11):

$$Ds = 0,701 - 0,144 (\ln CO) - 0,089 (\ln H^+) - 0,046 (\ln SB) - 0,005 (AT^{0,4}-1/0,4) - 0,033 (Al^{0,7}-1/0,7) + 0,001 (argila^{0,7}-1/0,7) \quad \text{Eq. 11}$$

O terceiro modelo (MG3) foi gerado retirando apenas o hidrogênio, adicionando novamente o pH e mantendo as demais variáveis. As variáveis incluídas nesse modelo foram: carbono orgânico, pH em água e SB (soma de bases), de acordo com a Equação 12:

$$Ds = 0,365 - 0,207 (\ln CO) + 0,099 (pH^{0,9}-1/0,9) - 0,053 (\ln SB) \quad \text{Eq. 12}$$

Dentre as variáveis preditoras selecionadas no desenvolvimento das FPTs, as que estão diretamente relacionadas à densidade do solo (Ds) são o carbono orgânico (matéria orgânica) e a textura do solo. A matéria orgânica influencia várias características do solo, principalmente as relacionadas à formação de agregados e a conferência de cargas negativas, aumentando a capacidade de troca de cátions do solo. Em relação à formação de agregados, a matéria orgânica atua como agente cimentante, unindo e estabilizando as partículas tanto unitárias quanto secundárias do solo (Batista et al., 2013).

Portanto, a maior agregação indica boa estrutura do solo e com isso, baixos valores de densidade, sendo assim, há uma relação inversa entre os valores de densidade do solo e de carbono orgânico. Os cátions trocáveis também influenciam na agregação, os flocculantes de forma positiva (Al, H, Ca, Mg) e os dispersantes de forma negativa (Li, Na em pequenas concentrações) (Vieira et al., 2011). Sendo assim, as relações entre a variável predita, densidade do solo, carbono orgânico, SB (cátions trocáveis), alumínio e hidrogênio, ocorrem de forma inversa, quanto maior o valor dessas variáveis menor é a densidade do solo e vice-versa.

Em relação à textura, os solos arenosos apresentam maiores valores de densidade do solo em relação aos argilosos, enquanto que solos siltosos apresentam densidade intermediária (Libardi, 2005). Solos argilosos apresentam, em geral, maior agregação das partículas de argila, da qual resulta a porosidade intra - agregados, que aumenta o espaço poroso, principalmente aqueles poros com diâmetro reduzido (Brady & Weil, 2008).

As frações areia e argila foram selecionadas como preditoras nos modelos MG1 e MG2. No entanto, houve correlação negativa entre areia e densidade do solo (se relacionam de forma inversa) e correlação positiva entre argila e densidade do solo (se relacionam de forma direta) (Tabela 4). Esse resultado pode ser visto como atípico, para condições de solos tropicais, em relação às frações granulométricas do solo, pois os mesmos apresentam teores elevados de silte e areia, porém com predomínio de areia fina, em relação à argila.

4.4 Comparação do Desempenho das FPTs Geradas com as Apresentadas na Literatura

A comparação do desempenho das FPTs geradas foi feita aplicando os diversos modelos para prever a densidade do solo de um mesmo conjunto de dados (20% selecionados para validação). Como a variável dependente (Ds) também precisou ser transformada, o valor predito da mesma foi retransformado para comparar os valores preditos e estimados através da equação 5, utilizando o valor de β (Tabela 3).

Os gráficos de dispersão entre os valores medidos e estimados de Ds e os índices de avaliação para todos os modelos são apresentados nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

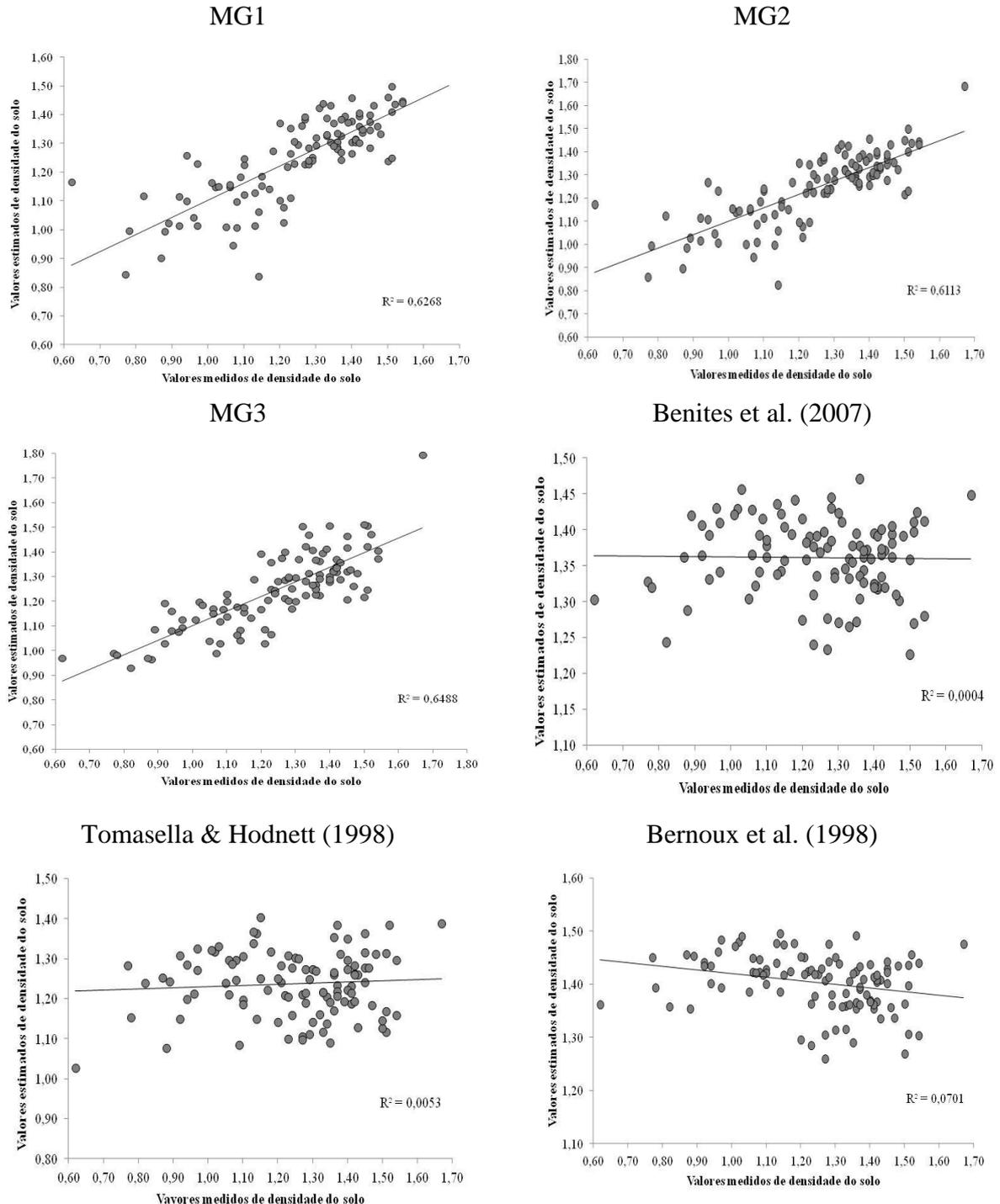


Figura 7. Valores medidos vs valores estimados de densidade do solo (kg.dm⁻³).

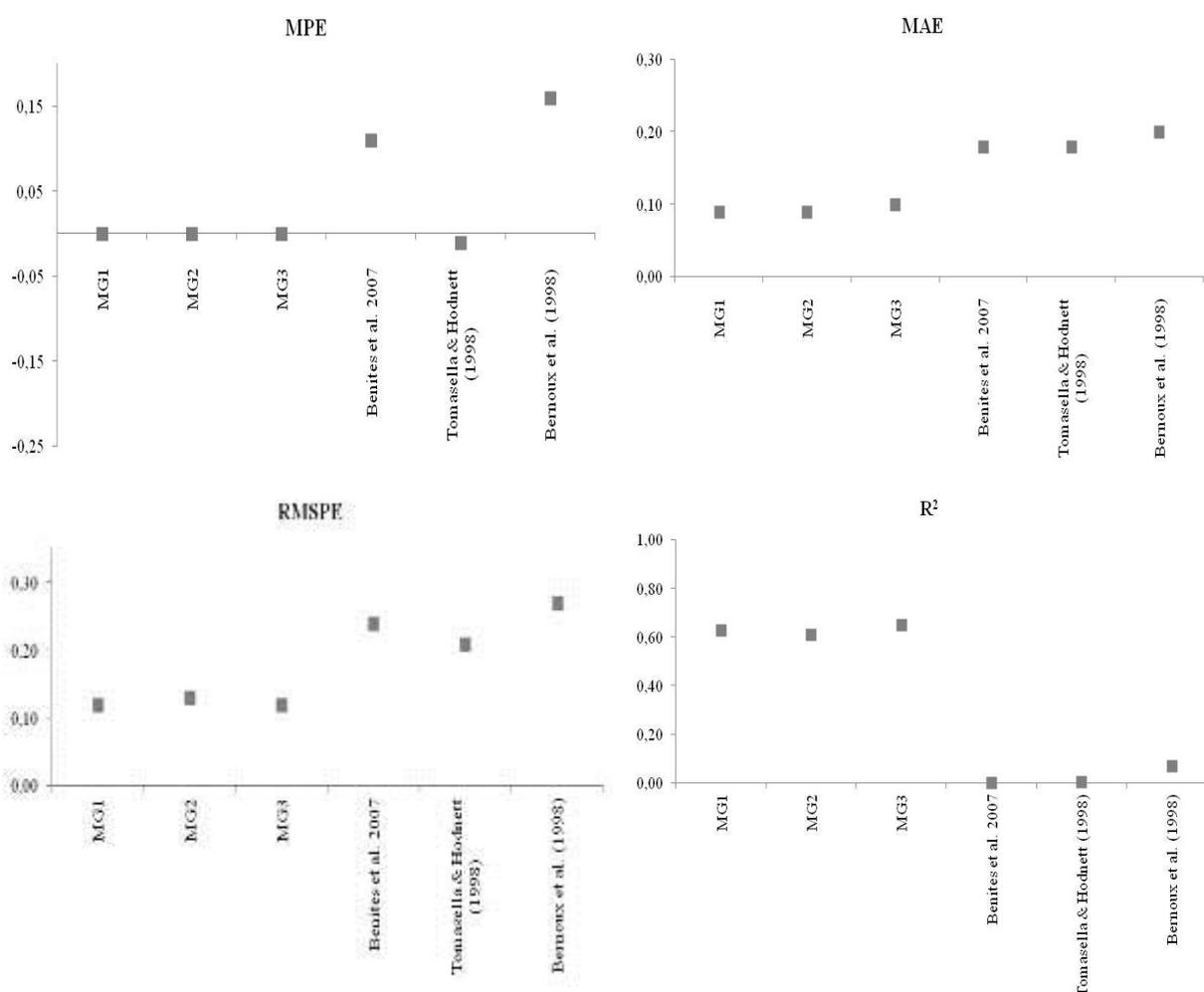


Figura 8. Índices de avaliação dos modelos gerados e os da literatura para região Amazônica.

Para se analisar as FPTs, de forma comparativa, deve - se aplicar índices de avaliação que permitam inferir sobre aspectos gerais da predição. Os índices aplicados neste trabalho foram MPE, MAE, RMSPE, R², além da avaliação dos gráficos de dispersão. A FPT de melhor desempenho será aquela que apresentar valores de MPE, MAE, RMSPE mais próximos de 0 e o valor de R² mais próximo de 1.

Os gráficos de dispersão mostram que todos os modelos tendem a superestimar mais os valores de densidade do solo do que subestimar; no entanto os modelos gerados MG1, MG2 e MG3 e o de Tomasella & Hodnett (1998) tendem a superestimar menos do que os de Bernoux et al. (1998) e Benites et al. (2007). Os modelos MG1 MG2 e MG3 apresentaram valor de MPE igual a zero, ou seja, valor ideal; já o modelo proposto por Tomasella & Hodnett (1998) tem valor -0,01 kg dm⁻³, indicando que esse modelo tende a subestimar mais do que superestimar os valores de densidade. Os demais modelos apresentaram valores positivos e maiores que zero, portanto superestimam mais do que subestimam os valores preditos. Os valores de MAE variaram entre 0,09 e 0,20 kg dm⁻³, sendo o maior valor o obtido para o modelo de Bernoux et al. (1998), seguido pelos de Tomasella & Hodnett (1998) e Benites et al. (2007); enquanto os menores valores foram obtidos para o MG1, MG2 e MG3.

Quando se compara modelos que subestimam mais e modelos que superestimam mais os valores da variável dependente, o índice MAE é o mais indicado para a avaliação da precisão da estimativa, pois utiliza os valores absolutos e são obtidos erros absolutos. Quanto à dispersão dos dados, o modelo que apresentou o maior valor de RMSPE foi o de Bernoux et

al. (1998), sendo os menores valores observados para os modelos MG1, MG2 e MG3. Os melhores valores de R^2 encontrados foram no MG1 (0,63), MG2 (0,61) e MG3 (0,65); enquanto o valor mais baixo foi o do modelo proposto por Benites et al. (2007).

Num balanço geral, o MG3 se mostrou como o modelo de melhor desempenho, pois apresentou melhores índices de avaliação em comparação aos modelos de Benites et al. (2007), Tomasella & Hodnett (1998) e Bernoux et al. (1998) e está bem próximo ao MG1 e MG2, além de apresentar maior valor de R^2 e menor número de variáveis preditoras, o que torna o modelo mais simples de ser aplicado pelo usuário.

4.5 Análise Geoestatística

Como a densidade do solo é um atributo necessário para o cálculo de estoque de carbono (EC), foi avaliado o impacto que diferentes FPTs poderiam causar na geração final de mapas de variabilidade espacial de estoque de carbono. Como base de comparação, se utilizou o mapa de variabilidade espacial de EC gerado a partir dos 96 dados contendo o valor medido de Ds e carbono orgânico total. Assim, nessa etapa, foram comparados o mapa e os parâmetros dos semivariogramas gerados a partir dos dados medidos, com os respectivos mapas e parâmetros dos semivariogramas obtidos utilizando as 6 FPTs para estimar a Ds (MG1, MG2, MG3, Bernoux et al. 1998, Tomassella & Hodnett, 1998 e Benites et al., 2007).

Para aplicar técnicas de geoestatística a dependência espacial entre as observações deve ser comprovada. Para tal, deve ser calculado o semivariograma e ajustado o modelo teórico que melhor represente a variabilidade dos dados. Os parâmetros e os semivariogramas são apresentados na Tabela 5 e na Figura 9, respectivamente. Pode se observar que foi possível o ajuste do mesmo modelo teórico, modelo esférico, a todos os semivariogramas, que diferiram entre si nos parâmetros efeito pepita (C_0), variância estrutural (C_1) e no alcance (a).

O efeito pepita (C_0) revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras, ou seja, mede o grau de aleatoriedade do modelo; a contribuição (C_1) é a parte estrutural da variância; o patamar é aproximadamente a variância total dos dados; e o alcance (a) indica a distância de dependência espacial. O melhor modelo é aquele com menor C_0 , maior C_1 e alcance. O semivariograma referência é o calculado a partir de dados medidos em campo, pois este representa as condições naturais de variabilidade do atributo EC. Em geral, se observou que os parâmetros do semivariograma de EC MG3 foram os que ficaram mais próximos ao semivariograma de EC medido. O semivariograma com maior valor de efeito pepita foi o de EC Bernoux et al. (1998), sendo o de menor valor o EC MG3 (3,09 e 2,20, respectivamente). Isso implica que o EC apresenta variabilidade inicial maior quando se utiliza o modelo de Bernoux et al. (1998) na estimativa da Ds. O semivariograma com maior alcance foi o de EC medido seguido por EC Tomasella & Hodnett (1998); já o de menor alcance foi o de Benites et al. (2007); os valores de alcance foram de 3981, 2775 e 2180, respectivamente.

Tabela 5. Parâmetros dos semivariogramas experimentais.

Modelos	C₀	C1	Patamar	a
Medido	2,87	1,87	4,74	3981
MG1	2,33	2,02	4,35	2579
MG2	2,27	2,08	4,35	2463
MG3	2,20	1,87	4,07	2711
Benites et al. (2007)	2,38	3,01	5,39	2180
Tomasella & Hodnett (1998)	2,32	2,41	4,73	2775
Bernoux et al. (1998)	3,09	2,98	6,07	2400

C₀ = Efeito pepita; C1 = contribuição; a = alcance

Os mapas de krigagem e variância de krigagem são apresentados nas Figuras 10 e 11, respectivamente. O mapa de EC gerado com dados obtidos através da análise de amostras de terra coletadas em campo (EC medido) apresentou valores entre 4,89 e 9,93 kg C m⁻²; esses valores estão bem próximos aos encontrados na literatura para a região Amazônica.

Batjes & Dijkshoorn (1999) avaliando estoque de carbono e nitrogênio para solos da região Amazônica encontraram valores médios de estoque de carbono de 9,8 kg C m⁻² para solos minerais. Bernoux et al. (2002) estimaram o estoque de C até 0,3 m de profundidade, em perfis com cobertura de vegetação nativa de todo o território nacional, e encontraram valores de estoque de carbono para a região amazônica entre 4,50 e 7,00 kg C m⁻².

Os mapas de variabilidade de EC gerados com valores de Ds estimada pelos modelos MG1, MG3 e de Tomasella & Hodnett (1998) apresentaram amplitude bem próxima aos valores encontrados para o mapa de EC medido; enquanto os mapas estimados pelos modelos de Benites et al. (2007) e Bernoux et al. (1998) tenderam a superestimar esses valores. Os mapas gerados com Ds estimada pelos modelos de Benites et al. (2007) e Bernoux et al. (1998) apresentaram os maiores valores no limite superior comparado ao mapa de EC medido (13,96 kg C m⁻² e 12,81 kg C m⁻², respectivamente).

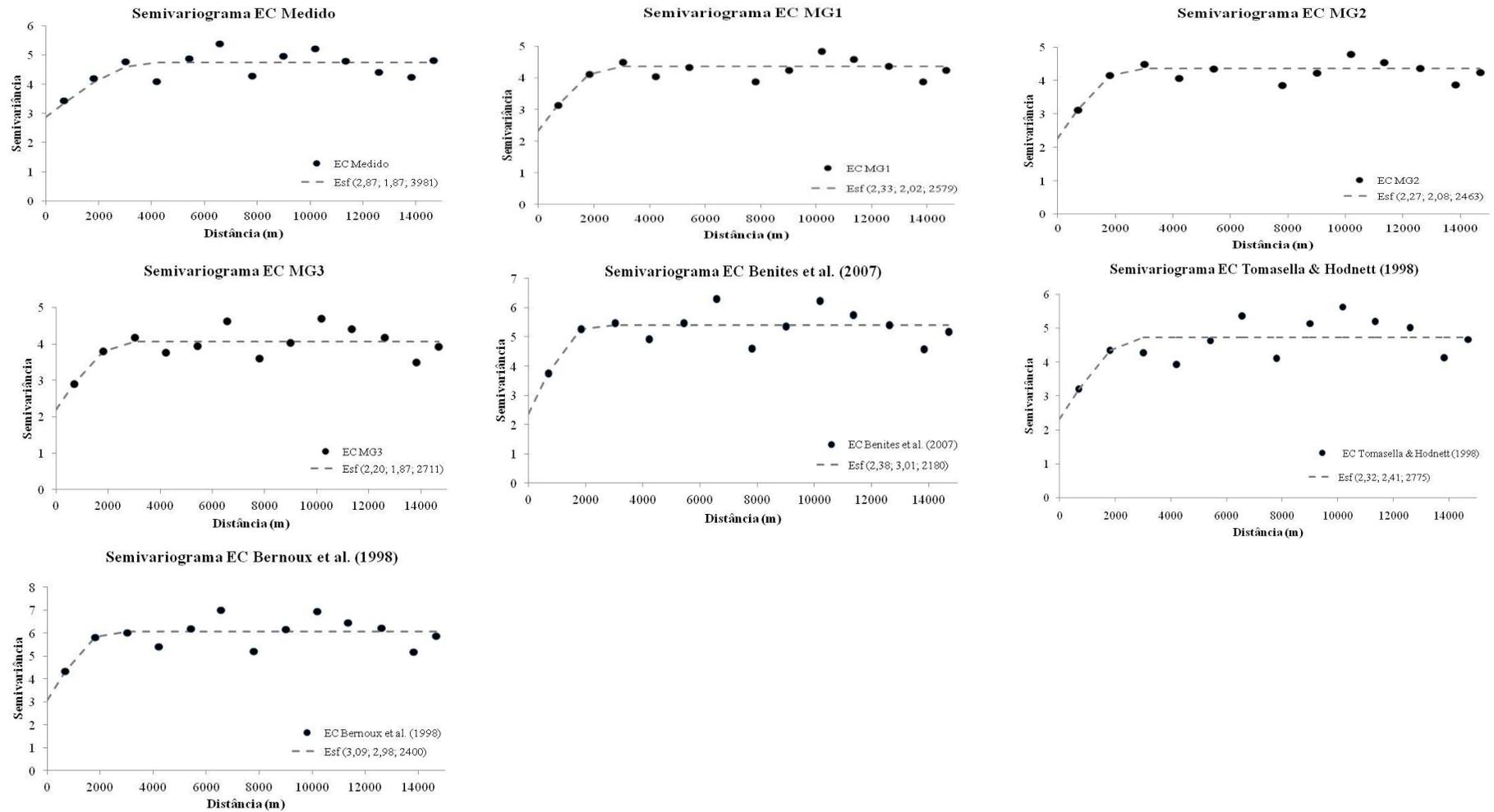


Figura 9. Semivariogramas de estoque de carbono nos diferentes perfis estudados.

Bernoux et al. (2002) discutem acerca das fontes de incertezas na estimativa do estoque de carbono. A primeira fonte está relacionada a diferentes informações dos bancos de dados usados nas estimativas. A segunda fonte diz respeito ao erro associado a predição da Ds por modelos de regressões múltiplas; no entanto, segundo os mesmos autores, a mais importante fonte de incerteza está relacionada aos métodos de estimativa do carbono orgânico. Diante disso, se reafirma a necessidade de detalhamento nas publicações sobre o banco de dados utilizado na geração de FPTs, estes devem conter além de informações da estatística dos dados, quais os métodos usados para obtenção das covariáveis em estudo. Os autores citam o Walkley & Black (1934) como método tradicional em ciência do solo e afirmam que esse método não é totalmente preciso e é a principal fonte de incerteza na estimativa de EC. No entanto, se observou nesse estudo que variações na estimativa da Ds, através de FPTs, causam alterações nos valores de EC no mapa final de variabilidade. As FPTs de Bernoux et al. (1998) e Benites et al. (2007) causaram a superestimação nos valores de EC em relação aos valores do mapa medido.

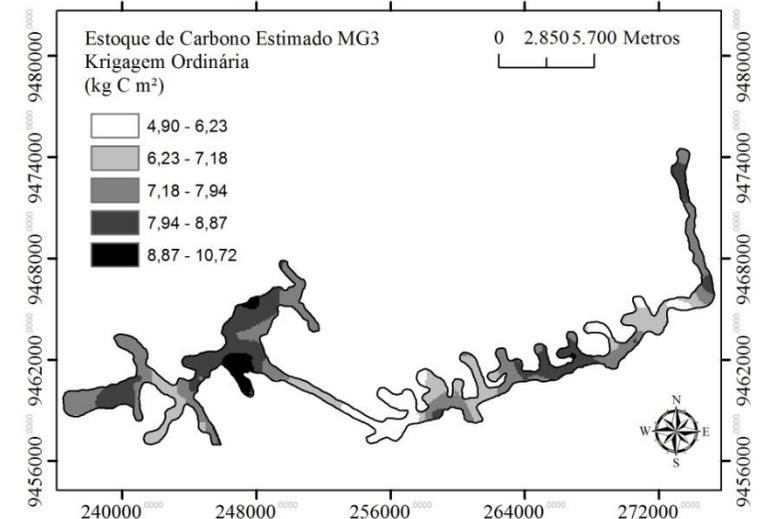
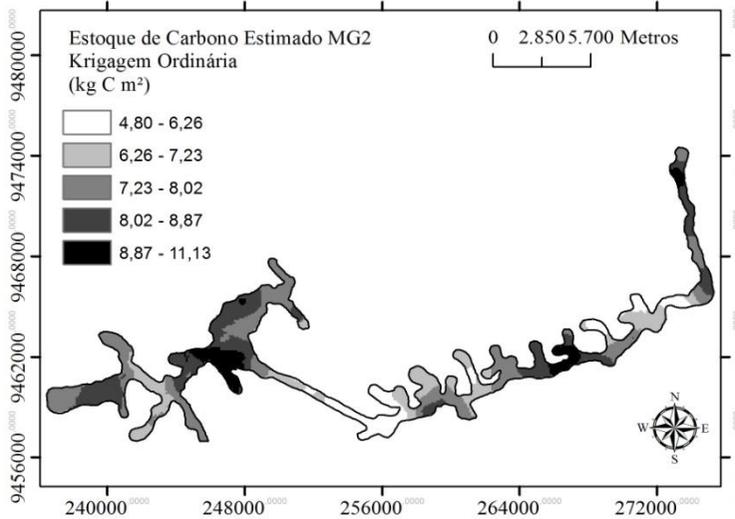
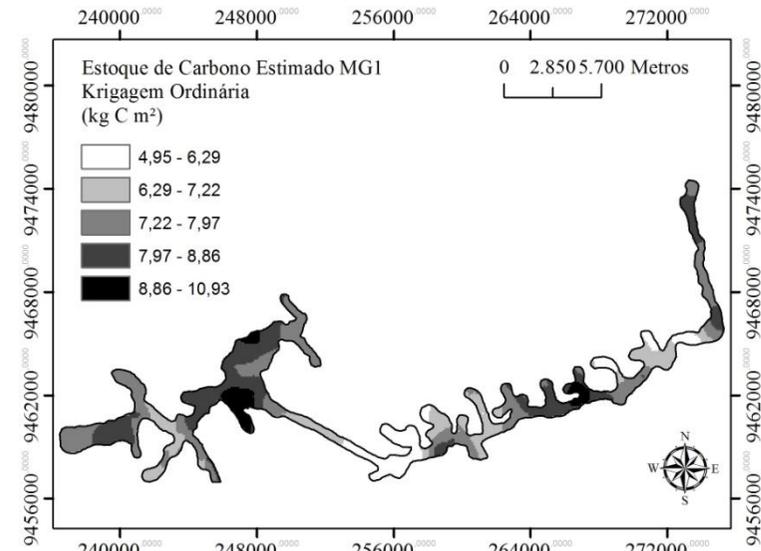
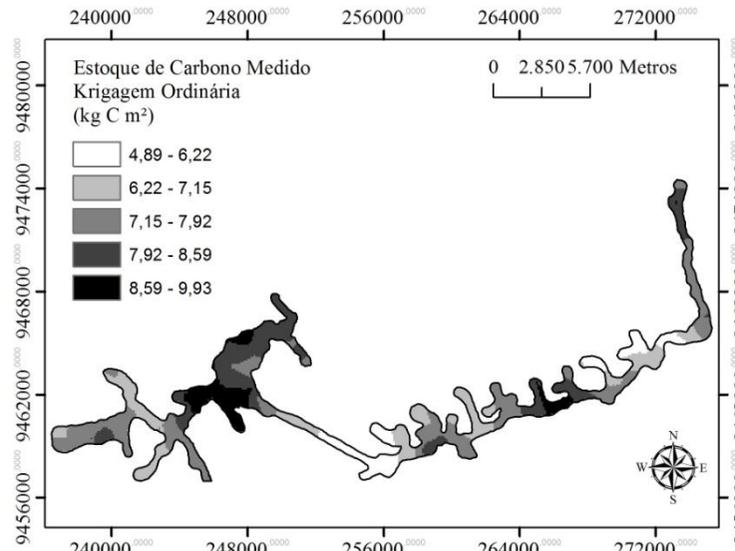
Na Tabela 6, são apresentados os parâmetros de validação (*Jackknife*) dos modelos de predição. Esses parâmetros devem ser avaliados juntamente com os mapas de variância de krigagem (Figura 9) para determinar o erro da estimativa no processo de interpolação de dados não amostrados (krigagem ordinária). Pode se observar que os parâmetros de validação dos modelos estimados ficaram bem distantes dos parâmetros do modelo medido.

Tabela 6. Parâmetros de validação (*Jackknife*) dos modelos de predição de EC.

Modelos	Regressão			Erro reduzido	
	Linear	Angular	Correlação	Média	Variância
Medido	3,24	0,57	0,23	0,0039	1,058
MG1	6,95	0,84	0,20	0,0065	1,082
MG2	6,93	0,86	0,19	0,0057	1,095
MG3	6,94	0,72	0,17	0,0059	1,100
Benites et al. (2007)	5,03	0,40	0,22	0,017	1,200
Tomasella & Hodnett (1998)	6,66	0,12	0,25	0,0023	1,102
Bernoux et al. (1998)	5,06	0,42	0,18	0,0015	1,112
Referência	0	1	1	0	1

A análise da variância de krigagem permite conhecer o erro associado as estimativas obtidas pelo método de krigagem. Essa propriedade se relaciona aos parâmetros do semivariograma, sendo assim, quanto menor for o efeito pepita do semivariograma, menor será a variância de krigagem.

O semivariograma com menor efeito pepita foi do EC MG3 e o mapa de variância de krigagem deste apresentou o menor intervalo de valores. Os maiores valores de variância encontrados foram para os mapas de EC Benites et al. (2007) seguido por Bernoux et al. (1998). O menor intervalo de variância foi para o mapa de EC MG3 e os demais apresentaram valores próximos aos observados no mapa de EC medido.



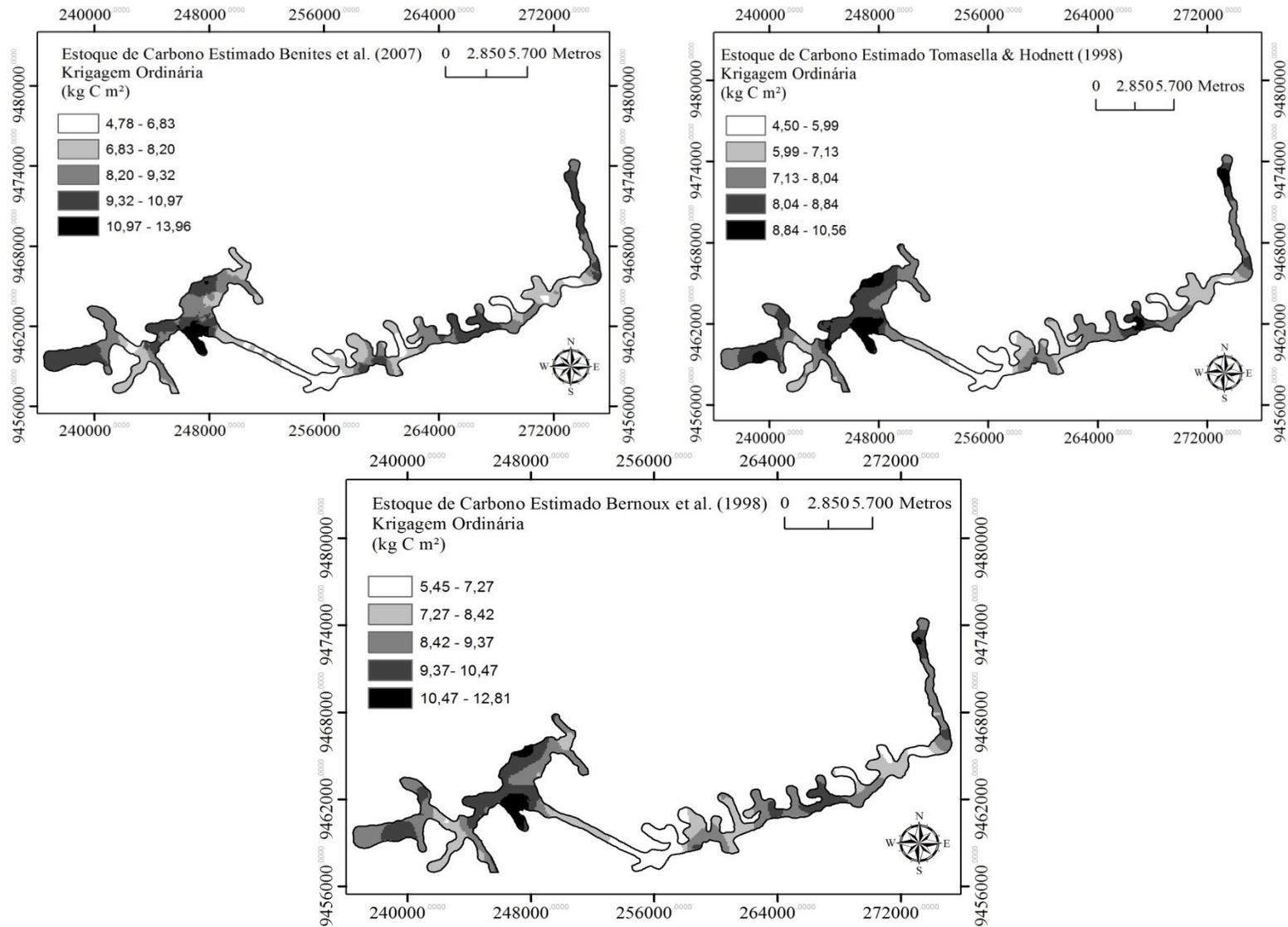
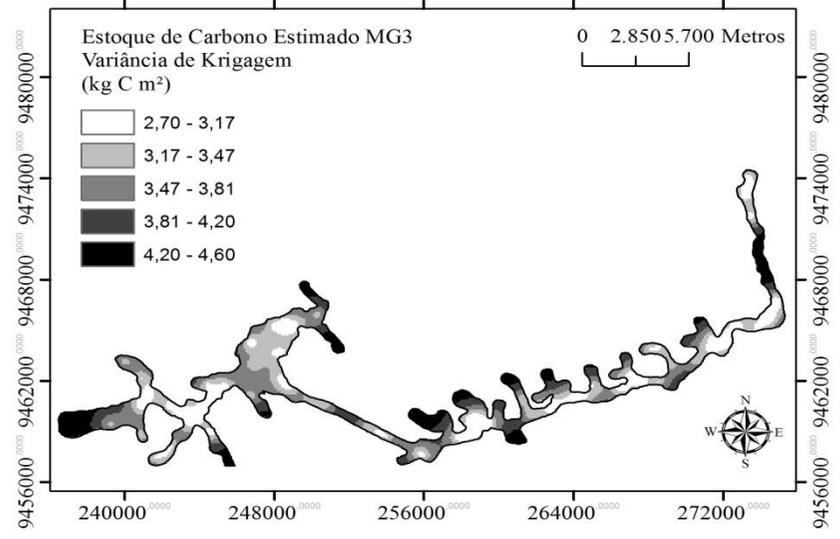
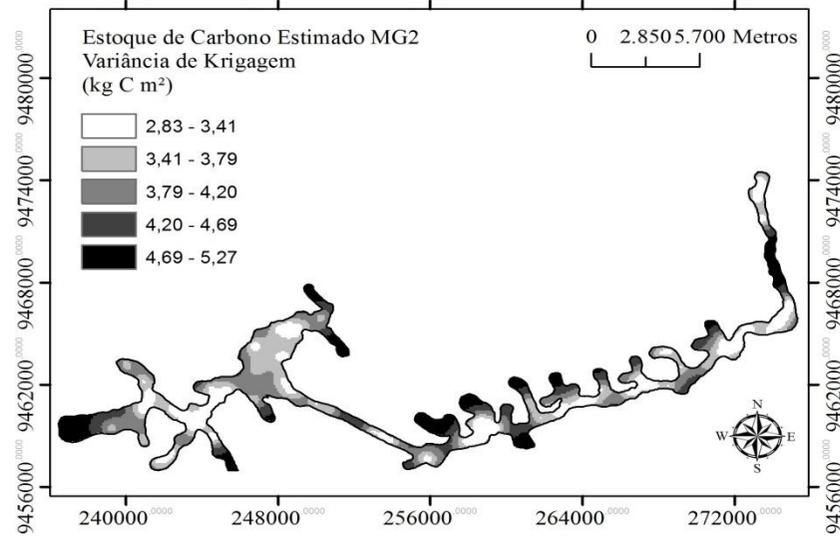
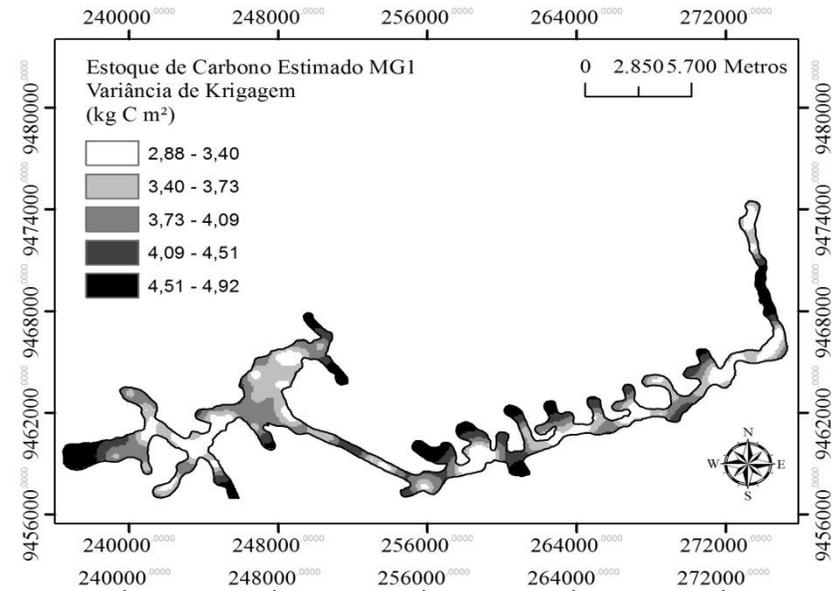
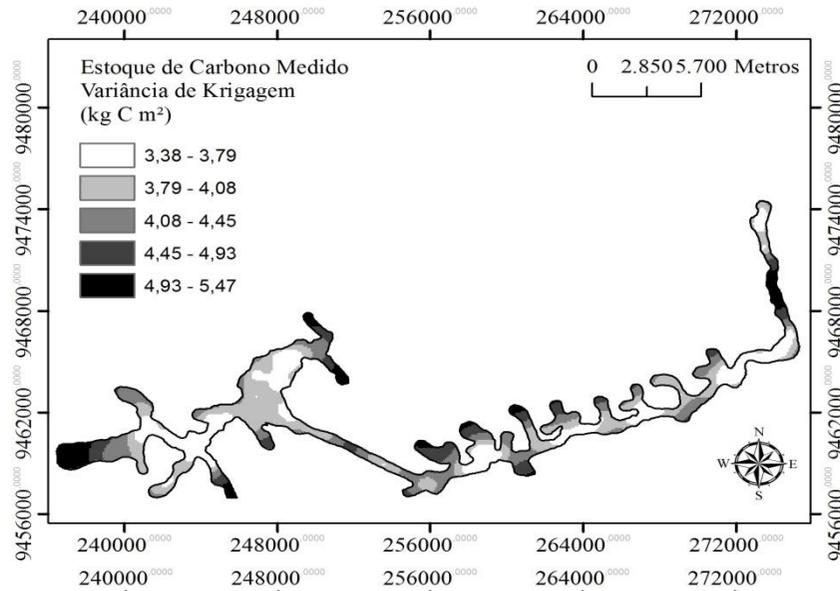


Figura 10. Mapas de variabilidade espacial de estoque de carbono pelo método de krigagem Ordinária.



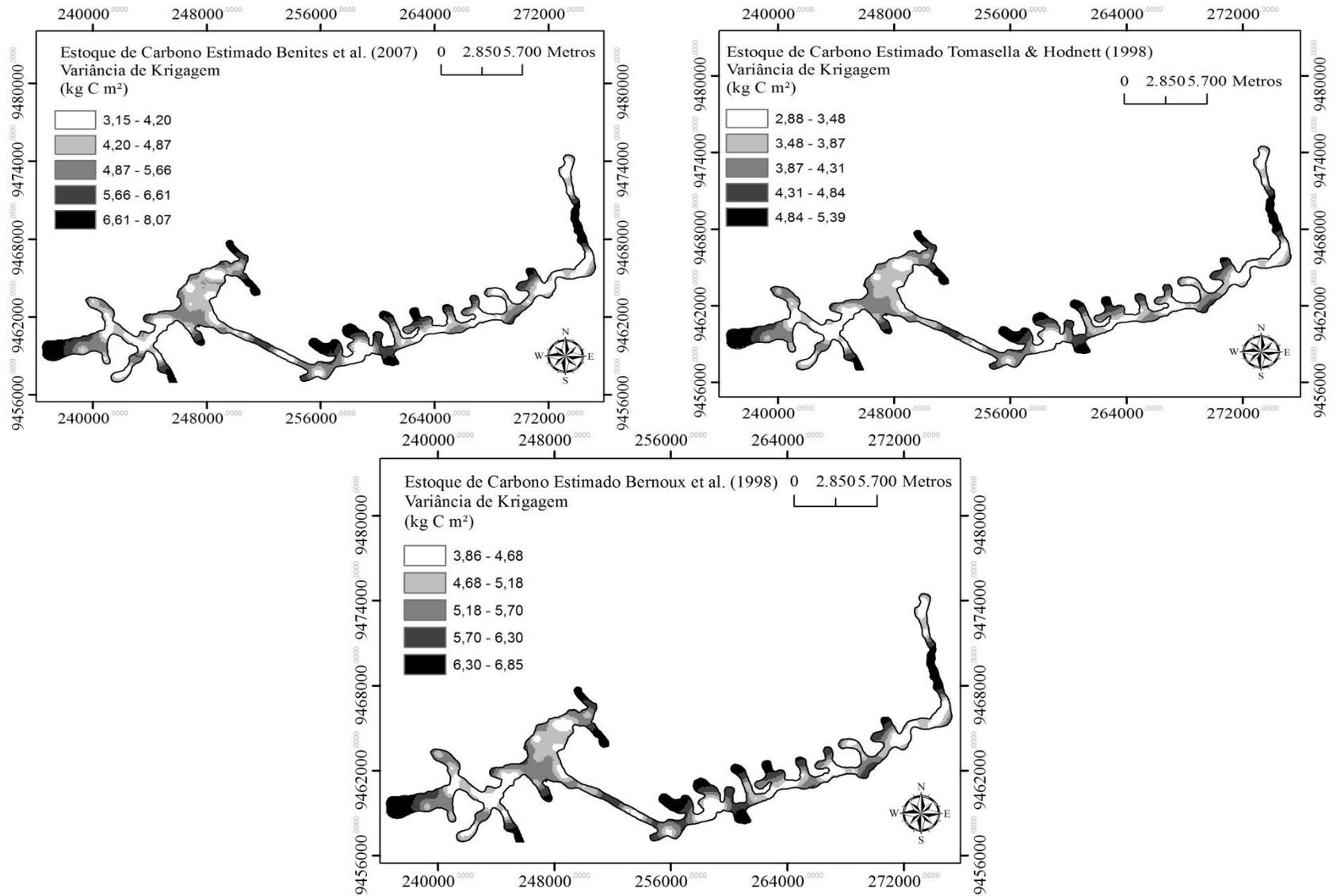


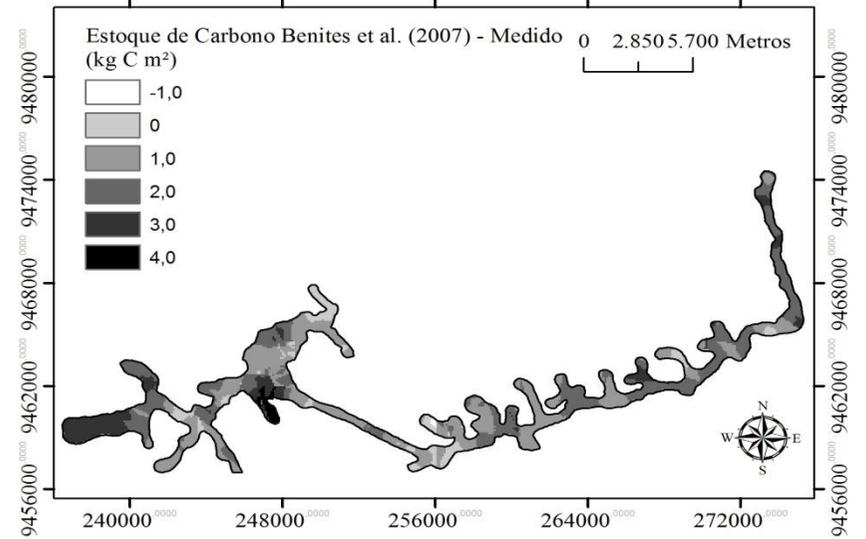
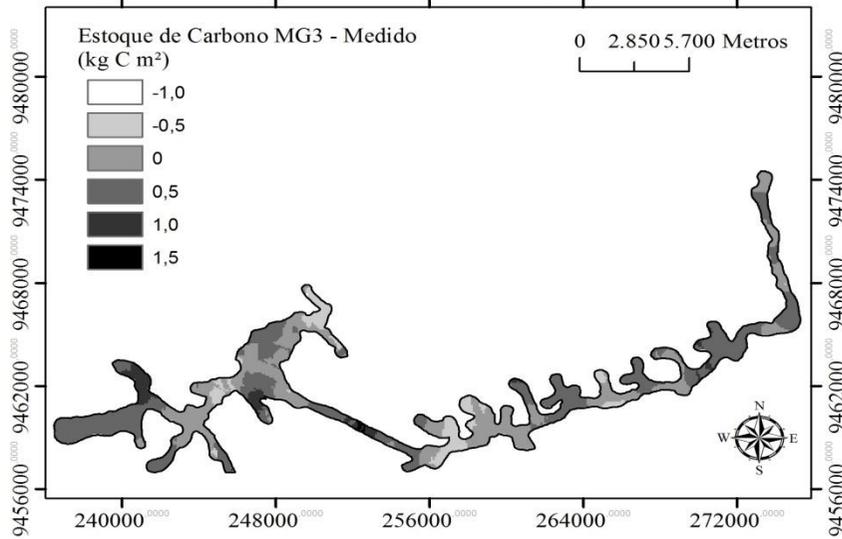
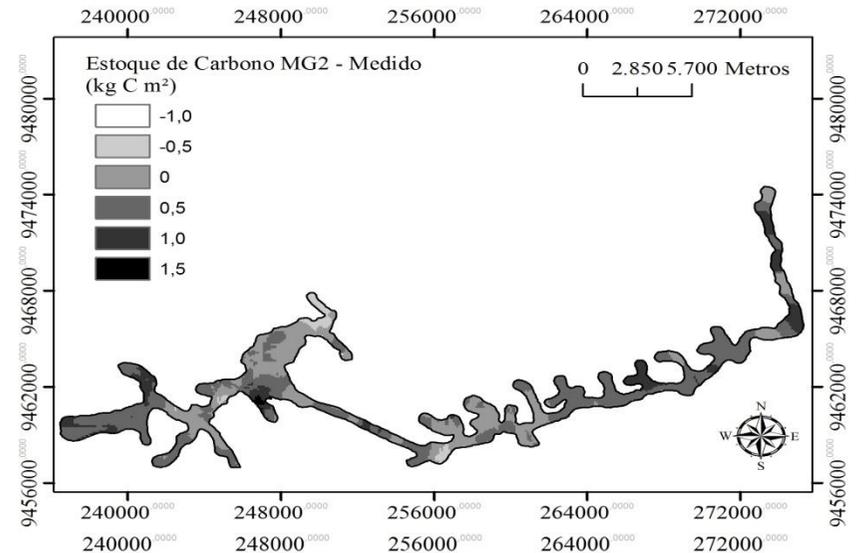
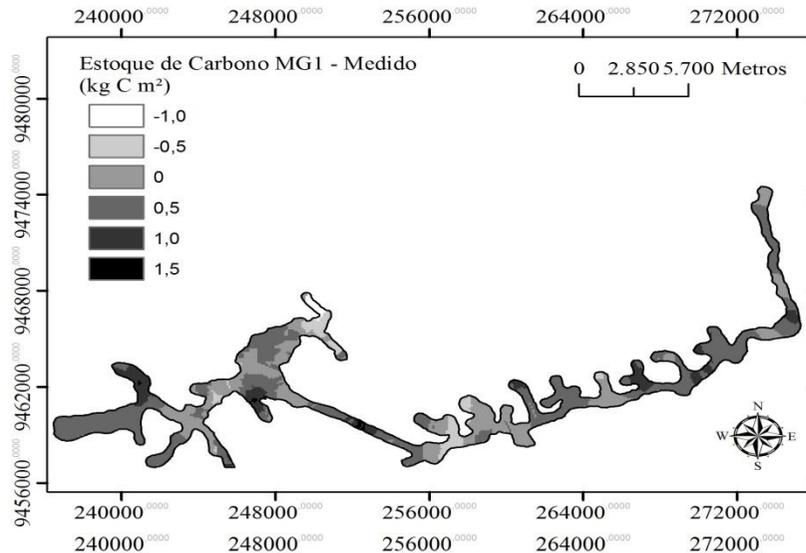
Figura 11. Mapas de variância de Krigagem.

Por fim, para se quantificar do impacto do uso de cada FPT na variabilidade espacial do EC, nas Figuras 12 e 13, são apresentados os desvios dos valores de estoque de carbono, quando se subtrai cada mapa de EC gerado por FPT do mapa gerado pelos dados medidos.

Como referência para comparar os gráficos de desvios, foi estabelecido como desvio tolerável o valor de $\pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$; ou seja, erros de super ou subestimação de $0,5 \text{ kg C m}^{-2}$ não serão considerados na percentagem total de erros.

O mapa EC MG3 mostrou a menor percentagem de erro, onde 9,3% da área total apresentou valores acima de $\pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$. Os mapas de EC Benites et al. (2007) e EC Bernoux et al. (1998) apresentaram as maiores percentagens de erro, que foram de 91,22% (erro de até $4,0 \text{ kg C m}^{-2}$) e de 88,39% (erro de até $2,5 \text{ kg C m}^{-2}$), respectivamente. Os mapas de EC MG1, MG2 e Tomasella & Hodnett (1998) apresentaram percentagem de erro de 9,63%, 11,93% e 16,31%, respectivamente. Essas percentagens representam um erro de $0,09 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$ para o EC MG1; de $0,12 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$ para o EC MG2; de $0,05 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$ para o EC MG3; de $1,56 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$ para o EC Benites et al. (2007); de $0,17 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$ para o EC Tomasella & Hodnett (1998); e de $1,44 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$ para o EC Bernoux et al. (1998).

Com isso, pode se observar que os maiores erros na estimativa de EC, usando diferentes FPTs para estimar a densidade do solo, ocorrem quando foram utilizados os modelos de predição de Benites et al. (2007) e Bernoux et al. (1998). Já os modelos que apresentaram os menores valores de erros foram os modelos gerados MG1 e MG3.



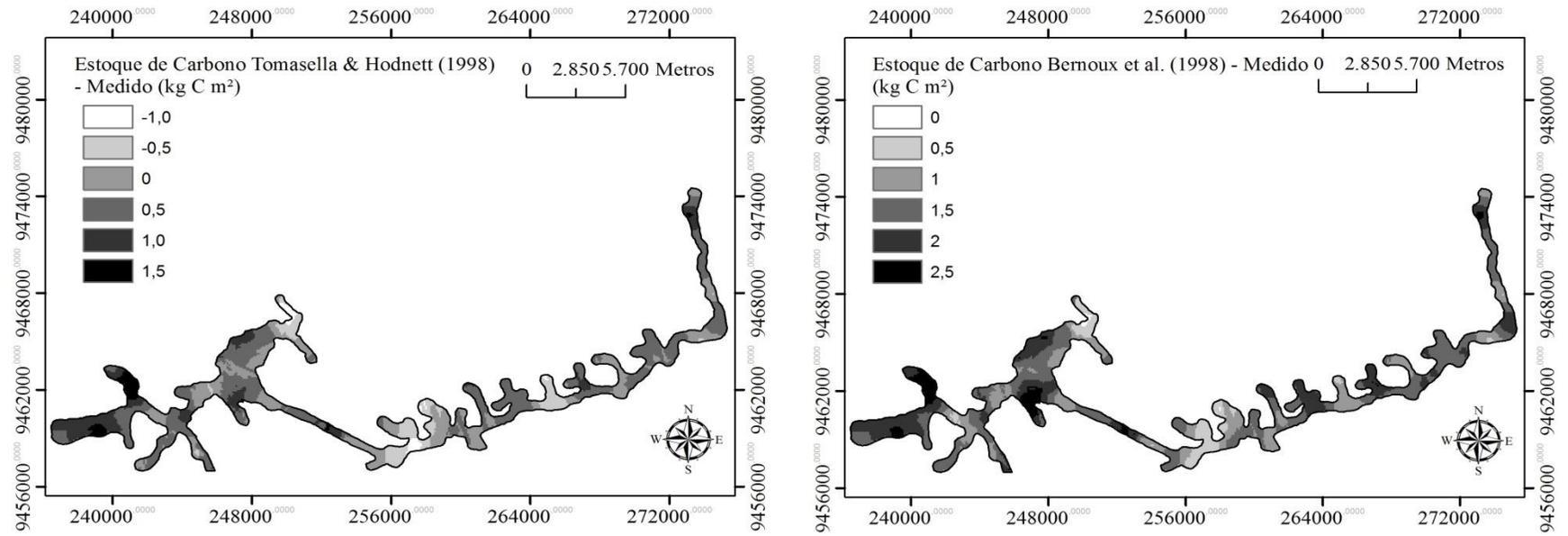


Figura 12. Mapas de desvios de estoque de carbono em relação ao Mapa de EC Medido.

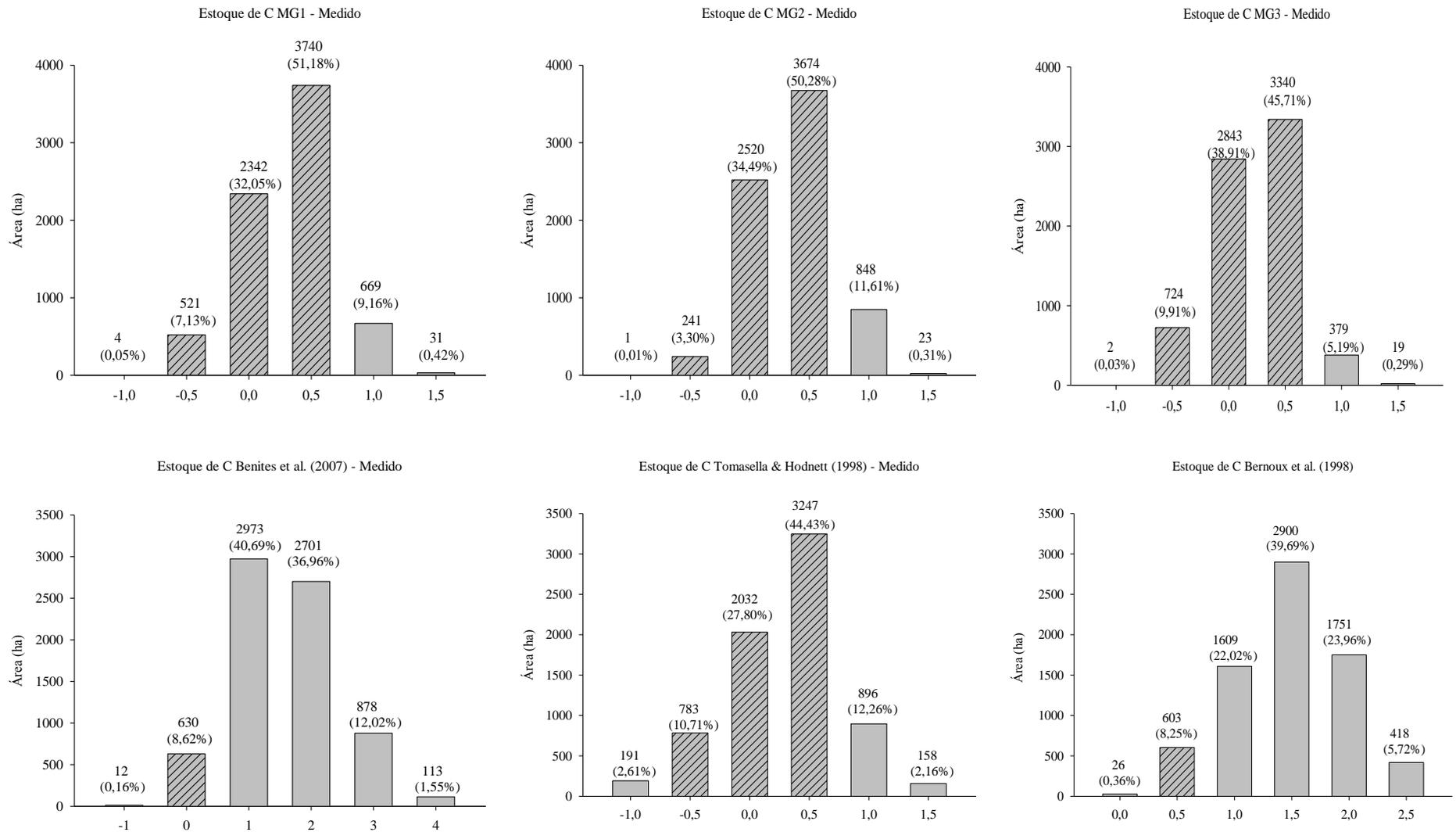


Figura 13. Área ocupada pelas classes de desvios de estoque de carbono em relação ao Mapa de EC medido.

5 CONCLUSÕES

Foi possível desenvolver funções de pedotransferência (FPTs) para estimativa de densidade de solos da Bacia Solimões, utilizando atributos físicos e químicos dos solos. As FPTs geradas (MG1, MG2 e MG3) apresentaram o melhor desempenho na predição da densidade dos solos da Bacia do Solimões, sendo que a FPT MG3 foi a mais indicada devido ao menor número de variáveis preditoras do modelo. Esses modelos apresentaram melhor acurácia comparados aos existentes na literatura, devido ao fato de ter sido desenvolvido com banco de dados obtido neste ambiente. Os modelos são recomendados para todos os horizontes, sob Floresta Tropical Amazônica na Bacia do Solimões. Mesmo os modelos tendo apresentado melhor acurácia, são necessários mais estudos para saber se os modelos se aplicam para os solos de toda a Bacia do Solimões, devido a sua extensão e variação de materiais de origem.

Em relação aos mapas de variabilidade de estoque de carbono (EC), o gerado a partir de valores de EC calculados com a densidade estimada pelo modelo MG3 foi o que mais se aproximou do gerado com valores de EC medido, além de ter apresentado a menor variância de krigagem. Os modelos de Benites et al. (2007) e Bernoux et al. (1998) foram os que mais superestimaram os valores de EC. Em relação à análise de álgebra de mapas (subtração do mapa de EC medido dos mapas de EC estimados pelas FPTs), os mapas EC MG1 e MG3 apresentaram o menor erro, $0,09 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$ e $0,05 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$, respectivamente. Já os mapas que apresentaram os maiores erros foram os obtidos a partir de Benites et al. (2007) e Bernoux et al. (1998), com valores de $1,56 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$ e de $1,44 \pm 0,5 \text{ kg C m}^{-2}$, respectivamente.

As FPTs para estimativa de densidade dos solos da Bacia do Solimões recomendadas neste trabalho são a MG3 e a proposta por Tomasella & Hodnett (1998). As FPTs obtidas por Benites et al. (2007) e Bernoux et al. (1998) não são recomendadas para este ambiente.

É essencial ressaltar a importância da contextualização das condições ambientais, bem como, a fonte do banco de dados utilizados pelos autores de FPTs para evitar o uso indevido das funções, já que elas não devem extrapolar os limites do ambiente para o qual foram desenvolvidas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; SILVA, I. R.; OLIVEIRA, E. K. Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. **Revista Acta Amazônica**, v. 41, p. 103 – 114, 2011.
- AZEVEDO, A. C.; PEDRON, F. A.; SARTOR, L. R.; CASARINI, P.G. Filossilicatos 2:1 com hidróxi entre camadas em solos: estado atual do conhecimento e das perspectivas de pesquisa. Disponível em: <<http://www.dx.doi.org/10.4322/rca.2012.056>>. Acesso em 08 abr. 2013.
- BARBOZA, F. S. **Funções de pedotransferência para solos do Sul do Uruguai**. (Dissertação Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria. 94p. 2011.
- BARATA, C.F.; CAPUTO, M.V. **Geologia do petróleo da bacia do Solimões**. O “estado da arte”. 4º PDPETRO, Campinas, SP. 21- 24 de Out. de 2007.
- BATISTA, I.; CORREIA, M. E. F.; PEREIRA, M. G.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; MELLO, N. A. Caracterização dos agregados em solos sob cultivo no Cerrado, MS. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, p. 1535 – 1548, 2013.
- BATJES, N.H. & DIJKSHOORN, J. A. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. **Geoderma**, Amsterdam, v. 89, p.273 – 286, 1999.
- BERNINI, T. A.; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A.; ANJOS, L. H. C.; CALDERANO, S. B.; WADT, P. G. S.; MORAES, A. G. L.; SANTOS, L. L. Taxonomia de solos desenvolvidos sobre depósitos sedimentares da Formação Solimões no Estado do Acre. **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 1, p.71-80, 2013.
- BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 139, p. 90–97, 2007.
- BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B. & CERRI, C. C. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Science Society America Journal*, v. 66, p. 888–896, 2002.
- BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 743 – 749, 1998.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, New York, v. 9, p. 177-213, 1989.
- BOX, G. E. P. & COX, D. R. **An analysis of transformations**. *Journal of the Royal Statistical Society*, London, v. 26, p. 211 – 252, 1964.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008.
- BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SB. 20 Purus: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 1978. 561p.,+ mapas. (Levantamento de Recursos Naturais, 17).
- CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1151-1159, 2002.
- CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, Tectonics, Paleoclimatology and Paleogeography of Northern Basins of Brazil**. (Tese de Doutorado), University of California. 586 p. 1984.

- CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v31, p. 1329-1339, 2007.
- CERRI, C.E.P.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; COLEMAN, K.; BERNOUX, M.; FALLOON, P.; POWLSON, D. S.; BATJES, N. H.; MILNE, E.; CERRI, C.C. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 122, p. 58 – 72, 2007.
- GHIG, L. A.; COUTO, E. G.; NOVAES FILHO, J. P.; RODRIGUES, L. C. M.; JOHNSON, M. S.; WEBER, O. L. S. **Distribuição espacial da granulometria, cor e carbono orgânico do solo ao longo de um transecto em microbacias na Amazônia meridional.** Disponível em: <<https://acta.inpa.gov.br/fasciculos/38-4/BODY/v38n4a15.html>> Acesso em 25 jan. 2014.
- CPRM. **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil.** L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.), Brasília, 2003.
- CPRM. **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas.** Reis, N. J.; ALMEIDA, M. E.; RIKER, S. L.; FERREIRA, A. L. (eds.), Manaus, 2006.
- CLARK, L.A.; PREGIBON, D. **Tree-based models.** In: Hastie, T.J.(Ed.), *Statistical Models*. S. Wadsworth, Pacific Grove, California, p. 377 – 419, 1992.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). 2006. ArcInfo 9.3.
- ESTATCAMP. **ACTION 2.4.** Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/>> Acesso em 22 de fevereiro de 2013.
- EIRAS, J.F., BECKER, C.R., SOUZA, E.M., GONZAGA, J.E.F., SILVA, L.M., DANIEL, L.M.F., MATSUDA, N.S., FEIJÓ, F.J. **Bacia do Solimões. Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 8, p. 17-45, 1994.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 353p. 3ª edição. 2013.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- FIDALGO, E. C. C.; BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B. E.; COELHO, M. R.; MOURA, I. B.; LIMA, C. X. **Estoque de carbono nos solos do Brasil. Rio de Janeiro: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (Embrapa Solos), n.121, 2007.**
- GONÇALVES, M. G.; FARIAS, L. N.; COSTA, A. D.; MOTA, L. S.; OLIVEIRA, B. L.; CEDDIA, M. B.; VIEIRA, S.R. Contribuição da geoestatística para o planejamento experimental de uma pastagem do sistema integrado de produção agroecológica (Fazendinha km 47). *Revista Universidade Rural*, Seropédica, v. 25, p. 1 – 5, 2005.
- HORBE, A. M. C.; PAIVA, M. R. P.; MOTTA, M. B.; HORBE, M. A. Mineralogia e geoquímica dos perfis sobre sedimentos neógenos e quaternários da bacia do Solimões na região de Coari – AM. *Acta Amazonica*, v. 37, p. 81 – 90, 2007.
- LANDIM, P.M. B. **Sobre Geoestatística e mapas.** *Terra e Didática*, v. 2, p. 19-33, 2006. Disponível em: <<http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/>> Acesso em 7 de janeiro de 2014.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo.** São Paulo: Edusp, 2005.

- LUCAS, Y.; LUIZAO, F.J.; CHAUVEL, A.; ROUILLER, J.; NAHON, D. The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. **Science**, v. 260, p. 521-523, 1993.
- MANRIQUE, L. A.; JONES, C. A. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 2, p. 476-481, 1991.
- MARQUES, J. D. O.; TEIXEIRA, W. G.; REIS, A. M.; JUNIOR, O. F. C.; BATISTA, S. M.; AFONSO, M. A. C. B. Atributos químicos, físico-hídricos e mineralogia da fração argila em solos do Baixo Amazonas: Serra de Parintins. **Acta Amazonica**, v. 40, p. 1 – 12, 2010.
- MARCOLIN, C.D. **Uso de funções de pedotransferência entre atributos físicos de solos sob plantio direto**. (Tese Doutorado), Universidade de Passo Fundo. 187p. 2009.
- MARCOLIN, C. D. & KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.
- MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; TRANTER, G. Necessary meta-data for pedotransfer functions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 160, p. 627 – 629, 2011.
- MEHRA, O. P. & JACKSON, M. L. **Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate**. In: NATIONAL CONFERENCE ON CLAYS AND CLAY MINERALS, Washington, D.C. Proceedings... New York: Pergamon Press, p. 317-327, 1960.
- MICHELON, C.J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.4, p.848-853, 2010.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. de L.M.; SANTOS, H.G. dos. **Revisão de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50p. (Documentos, 45).
- NASCIMENTO, G. B.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A.; SANTOS, H. G. Funções de pedotransferência do conteúdo de água em Latossolos Amarelos e Argissolos Amarelos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.5, n.4, p.560-569, 2010.
- PETROBRAS SA. **Relatório final do levantamento detalhado de solos da Base Petrolífera Geólogo Pedro de Moura (BOGPM), Coari- Amazônia**. Projeto Petrossolos Amazônicos (Convênio PETROBRAS/UFRRJ/FAPUR, Nº 45/08). Coordenador: Marcos Bacis Ceddia. 642p. 2010.
- RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J. C.; REZENDE, S. B. **Mineralogia de solos brasileiros: Interpretações e Aplicações**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2011. 206p.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo**. 5. ed. Viçosa-MG: Folha de Viçosa Ltda., 2005. v. 1. 100p.
- STOLF, R. **Operação do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf**. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR., 1984. 8p. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim n.2).
- TIETJE, O.; TAPKENHINRICH, M. Evaluation of pedotransfer functions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.57, p.1088– 1095, 1993.
- TOMASELLA, J. & HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, Madison, v. 163, n. 3, p. 190 – 202, 1998.

- VALENCIA, L. I. O.; MEIRELLES, M. S. P.; BETTINI, C. **Geoestatística Aplicada à Agricultura de Precisão**. In: MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. *Agricultura de Precisão para o Manejo da Fertilidade do Solo em Sistema Plantio Direto*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. Cap. 02, p. 37 – 56.
- VERECKEN, H. & HERBST, M. **Part I Methods to develop Pedotransfer Functions – Statistical regression**. In: PACHEPSKY, Y. & RAWLS, W. J. (eds). *Development of Pedotransfer Functions in soil hydrology*. Elsevier: Amsterdam, 2004. Chapter 1, p. 3 – 19.
- VIEIRA S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V. V. H. & SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds). *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-53, 2000.
- VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. M. Geostatistical theory and application to variability of some a agronomical properties. *Hilgardia*, Berkeley, v.51, p.1-75, 1983.
- VILLELA, A. L. O. **Mapeamento Digital de Solos da formação Solimões sob Floresta Tropical Amazônica**. (Tese Doutorado), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.112p.2013.
- VOLKOFF, B.; MELF, A. J.; CERRI, C. C. Solos Podzólicos e Cambissoloseutróficos do Alto Purus (Estado do Acre). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 13, p. 363 – 372, 1989.
- WILLIAMS, J.; ROSS, P.; Bristow, K. **Prediction of the Campbell water retention function from texture, structure, and organic matter**. In: VAN GENUCHTEN, M. T. H., LEIJ, F. J., LUND, L.J. (Eds.), *Proc. Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating theHydraulic Properties of Unsaturated Soils*. University of California, Riverside, 1992, p. 427– 442.
- WÖSTEN, J.H.M.; PACHEPSKY, YA.A.; RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Hydrology Journal*, v.251, p.123–150, 2001.

Anexo A – Descrição das unidades de mapeamento da BOGPM (Petrobras, 2010).

A UM1 é uma unidade de mapeamento simples que corresponde à classe de solo GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico A moderado (GXvd). Ocorrem inclusões de CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico A moderado muito mal drenado hiperdistrófico (CXvd), NEOSSOLO FLÚVICO Tb Distrófico típico A moderado extremamente drenado (RYbd) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado imperfeitamente drenado (PAd). A expressão territorial dessa unidade de mapeamento na área mapeada é relativamente pequena (91,7 ha – 1,2%). Embora seja comum a ocorrência de baixadas e igarapés ao longo da base de Urucu, a maioria desses locais é comumente preenchida por sedimentos trazidos pelos processos erosivos naturais, tornando as baixadas entulhadas. O acúmulo de sedimentos em um ambiente úmido, no entanto, nem sempre é suficiente para a formação de Gleissolos em grandes extensões (sequência de horizontes A-AC - Cg). Esta unidade ocorre na calha dos igarapés Tartaruga, Onça e Tamanduá e também em um grande tributário do igarapé Tartaruga.

A UM2 é uma unidade de mapeamento simples que corresponde à classe de solo ESPODOSSOLO FERRIHUMILÚVICO Hidromórfico dúrico (ESKg). Ocorrem inclusões de GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico A moderado (GXvd), CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico típico A moderado muito mal drenado hiperdistrófico (CXvd) e NEOSSOLO FLÚVICO Tb Distrófico típico A moderado extremamente drenado (RYbd). Esta unidade de mapeamento se restringe ao entorno do curso d'água principal do Igarapé Tamanduá. O ambiente é caracterizado pelo acúmulo de sedimentos arenosos (areia fina), com presença de sequência de horizontes A - E- EB - Bhs. O horizonte Bhs ocorre na profundidade média de 1,0 m, formando uma camada adensada com forte cimentação devido à concentração de colóides de natureza orgânica e provavelmente óxidos de ferro e alumínio. Esta camada causa o impedimento da drenagem (Ortstein). A expressão territorial dessa unidade de mapeamento na área mapeada é relativamente pequena (11ha – 0,1%).

A UM3 é uma unidade de mapeamento simples representada por CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado moderadamente drenado textura média. Inclusão de NEOSSOLO FLÚVICO Psamítico típico A moderado eutrófico (RYq), ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado (PAal) e CAMBISSOLO FLÚVICO Ta Distrófico gleissólico A moderado (CYvd). Ocorre através de toda a base de Urucu, associada às áreas de baixada mais assoreadas com sedimentos, e em grande parte do entorno de linhas de drenagem mais encaixadas. Abrange as terras com perfis descritos, em sua maioria, em situação de baixada e de terço inferior de encostas com declividade baixa (0-5%). Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 1.529,0 ha (19,2% da área mapeada). Nesses locais, os sedimentos depositados sob condições de drenagem imperfeita formam predominantemente solos com horizonte B incipiente e de textura média (Franco-arenosa e Franca). A classe de solo CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado moderadamente drenado textura média é predominante, tendo expressão típica no entorno do Igarapé Tamanduá e no entorno de todas as linhas de drenagem de cursos d'água mais encaixados. Nos pontos de planície aluvial com maior espessura, onde os ciclos de umidecimento e secagem são mais frequentes e avançados, são formados perfis com horizontes B textural e matizes 7,5YR e 10YR, sendo classificados como ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado imperfeitamente drenado. Nos pontos das planícies

aluviais com sedimentos mais arenosos, os perfis apresentam sequencia de horizontes A-AC-CA-C, sendo classificado como NEOSSOLO FLÚVICO Psamítico típico A moderado eutrófico.

A UM4 é uma unidade de mapeamento composta pelo complexo das classes de solos ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico típico A moderado hiperdistrófico (PVAal - 25%), CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico (CXal - 20,8%) e CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado álico (CXbd - 25%). Ocorre a inclusão das classes ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico A moderado álico (PVAd - 12,5%), CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico A moderado moderadamente drenado (CXa - 8,3%), ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico (PAal - 4,2%) e ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado (PAal - 4,2%). Ocorre em áreas de encostas com declividades mais acentuadas, entre 6 a 22%, e os perfis estão descritos, predominantemente em situação de meia encosta e terço superior de encosta. Os solos apresentam predomínio de cores com matiz 5YR nos horizontes B (inclusive BA). A unidade de mapeamento é composta de uma associação de Argissolos e Cambissolos, uma vez que é comum, sob diferentes situações, a ocorrência de horizontes subsuperficiais diagnósticos B textural (Bt) e B incipiente (Bi), sendo o primeiro mais frequente. Os solos desta unidade de mapeamento são comumente alíticos e distróficos (hiperdistróficos) e bem drenados, diferenciando-se dos solos ocorrentes nos topos das mesmas encostas que apresentam caráter predominantemente alítico ou alumínico. Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 1703,9 ha (21,4% da área mapeada).

A UM5 é uma unidade de mapeamento simples referente à classe CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico (CXal). Ocorre a inclusão das classes PVAal, PVAa, PVAd, PVal, PAal, PAa, PAal e RQo. Esta unidade de mapeamento ocorre nas encostas mais declivosas, compreendendo a maior parte das terras no entorno da estrada para Porto Evandro, sobretudo no trecho entre o Igarapés Tamanduá, Lontra e Marta (incluindo o alojamento Papagaio). As áreas com esta unidade de mapeamento apresentam declividade média de 14%, tendo ampla faixa de variação (1-50%), estando os perfis descritos em situação de terço inferior a terço superior de encosta. Os solos apresentam predomínio de cores com matiz 5YR nos horizontes B (inclusive BA), podendo ser encontrado matizes mais vermelhos (2,5YR-PVd) e mais amarelos (7,5YR -PAal e CXbd). Os solos desta unidade de mapeamento são predominantemente alíticos e bem drenados. Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 1491,7 ha (18,1% da área mapeada).

A UM6 é uma unidade de mapeamento composta pelo complexo das classes de solos CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado hiperdistrófico (CXal - 50%) e ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alumínico plúntico A moderado (PVAa 33,3%). Nessa unidade de mapeamento ocorre a inclusão de CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico A moderado álico (CXbd 16,7%). Esta unidade de mapeamento cobre toda área de encostas e topos muito dissecados das microbacias Paca, Macaco e Porto Evandro. As áreas com esta unidade de mapeamento apresentam declividade média de 14%, tendo ampla faixa de variação (1-50%), estando os perfis descritos em situação de topo, terço inferior a terço superior de encosta. O relevo forte ondulado e ondulado é característico da região. Os solos apresentam predomínio de cores com matiz 5YR nos horizontes B (inclusive BA), sendo alíticos e alumínicos, sob condições de boa drenagem. Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 297,9 ha (3,7% da área mapeada).

A UM7 é uma unidade de mapeamento composta pelo complexo das classes de solos CAMBISSOLO HÁPLICO Alítico típico A moderado imperfeitamente drenado (CXal – 31,3%) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico moderadamente drenado (PAd – 25%) . Ocorrem as inclusões das classes ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado hiperdistrófico (PAal – 12,5%) , ARGISSOLO AMARELO Alumínico típico A moderado moderadamente drenado (PAa – 12,5%), CAMBISSOLO HÁPLICO Alumínico típico A moderado hiperdistrófico (CXa - 12,5%) e ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Alítico típico A moderado moderadamente drenado (PVAal - 6,2%). Ocorre amplamente nos topos das colinas mais dissecadas da região do Pólo Arara, Alojamentos Base, Tucano e Vitória Régia, campos de SUC e RUC. Os solos apresentam cores com matizes entre 5YR a 10YR, com predomínio dos matizes mais amarelos, sendo estes predominantemente alíticos e bem drenados. As áreas com esta unidade de mapeamento apresentam declividade média de 14%, tendo ampla faixa de variação (1-50%), estando os perfis descritos em situação de topo e terço superior de encosta. O relevo plano a suave ondulado é característico. Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 1073,1 ha (13,5%).

A UM8 é uma unidade de mapeamento composta pelo complexo das classes de solos ARGISSOLO AMARELO Alítico típico A moderado moderadamente drenado (PAal – 62,5%) e ARGISSOLO AMARELO Distrófico plúntico A moderado moderadamente drenado (PAd – 37,5%). Ocorre nas regiões com padrão de relevo plano a suave ondulado nos planaltos aplainados comumente encontrados nas cabeceiras das bacias hidrográficas, com alta densidade de drenagem. A unidade de mapeamento é composta por uma associação de Argissolos, uma vez que é comum, sob diferentes situações, a ocorrência de horizontes subsuperficiais diagnósticos B textural (Bt). Os solos apresentam cores com matizes entre 7,5 a 10YR, sendo estes distróficos e alíticos e com drenagem moderada a imperfeita. As áreas com esta unidade de mapeamento apresentam declividade média de 3 a 5%, estando os perfis descritos em situação de topo a terço inferior de encosta. O relevo plano a suave ondulado é característico. Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 1.394,9 ha (17,5%).

A UM9 é uma unidade de mapeamento simples que corresponde á classe de solo ARGISSOLO ACINZENTADO Distrófico típico álico A moderado mal drenado (PACd). Ocorre nessa unidade, inclusões de ARGISSOLO AMARELO Distrófico típico A moderado álico (PAD), PLANOSSOLO HÁPLICO Arênico A moderado imperfeitamente drenado (SXd) e ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Órtico típico A moderado textura média (ESko). Encontra-se nas regiões de planaltos aplainados com elevada densidade de drenagem e baixa declividade (relevo plano). Essa combinação de drenagem e declividade forma regiões com alto índice de umidade e de drenagem relativamente impedida. Esta unidade de mapeamento foi mapeada na região das cabeceiras das microbacias Lontra e Tamanduá, ao longo da estrada para o porto Evandro. É composta por uma associação de Argissolos Acinzentados e Amarelos, uma vez que é comum, sob diferentes situações, a ocorrência de horizontes subsuperficiais diagnósticos B textural (Bt). Os solos apresentam, nos horizontes subsuperficiais, cores com matizes 2,5Y, 10B, e 10YR, com valores entre 6 a 8 e croma 1. Os solos são predominantemente mal e imperfeitamente drenados, com baixa saturação de bases (distróficos). As áreas com esta unidade de mapeamento apresentam declividade média de 2%, estando os perfis descritos em situação de topo a baixada. O relevo plano é característico. Essa unidade de mapeamento cobre uma área de 373,3 ha (4,7 %).

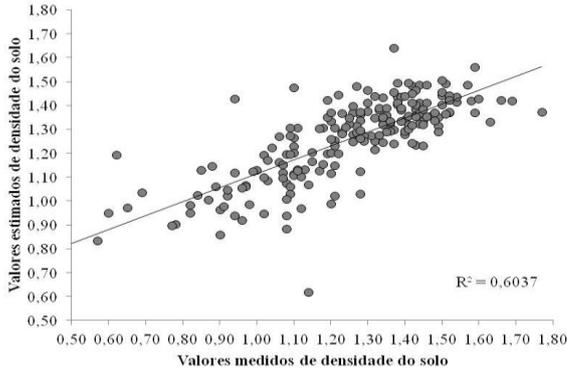
Anexo B – Diferentes combinações de percentagens do conjunto de dados de treinamento (T) e validação (V).

❖ **60% (T) – 40% (V)**

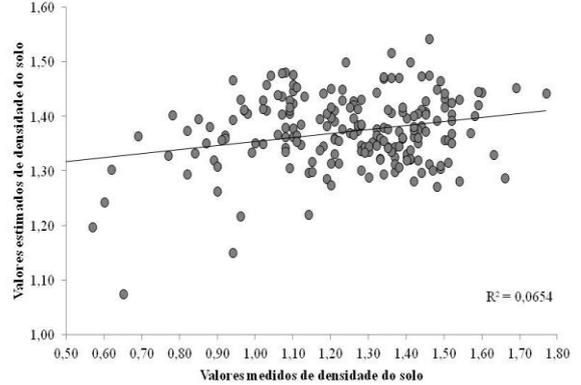
$$Ds = 0,565 - 0,123 (\ln COT) - 0,091(\ln H^+) + 0,129 (pH^{0,6}-1/0,6) - 0,066 (\ln SB) - 0,007(AT^{0,4}-1/0,4) - 0,029(AI^{0,7}-1/0,7)$$

$$R^2=0,65$$

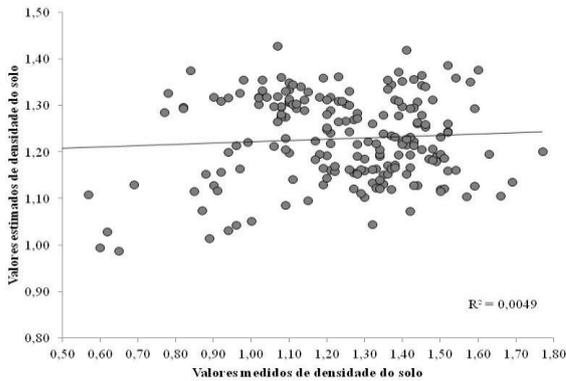
Modelo gerado



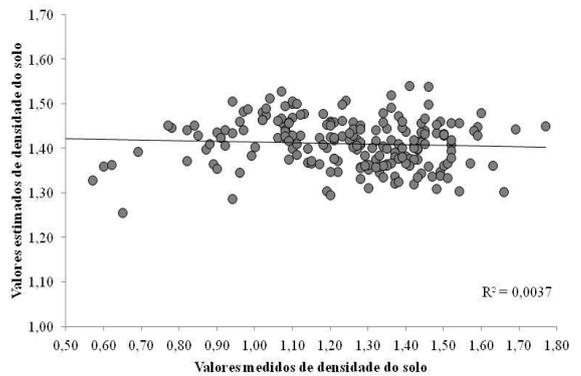
Benites et al. (2007)



Tomasella and Hodnett (1998)



Bernoux et al. (1998)



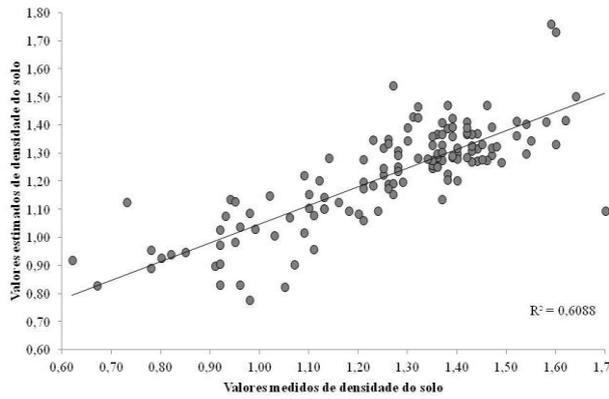
Modelo	MPE	MAE	RMSPE	R²
Modelo gerado	0,01	0,11	0,14	0,60
Benites et al. (2007)	0,13	0,20	0,26	0,06
Tomasella & Hodnett (1998)	-0,01	0,20	0,24	0,005
Bernoux et al. (1998)	0,17	0,22	0,29	0,004
Referência	0	0	0	1

❖ 75% (T) – 25% (V)

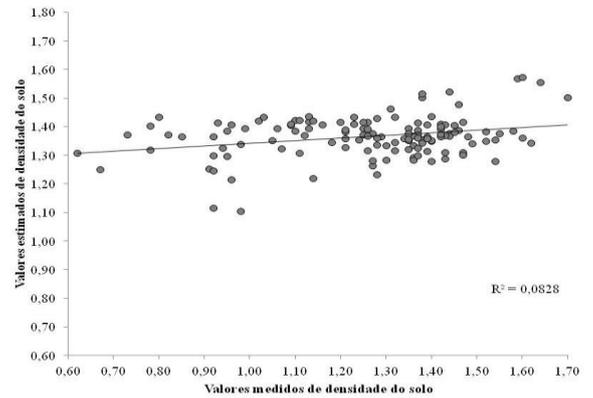
$$Ds = 0,679 - 0,147 (\ln COT) - 0,088 (\ln H^+) + 0,011 (pH^2 - 1/2) - 0,002 (AT^{0,6} - 1/0,6) - 0,023 (Al^{0,6} - 1/0,6) - 0,046 (\ln SB)$$

$$R^2 = 0,65$$

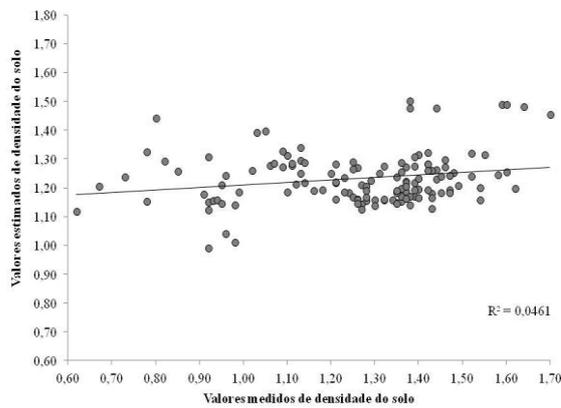
Modelo gerado



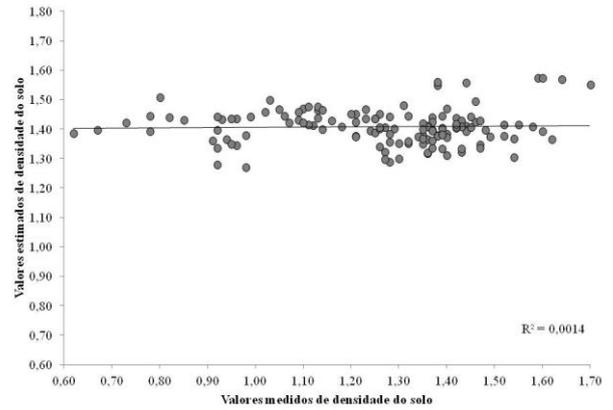
Benites et al. (2007)



Tomasella and Hodnett (1998)



Bernoux et al. (1998)



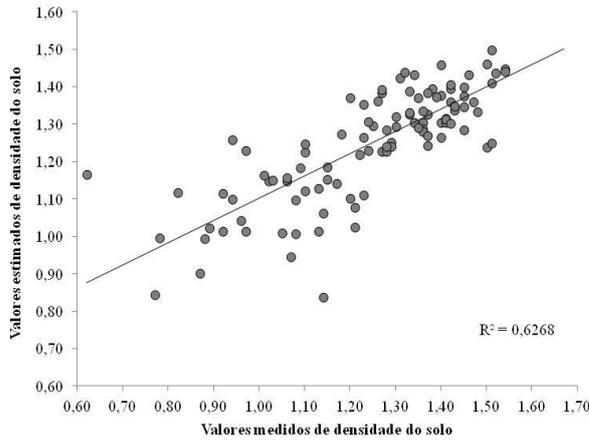
Modelo	MPE	MAE	RMSPE	R ²
Modelo gerado	-0,04	0,11	0,14	0,61
Benites et al. (2007)	0,11	0,17	0,24	0,08
Tomasella & Hodnett (1998)	-0,03	0,19	0,22	0,05
Bernoux et al. (1998)	0,15	0,19	0,27	0,001
Referência	0	0	0	1

❖ **80% (T) – 20% (V)**

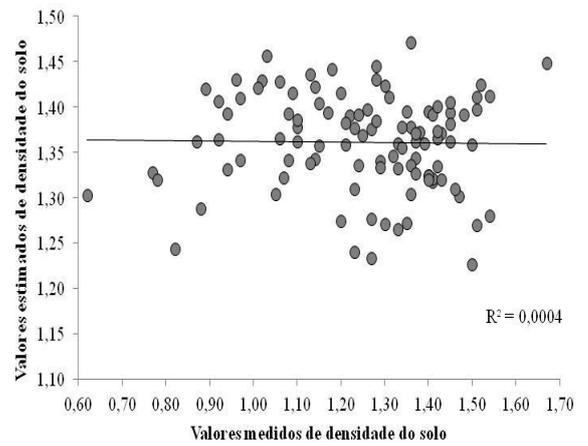
$$D_s = 0,647 - 0,141(\ln \text{COT}) - 0,086(\ln H^+) - 0,042(\ln \text{SB}) + 0,036(\text{pH}^{0,9} - 1/0,9) - 0,005(\text{AT}^{0,4} - 1/0,4) - 0,03(\text{Al}^{0,7} - 1/0,7) + 0,001(\text{Argila}^{0,7} - 1/0,7)$$

$$R^2 = 0,63$$

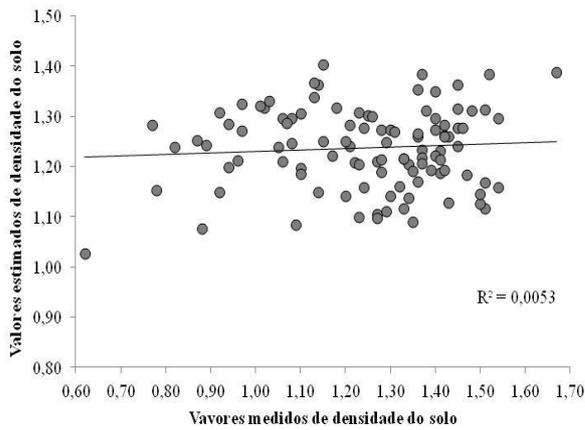
Modelo gerado



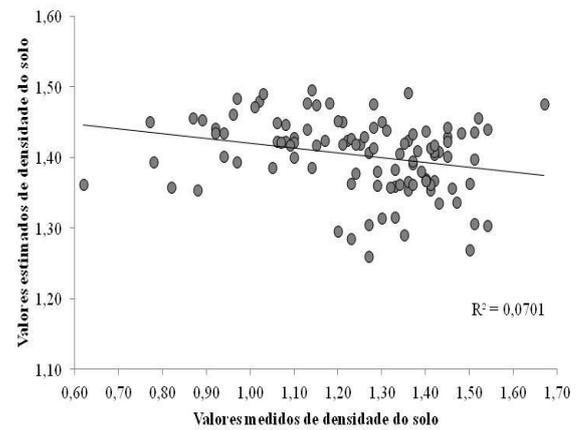
Benites et al. (2007)



Tomasella and Hodnett (1998)



Bernoux et al. (1998)



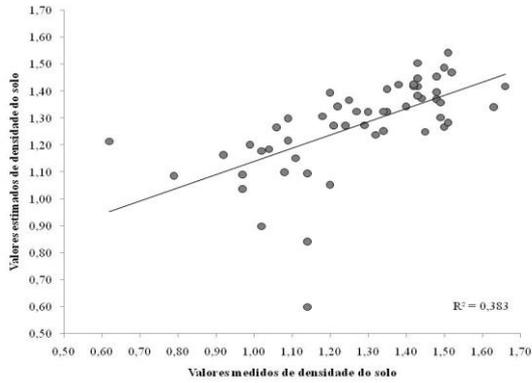
Modelo	MPE	MAE	RMSPE	R ²
Modelo gerado	0,00	0,09	0,12	0,63
Benites et al. (2007)	0,11	0,18	0,24	0,0004
Tomasella & Hodnett (1998)	-0,01	0,18	0,21	0,005
Bernoux et al. (1998)	0,16	0,20	0,27	0,07
Referência	0	0	0	1

❖ **90% (T) – 10% (V)**

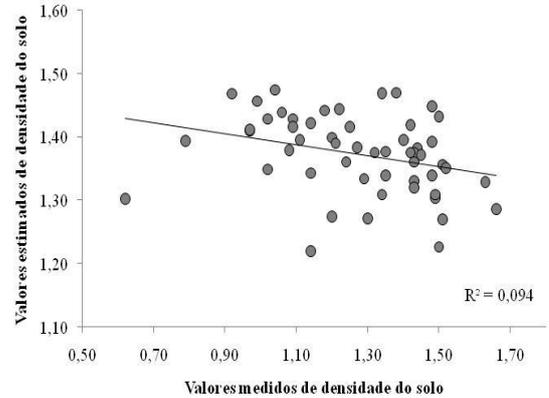
$$D_s = 0,401 - 0,143 (\ln \text{COT}) - 0,086 (\ln H^+) + 0,056 (\text{pH}^{0,8} - 1/0,8) - 0,039 (\ln \text{SB}) - 0,036 (\text{Al}^{0,7} - 1/0,7) + 0,002 (\text{Argila}^{0,7} - 1/0,7) + 0,0001 (\text{Silte})$$

$$R^2 = 0,65$$

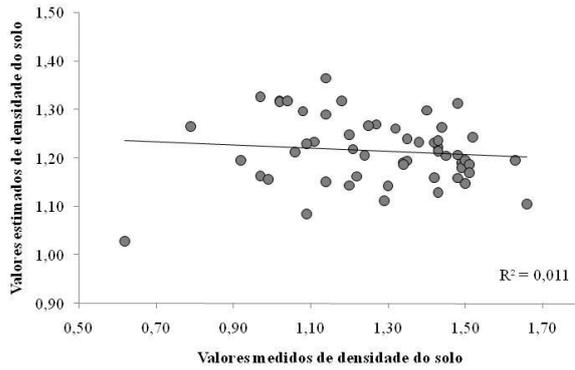
Modelo gerado



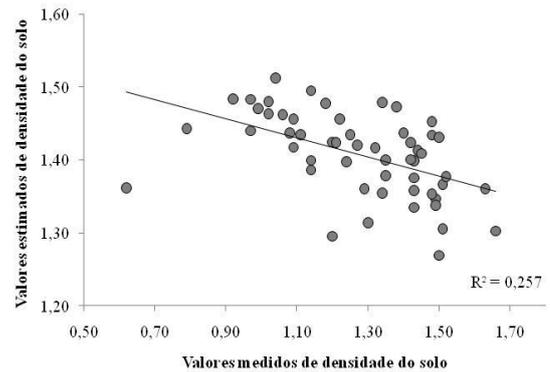
Benites et al. (2007)



Tomasella and Hodnett (1998)



Bernoux et al. (1998)



Modelo	MPE	MAE	RMSPE	R ²
Modelo gerado	0,00	0,13	0,17	0,38
Benites et al. (2007)	0,10	0,20	0,26	0,09
Tomasella & Hodnett (1998)	-0,06	0,21	0,24	0,01
Bernoux et al. (1998)	0,13	0,22	0,28	0,26
Referência	0	0	0	1

Anexo C – Resultado do teste T para comparação de médias.

❖ Conjunto de dados Completo comparado ao de Treinamento

Informação	Valor
T	-0,0103
Graus de Liberdade	9328
P-valor	0,9917
Média no conjunto de dados completo	102,4745
Média no conjunto de dados de treinamento	102,5122
Desvio padrão amostral do conjunto de dados completo	174,0552
Desvio padrão amostral do conjunto de dados de treinamento	174,8032
Desvio padrão agrupado:	174,3875
Hipótese Alternativa: Diferente de	0
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	-7,1608
Limite Superior	7,0855

Como o p-valor é 0,9917, portanto, maior que 5%, aceitamos a hipótese nula de igualdade das médias das duas populações, a um nível de 95% de confiança.

❖ Conjunto de dados Completo comparado ao de Validação

Informação	Valor
T	0,0252
Graus de Liberdade	6238
P-valor	0,9798
Média no conjunto de dados completo	102,4745
Média no conjunto de dados de validação	102,3260
Desvio padrão amostral do conjunto de dados completo	174,0552
Desvio padrão amostral do conjunto dados de validação	171,1560
Desvio padrão agrupado:	173,5710
Hipótese Alternativa: Diferente de	0
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	-11,3654
Limite Superior	11,6624

Como o p-valor é 0,9798, portanto, maior que 5%, aceitamos a hipótese nula de igualdade das médias das duas populações, a um nível de 95% de confiança.

❖ **Conjunto de dados de Treinamento comparado ao de Validação**

Informação	Valor
T	0,0309
Graus de Liberdade	5188
P-valor	0,9753
Média no conjunto de dados de treinamento	102,5122
Média no conjunto de dados de validação	102,3260
Desvio padrão amostral do conjunto de dados de treinamento	174,8032
Desvio padrão amostral do conjunto de dados de validação	171,1560
Desvio padrão agrupado:	174,0719
Hipótese Alternativa: Diferente de	0
Intervalo de Confiança	95%
Limite Inferior	-11,6052
Limite Superior	11,9776

Como o p-valor é 0,9753, portanto, maior que 5%, aceitamos a hipótese nula de igualdade das médias das duas populações, a um nível de 95% de confiança.