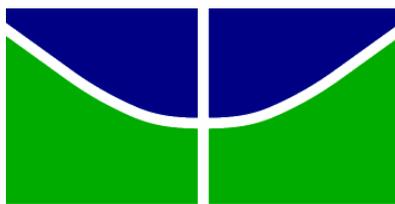


UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO ESTIMADO POR
REGRESSÃO GEOGRAFICAMENTE PONDERADA NA BACIA DO
SARANDI - DF**

ELTON SOUZA OLIVEIRA

**Brasília - DF
2015**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO ESTIMADO POR
REGRESSÃO GEOGRAFICAMENTE PONDERADA NA BACIA DO
SARANDI - DF**

Elton Souza Oliveira

Orientador: Dra. Adriana Reatto

Co-orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig

Dissertação de Mestrado apresentada à Banca Examinadora do Instituto de Geociências Aplicadas (Geoprocessamento e Análise Ambiental) da Universidade de Brasília, como exigência para obtenção do título de mestre em Geociências Aplicadas.

Brasília - DF

2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Instituto de Geociências

**ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO ESTIMADO POR
REGRESSÃO GEOGRAFICAMENTE PONDERADA NA BACIA DO
SARANDI - DF**

Elton Souza Oliveira

BANCA EXAMINADORA

Presidente

Dra. Adriana Reatto dos Santos Braga

Dra. Arminda Moreira de Carvalho

Membro Interno

Dr. Gustavo Macedo de M. Baptista

Membro Externo

Brasília, 06 de Julho de 2015

A Bruna, que sempre me apoiou nessa
jornada.

E aos meus orientadores que sempre
me deram todo o suporte.

“Há três espécies de cérebros: uns entendem por si próprios; os outros discernem o que os primeiros entendem; e os terceiros não entendem nem por si próprios nem pelos outros; os primeiros são excelentíssimos; os segundos excelentes; e os terceiros totalmente inúteis.”

Nicolau Maquiavel

AGRADECIMENTOS

Ao longo dessa jornada várias pessoas foram importantes para que esse processo se consolidasse e se mostrasse verdadeiramente importante. Meus mais sinceros agradecimentos vão aos meus orientadores, professor Henrique Llacer Roig e dra. Adriana Reatto. Cada um contribuiu a sua maneira com o desenvolvimento desse trabalho. Serei eternamente grato as horas de discussões com a dra. Adriana e as proposições sugeridas pelo professor Henrique, que mais do que me orientar me estimulou a querer sempre mais e a ter uma visão mais clara sobre a temática trabalhada.

Além dos meus orientadores, outras pessoas merecem minha gratidão. Minha companheira e amiga – Bruna Cardoso – que sempre acreditou nos meus objetivos e nunca me deixou recuar ou desistir. Não poderia esquecer também do Lucas Ramalho, aluno e colega que me auxiliou nos campos e nas análises em laboratório.

Deixo ainda meus agradecimentos, ainda, ao João Paulo Sena Souza pelas contribuições dadas ao me ajudar na discussão dos dados e em etapas importantes do trabalho. Não poderia esquecer também da pessoa que me fez querer viver a ciência, que me ensinou o que era a pesquisa e como deveria trata-la, serei eternamente grato aos ensinamentos do Dr. Euzebio Medrado da Silva.

Nesse momento fica então os meus mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que participaram diretamente e indiretamente desse processo.

ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO ESTIMADO POR REGRESSÃO GEOGRAFICAMENTE PONDERADA NA BACIA DO SARANDI – DF

Elton Souza Oliveira

RESUMO

O conhecimento da variabilidade espacial e temporal do estoque de carbono no solo (ECS) e sua espacialização são fundamentais no monitoramento da emissão dos gases do efeito estufa para sua mitigação, bem como indicadores de qualidade do solo para os pagamentos por serviços ambientais. Por outro lado, nem sempre são evidentes quais fatores controlam os ECS, tais como: classes de solos, propriedades do solo (textura, por exemplo), relevo, cobertura vegetal e uso da terra, nem tão pouco, muitos desses estudos são realizados em parcelas experimentais. Portanto, muito pontuais restringindo a utilização do dado apenas localmente, não permitindo sua extrapolação e espacialização. Nesse contexto, há uma demanda crescente pela quantificação do ECS utilizando técnicas que demandem menor tempo, recursos financeiros, esforço amostral e que levem em consideração o comportamento dos ECS na etapa de espacialização da informação. A modelagem dos ECS pode ser uma alternativa em ambientes com diversidade de variáveis que contribuem com os estoques de carbono no solo, tais como: classe de solo, uso e cobertura vegetal do solo, geomorfologia e etc. Assim, por meio da literatura, esse trabalho aprimorou as discussões a respeito dos componentes da paisagem que exercem maior influência nos estoques de carbono no solo. Estabelecidas essas variáveis na área experimental do estudo, foram realizados os testes de modelagem espacial por meio da Regressão Geograficamente Ponderada (*Geographically Weighted Regression – GWR*). A GWR em conjunto com outras etapas de análise foi adequada para estimar com excelente precisão os estoques de carbono no solo nas profundidades 0-20 cm (R^2 : 0,96), 20-40 cm (R^2 : 0,90), 40-60 cm (R^2 : 0,90), 60-80 cm (R^2 : 0,98) e 80-100 cm (R^2 : 0,96) além de ter sido útil para reduzir custo e tempo no levantamento dos ECS e elucidar questões referentes a limitações de coleta de dados e espacialização da informação.

Palavras-chave: Modelagem, Mapeamento, Serviços Ambientais, Gestão e Planejamento Ambiental, Carbono Orgânico.

CARBON STOCKS IN SOIL ESTIMATED IN GEOGRAPHICALLY WEIGHTED REGRESSION IN SARANDI BASIN – DF

Elton Souza Oliveira

ABSTRACT

The knowledge of the spatial and temporal variability of the stock of carbon in the soil (ECS) and their spatial distribution are critical in monitoring the emission of greenhouse gases to mitigate them, as well as soil quality indicators for payments for environmental services. On the other hand, they are not always obvious which factors control the ECS, such as soil types, soil properties (texture, for example), relief, vegetation cover and land use, nor many of these studies are conducted in experimental plots. So very punctual restricting the use of data only locally, not allowing their extrapolation and spatial. In this context, there is a growing demand for quantification of ECS using techniques that require less time, financial resources, sampling effort and taking into account the behavior of ECS in the spatial phase information. The modeling of ECS may be an alternative in environments with diverse variables that contribute to the carbon stocks in the soil, such as soil type, use and soil cover, geomorphology and etc. Thus, through literature, this work has enhanced the discussions of the landscape components that have more influence in carbon stocks in the soil. Given these variables in the experimental area of study, spatial modeling tests were performed by Geographically Weighted Regression (Geographically Weighted Regression - GWR). The GWR together with other stages of analysis was adequate to estimate with great precision the carbon stocks in the soil depths 0-20 cm (R^2 : 0.96), 20-40 cm (R^2 : 0.90), 40- 60 cm (R^2 : 0.90), 60-80 cm (R^2 : 0.98) and 80-100 cm (R^2 : 0.96) as well as being helpful in reducing cost and time in the survey of ECS and clarify issues concerning the limitations of data collection and spatial information.

Key words: Modeling, Mapping, Environmental Services, Environmental Management and Planning, Organic Carbon.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	15
1.2. OBJETIVOS.....	16
1.2.1. Objetivo Geral.....	16
1.2.2. Objetivos Específicos.....	16
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
1.4. REFERÊNCIAS	17
2. ESTOQUES DE CARBONO DO SOLO SEGUNDO OS COMPONENTES DA PAISAGEM	21
2.1 Introdução.....	22
2.2. Estoques de Carbono do solo.....	23
2.3. O carbono orgânico e as propriedades do solo	26
2.4. O carbono orgânico e o relevo.....	28
2.5. O carbono orgânico e a cobertura vegetal e uso do solo	29
2.6. O carbono orgânico e as classes de solos	32
2.7. Considerações finais.....	34
2.8. REFERÊNCIAS	36
3. QUANTIFICAÇÃO VERTICAL DOS ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO SARANDI-DF	46
3.1. Introdução.....	47
3.1.1. Técnicas de amostragem de solo.....	48
3.1.2. Técnicas para análise de carbono no solo	50
3.1.3 Relação entre o quantitativo amostral e a área de estudo	51
3.2. Etapas e Métodos.....	52
3.2.1. Variação vertical dos estoques de carbono no solo na bacia do Sarandi-DF.....	52
3.3. Resultados e Discussões	56
3.4. Considerações finais.....	60

3.4. REFERÊNCIAS	62
4. ESPACIALIZAÇÃO DOS ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO EM UMA BACIA EXPERIMENTAL NO BIOMA CERRADO	70
4.1. Introdução	72
4.2. Etapas e métodos	75
4.2.1. Área de estudo.....	75
4.2.2.1. Construção da base de dados.....	79
4.2.2.2. Geração das variáveis morfométricas	79
4.2.2.3. Aquisição dos dados pedológicos	80
4.2.2.4. Regressão Geograficamente Ponderada (GWR).....	81
4.2.2.5. Validação.....	85
4.3. Resultados.....	85
4.4. Discussão	95
4.5. Considerações finais	96
4.5. REFERÊNCIAS	97
5. CONCLUSÕES FINAIS.....	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo global do carbono com estoques (Pentagrama C = 1 Gt C) nos diferentes compartimentos da Terra e fluxos de carbono (em Pg C ano-1).....	23
Figura 2 - Principais processos que influenciam o carbono no solo em regiões de cerrado	23
Figura 3 – Relação entre temas envolvendo trabalhos com temáticas centrais que discutem ou apresentam dados sobre estoques de carbono no solo (período 1982 a 2015).....	35
Figura 4 – Evolução da quantidade de trabalhos que abordam carbono no solo no período de 1982 a 2015.	36
Figura 5 - Localização da bacia hidrográfica do Sarandi.....	53
Figura 6 - Distribuição amostral sobre as classes de solo na bacia do Sarandi-DF.	55
Figura 7 - Valores médios dos estoques de carbono no solo (ECS) em (t ha).....	57
Figura 8 - Áreas de ocorrência de Gleissolo Melânico na bacia do Sarandi.....	59
Figura 9 - Áreas de ocorrência de Gleissolo Háptico na bacia do Sarandi.	61
Figura 10 - Localização da bacia experimental do Sarandi.	76
Figura 11 A - Figura 11 A - Caracterização geral da bacia experimental do Sarandi. Erro! Indicador não definido.	
Figura 11 B - Geomorfologia da bacia do Sarandi –DF. Erro! Indicador não definido.	
Figura 11 C - Geomorfologia da bacia do Sarandi –DF. Erro! Indicador não definido.	
Figura 11 D - Uso e cobertura do solo da bacia do Sarandi –DF. Erro! Indicador não definido.	
Figura 12 - Etapas da aplicação do GWR para modelagem dos estoques de carbono no solo na bacia do Sarandi	83
Figura 13 - Distribuição dos estoques de carbono no solo gerados pela técnica GWR na profundidade de 0-20 cm, na bacia do Sarandi.	86
Figura 14 - Distribuição dos estoques de carbono no solo gerados pela técnica GWR na profundidade de 20-40 cm, na bacia do Sarandi.	88
Figura 15 - Distribuição dos estoques de carbono no solo gerados pela técnica GWR na profundidade de 40-60 cm, na bacia do Sarandi.	89
Figura 16 - Distribuição dos estoques de carbono no solo gerados pela técnica GWR na profundidade de 60-80 cm, na bacia do Sarandi.	92
Figura 17 - Distribuição dos estoques de carbono no solo gerados pela técnica GWR na profundidade de 80-100 cm, na bacia experimental do Sarandi.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Acúmulo ou perda de C do solo na mudança do sistema de plantio (convencional para plantio direto).....	31
Tabela 2 – Estoque de carbono (Kg m ⁻²) das classes de solos encontradas no Acre nas profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm.	33
Tabela 3 – Relação área de estudo x quantitativo amostral.	51
Tabela 4 - Caracterização da bacia do Sarandi quanto as classes: geomorfológica, geológica, pedológica e a cobertura vegetal e uso da terra..	54
Tabela 5 - Intervalo de profundidades utilizadas para coleta de solo e quantitativo de camadas.	55
Tabela 6 - Quantitativo amostral por classes de solo na bacia do Sarandi.....	56
Tabela 7 - Média (\bar{x}) e Desvio padrão (Dp) dos estoques de carbono no solo (ECS – t ha) por camada amostrada.....	58
Tabela 8 - Valor de máximo (Ma), valor de mínimo (Mi) dos estoques de carbono no solo (ECS).....	58
Tabela 9 - Coeficiente de variação (CV%) dos estoques de carbono no solo (ECS).....	58
Tabela 10 - Distribuição das unidades utilizadas para geração do modelo.....	84
Tabela 11 - Dados obtidos pela técnica GWR para a camada de 0-20 cm na bacia do Sarandi.....	87
Tabela 12 - Dados obtidos pela técnica GWR para a camada de 20-40 cm na bacia experimental do Sarandi.....	89
Tabela 13 - Dados obtidos pela técnica GWR para a camada de 40-60 cm na bacia do Sarandi.....	910
Tabela 14 - Dados obtidos pela técnica GWR para a camada de 60-80 cm na bacia do Sarandi.....	93
Tabela 15 - Dados obtidos pela técnica GWR para a camada de 80-100 cm na bacia do Sarandi.....	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais processos que influenciam o carbono no solo..	26
Quadro 2 – Resumo dos métodos para classificação do coeficiente de variação.	59
Quadro 3 – Síntese das variáveis morfométricas utilizadas no estudo.	80

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

Discussões a respeito dos gases de efeito estufa vêm dividindo opiniões na comunidade científica quanto ao fato do processo ser natural ou de origem antrópica.

A busca pelo entendimento do comportamento desses gases, em especial o CO₂, tem direcionado os estudos científicos para o comportamento do ciclo biogeoquímico do carbono. Barnett et al., (2005) apresentam que aproximadamente um quarto das emissões antrópicas de dióxido de carbono esta associada a alteração do uso da terra, principalmente devido ao desmatamento, e o restante a queima de combustíveis fósseis, nos últimos 20 anos.

Alguns estudos demonstram que o carbono orgânico presente no solo possui alta sensibilidade a alterações no uso da terra resultando no seu decréscimo (Jenkinson e Rayner, 1977; Paul et al., 1997). Um dos fatores que contribui para essa redução esta associada à alteração na dinâmica da matéria orgânica no solo, devido o manejo a que o solo é submetido (Bayer et al., 2006). Uma das alternativas para mitigar as reduções nos estoques de carbono esta associada à gestão dos solos e a adoção de medidas agrossustentáveis (Cole et al., 1997).

No Brasil essas medidas vêm sendo tomadas por meio da adoção de boas práticas agrícolas, quais sejam, por exemplo, as adotadas pelo Programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC) do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), buscando incentivar os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF), os sistemas de plantio direto e a recuperação de áreas degradadas (BRASIL, 2012).

Porém, para a quantificação da eficiência dos métodos adotados é preciso o monitoramento dos estoques de carbono no solo, por exemplo. Além da confiabilidade, o monitoramento adotado deve possuir baixos custos, ser eficiente e possuir capacidade de indicar a complexidade dos processos químicos, físicos e biológicos da dinâmica dos estoques de carbono no solo (Lal, 2002).

Várias abordagens vêm sendo propostas, mesmo já existindo modelagens pontuais estabelecidas, entre elas as técnicas de modelagem dinâmica e espacial têm se mostrado promissoras. A modelagem dinâmica vem possibilitando a integração de dados relativos ao uso e cobertura do solo, variáveis químicas do solo, tais como nitrogênio total e acidez do solo, entre outros dados (Leite et al., 2004; Bortolon et al., 2009). Na modelagem dos estoques de carbono do solo uma das técnicas mais utilizada é o modelo Century. Sua aplicação associa-se ao fato de permitir uma análise que considera a variação espaço-temporal em um ambiente de sistema de informação geográfica - SIG (Norgaard, 2004).

Apesar de algumas técnicas já estarem consolidadas, como o modelo Cetry que vem sendo amplamente utilizado (Wendling et al., 2014), outras ferramentas existentes em diversos softwares de SIG podem ser utilizadas para a modelagem desses estoques de carbono no solo. Entre os procedimentos existentes a Regressão Geograficamente Ponderada (*Geographically Weighted Regression – GWR*) em conjunto com outros procedimentos apresentam grande potencial não apenas para modelar, mas também para espacializar os dados, visto que, sua análise se dá por meio da definição de unidades de análise na paisagem.

Admitindo que os estoques de carbono no solo possuam correlação com outras variáveis ambientais, o GWR é capaz de gerar por meio dessas variáveis regressões locais para cada unidade de análise estabelecida. As unidades podem variar desde o limite de uma classe de solo até o limite do agrupamento de diversas variáveis como o tipo de uso sobre uma classe de solo presente em uma determinada geomorfologia.

Nesse contexto, justifica-se a necessidade de estudos que visem à geração de modelagens e disponibilização de mapas e dados com informações sobre a regionalização e extrapolação desses estoques de carbono. Essas informações podem subsidiar ações de planejamento que visem o manejo e conservação de uma determinada área, tendo como um indicador da prestação de serviços ambientais relacionados à qualidade do solo para uma determinada bacia.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar a utilização de técnicas de regressão múltipla espacial na quantificação e espacialização dos estoques de carbono em uma bacia de referência no Bioma Cerrado.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar os componentes da paisagem que podem estar controlando o ECS;
- Apresentar uma revisão sobre os métodos de laboratório para quantificar o carbono orgânico no solo e um estudo de caso: a bacia do Sarandi-DF;
- Quantificar a variabilidade dos estoques de carbono no solo das principais classes de solos em uma bacia experimental no cerrado;
- Espacializar os estoques de carbono no solo em uma bacia experimental no Bioma Cerrado.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação de mestrado, aqui apresentada, segue a estrutura de artigos científicos, composta em três capítulos. No final do trabalho estão apresentadas as conclusões gerais, bem como as considerações finais, descritos a seguir:

- **Capítulo I – Artigo de revisão: ESTOQUES DE CARBONO SEGUNDO OS COMPONENTES DA PAISAGEM.** Este artigo aborda uma revisão teórica acerca da relação dos estoques de carbono no solo com os diversos componentes da paisagem, bem como, a forma com que cada uma dessas variáveis interfere no entendimento dos estoques de carbono no solo. O trabalho foi submetido à revista Caderno de Ciência e Tecnologia.
- **Capítulo II – Artigo 2: CARACTERIZAÇÃO VERTICAL DOS ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO SARANDI-DF.** Apresenta os diversos procedimentos desde a coleta de solo até as técnicas utilizadas em laboratório para aferir os estoques de carbono no solo, além de apresentar resultados preliminares sobre a quantificação dos estoques de carbono no solo na Bacia do Sarandi, localizada no Bioma Cerrado. Revista a ser definida.
- **Capítulo III – Artigo 3: ESPACIALIZAÇÃO DOS ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO NA BACIA EXPERIMENTAL DO SARANDI, NO CERRADO.** Este artigo apresenta a aplicação do método GWR na espacialização e modelagem dos estoques de carbono no solo por meio de ambiente SIG, além de conter as discussões sobre as correlações necessárias para a execução da técnica e o estudo de caso. Revista a ser definida.
- **Considerações Finais** – Apresenta as considerações finais e as ponderações a respeito do trabalho aqui desenvolvido.

1.4. REFERÊNCIAS

BARNETT, T. P.; ADAM, J. C.; LETTENMAIER, D.P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. **Nature**, v. 434, p. 303-309, 2005.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIEKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil Tillage Res**, v. 86, p. 237-24, 2006.

BORTOLON, E. S. O.; MIELNICZUK, J.; TORNQUIST, C. G.; LOPES, F.; FERNANDES, F. F. Simulação da dinâmica do carbono e nitrogênio em um Argissolo do Rio Grande do Sul usando o modelo Century. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1635-1646, 2009.

BRASIL. (2012). Programa ABC. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimento-sustentavel/plano-abc>>. Acesso em: 24 fev. 2013.

COLE, C.V.; DUXBURY J.; FRENEY J.; HEINEMEYER, O.; MINAMI, K.; MOSIER, A.; PAUSTIAN, K.; ROSENBERG, N.; SAMPSON, N.; SAUERBECK, D.; ZHAO, Q. Global estimates of potential mitigation of greenhouse gas emissions by agriculture. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 49, n. 1-3, p. 221-228, 1997.

JENKINSON, D. S.; RAYNER, J. H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science Society of America Journal*, v. 123, p. 298–305, 1977.

LAL, R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. **Environ. Pollution**, v. 116, p. 353-362, 2002.

LEITE, L. F. C.; MENDONÇA, E. S.; MACHADO, P. L. O. A.; FERNANDES FILHO, E. I.; NEVES, J. C. L. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the Century model. **Geoderma**, v. 120, p. 283-295, 2004.

NORGAARD, A. **Spatial modeling of soil organic carbon by linking Century and GIS..** Dissertação (Mestrado) Copenhagen, University of Copenhagen, 2004. 170 f.

PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K.; COLLINS, H.P.; SCHULTHESS, U.; ROBERTSON, G.P.
Soil organic matter in temperate agroecosystems. CRC Press, **Boca Raton**, FL, USA. 1997.

WENDLING, B.; JUCKSH, I.; MENDONÇA, E.S.; ALMEIDA, R.F.; ALVARENGA, R.C.
Simulação dos estoques de Carbono e Nitrogênio pelo Modelo Century em Latossolos, no
Cerrado Brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 2 p. 238-248, 2014.

CAPITULO I

Relação dos estoques de carbono com os componentes da paisagem

Elton Souza Oliveira

Adriana Reatto

Henrique Llacer Roig

Submetido à revista Caderno de Ciência & Tecnologia

2. ESTOQUES DE CARBONO DO SOLO SEGUNDO OS COMPONENTES DA PAISAGEM

Resumo

O conhecimento da variabilidade e espacialização dos estoques de carbono no solo é fundamental para a caracterização e monitoramento de uma dada área em relação a sua qualidade do solo, estabelecidos como um dos indicadores importantes na prestação de serviços ambientais promovidos pelas boas práticas agrícolas. O entendimento dos componentes da paisagem que controlam essa variável ambiental nem sempre é consenso entre os diversos estudos já realizados. Nesse sentido, o presente trabalho contribui com uma revisão teórica exemplificando com discussões e resultados sobre os estoques de carbono no solo segundo os componentes da paisagem.

Palavras Chave: qualidade do solo, serviço ambiental, mudança climática, matéria orgânica, cobertura vegetal, uso do solo.

2. CARBON STOCKS ACCORDING TO COMPONENTS LANDSCAPE

Abstract

Knowledge of the variability and spatial distribution of carbon stocks in the soil is fundamental to the characterization and monitoring of a particular area in relation to its soil quality, established as one of the important indicators in the provision of environmental services promoted by good agricultural practices. Understanding the landscape of components that control this environment variable is not always consensus among the various studies already carried out. In this sense, this paper contributes a theoretical review exemplifying with discussions and outcomes on carbon stocks in the soil according to the landscape components.

Index terms: soil quality, environmental services, climate change, organic matter, vegetation cover, land use.

2.1 Introdução

Ao longo dos últimos anos a comunidade científica vem debatendo os possíveis causadores do efeito estufa. Apesar do embate entre as diversas teorias defendidas vem se destacando a tese de que o aumento dos gases do efeito estufa (GEE) e alterações climáticas são consequência da ação antrópica (WMO, 2010). Segundo Marengo (2007) a ação do homem tem contribuído com o processo de mudanças climáticas por meio da emissão de gases como CO₂, N₂O e CH₄. Fitzsimmon et al., (2003) consideram que as alterações no uso do solo encontram-se entre as principais fontes de emissão de carbono antropogênico para a atmosfera. E Boddey et al., (2012) reportam que o setor agrícola brasileiro contribui com mais de 20% das emissões totais no país.

Há um consenso científico de que os ecossistemas terrestres apresentam importância no ciclo do carbono e que o solo é tido como o maior reservatório de carbono (Silva & Medonça, 2007). Segundo Sleutel et al., (2006), o sequestro do carbono no solo depende de fatores como a cobertura vegetal, as práticas de manejo e os tipos de classes de solo. No Brasil são poucos os dados voltados para estimativa de estoques de carbono. Essa falta de dados deve-se a pequena quantidade de informação disponível sobre a quantidade de carbono orgânico nos solos sob os diversos tipos de uso nas mais diversas regiões do país (Fidalgo et al., 2007). Apesar de iniciativas da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) para disponibilização de dados pedológicos e mapeamento relativo aos estoques de carbono orgânico no solo as informações ainda são preliminares e em escala muito pequena, parcelas experimentais, inviabilizando sua utilização para áreas menores. Em 1981 foi realizado um primeiro esforço de mapear os estoques de carbono no Brasil em função das classes de solos na escala 1:5.000.000 (EMBRAPA, 1981).

Nesse contexto, as informações disponíveis sobre os estoques de carbono no Brasil ainda são insipientes ou em uma escala muito local, em nível de parcela experimental (escala 1:1), ou em um nível territorial (1:5.000.000). Assim, existe uma demanda por informações que contemplem a regionalização e extrapolação dos estoques de carbono para subsidiar ações de planejamento ambiental, com vistas ao manejo e conservação de uma determinada área, onde os estoques de carbono podem colaborar como um indicador da prestação de serviços ecossistêmicos ou ambientais relacionados à qualidade do solo. O presente trabalho contribui com uma revisão teórica exemplificando com discussões e resultados sobre os estoques de carbono no solo segundo os componentes da paisagem.

2.2. Estoques de Carbono do solo

Os principais compartimentos de carbono (C) na Terra são a atmosfera, os oceanos, os ecossistemas compostos pela biota e solo e as formações geológicas devido à presença do carbono mineral e fóssil (Machado, 2005), Figura 1. Pacheco e Helene (1990) apresentam que o total de carbono na Terra estaria em torno de 416 Giga toneladas (1 Gt = 1.000.000.000 t), sendo que 0,05% estaria presente em compostos orgânicos.

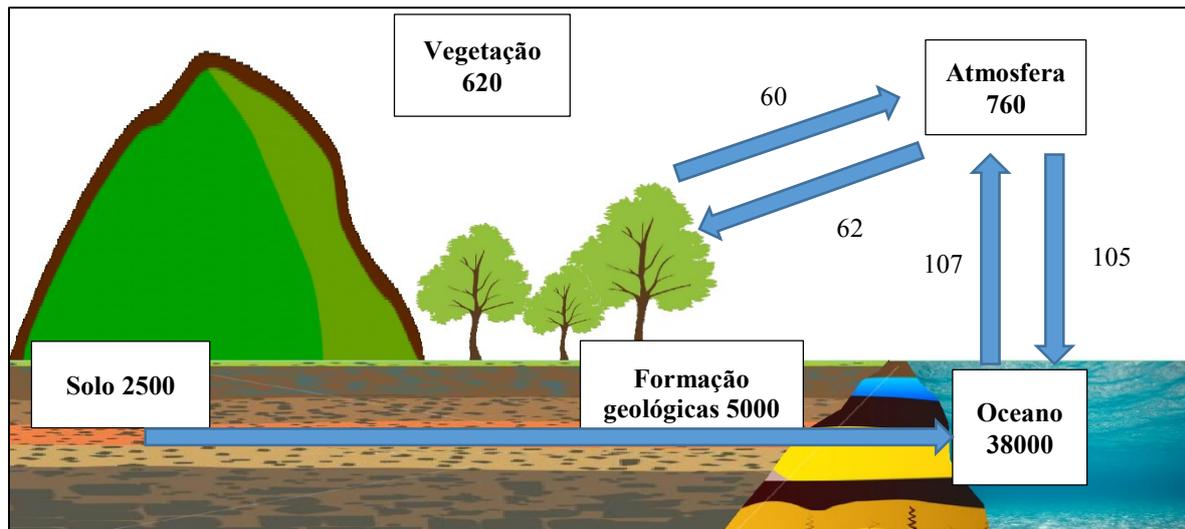


Figura 1. Ciclo global do carbono com estoques (Pentagrama C = 1 Gt C) nos diferentes compartimentos da Terra e fluxos de carbono (em Pg C ano⁻¹). **Fonte:** Adaptado de Machado (2005).

Segundo Machado (2005), o carbono presente no solo corresponde a 2.500 Gt sendo o maior compartimento dessa substância no ecossistema terrestre, excluindo o existente nas formações geológicas, sendo dividido entre uma parte mineral e outra orgânica.

Os solos possuem grande importância no ciclo biogeoquímico do carbono, nesse compartimento armazena-se, aproximadamente, cerca de quatro vezes mais carbono que a biomassa vegetal e mais que três vezes que a da atmosfera, Watson (2001).

O carbono orgânico do solo é proveniente de restos animais e vegetais ou de microrganismos em forma de resíduos em várias etapas de decomposição, materiais carbonizados e compostos humificados (Roscoe & Machado, 2002). Entre os compostos orgânicos aproximadamente 1/3 se encontra na matéria orgânica do solo, na biomassa viva e na água (Boina, 2008).

Vários autores destacam os solos como sendo um dos importantes reservatórios de carbono, na profundidade de até 100 cm, armazenando taxas entre 1300 – 2000 Gt de carbono (Post et al., 1982; Sombroek et al., 1993; Batjes, 1996).

Apesar de diversos trabalhos com enfoque em estoque de carbono do solo (ECS), Bernoux (1998) alerta sobre as incertezas das estimativas, principalmente devido à densidade amostral, variação temporal desses teores e dos métodos utilizados para o seu cálculo. A certeza é que a variação espaço-temporal do ECS para uma determinada área é o saldo líquido entre a entrada e a saída (Mahecha et al., 2010; Resende et al., 2007).

Em relação aos dados sobre os estoques de carbono em áreas de cerrado, os mesmos encontram-se muito fragmentados (Aduam et al., 2003). Isso posto, faz com que em algumas situações sejam utilizados parâmetros produzidos em outras savanas neotropicais. A Figura 2 apresenta os principais processos que influenciam os estoques e fluxos do carbono para a região do Cerrado.

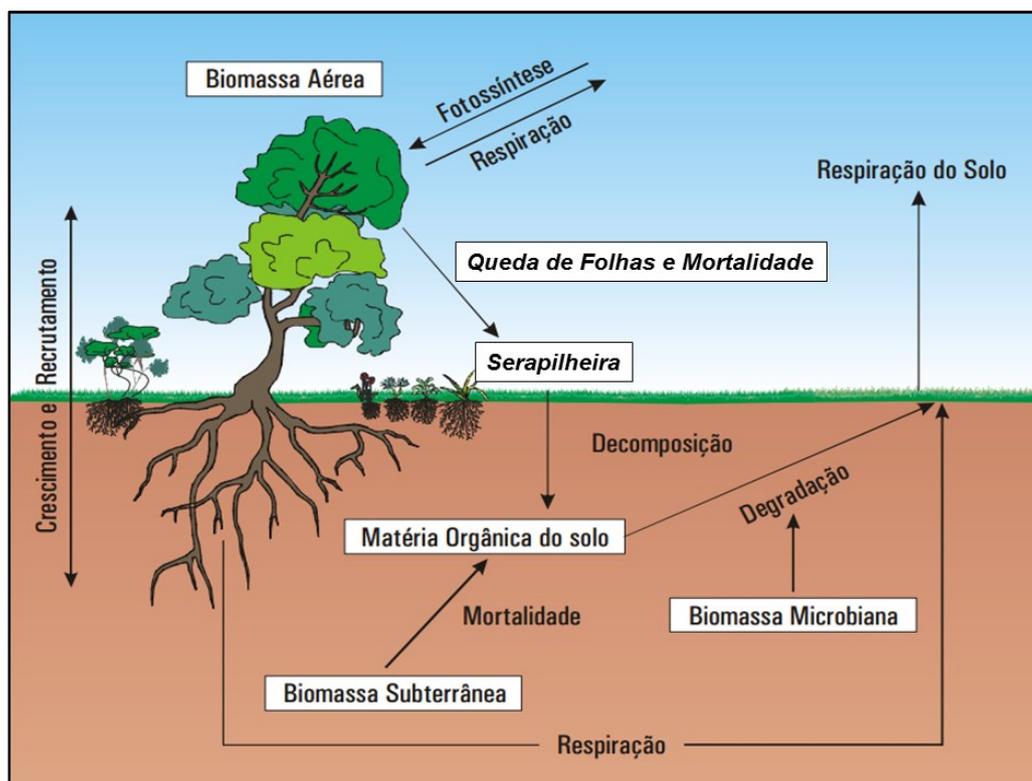


Figura 2. Principais processos que influenciam o carbono no solo em regiões de cerrado.

Fonte: Adaptado de Aduam et al.,(2003).

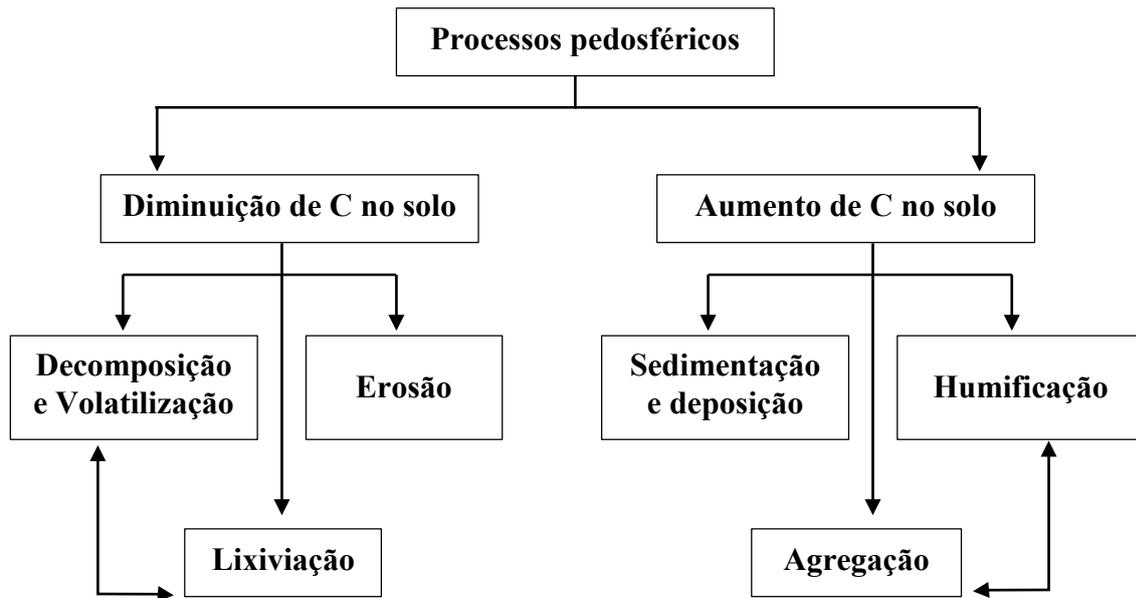
De acordo com Lal et al. (1997) os processos pelo sequestro de C nos solos são a humificação, a agregação e a sedimentação. O processo de humificação - transformação de restos orgânicos em húmus - define-se como decomposição por ação de microrganismos em

detritos vegetais e animais e que se encontra em um estágio mais resistente a novas ações microbianas, consequentemente gerando um acúmulo no solo (Kiehl, 1979). A agregação do solo - resultado do arranjo das partículas - é resultante dos processos de floculação e cimentação (Duiker et al., 2003), contribuindo entre os principais responsáveis pelo sequestro de carbono no solo (Lal et al., 1997). A sedimentação é o processo de acúmulo de materiais provenientes da decomposição em locais onde o ambiente externo perdeu a capacidade de transporte desse material, que podem ser provenientes de outras áreas (alóctones) ou da própria área (autóctones), (Suguio & Bigarella, 1990).

Segundo Paula & Valle (2007) os principais processos responsáveis pelas perdas de C no solo seriam lixiviação, erosão, volatilização e decomposição. Pulrolnik (2009) explica que a lixiviação é um processo físico de remoção de materiais solúveis pela água devido a remoção da serapilheira. A erosão segundo Pruski (2011) consiste no processo de desprendimento e arraste das partículas do solo, ocasionado por fenômenos naturais.

Bayer & Mielniczuk, (2008) consideram entre os fatores abióticos ligados a retenção e/ou acúmulo de C no solo: manejo químico, clima, mecânica do solo e capacidade do solo de proteger a matéria orgânica (MO). Silva et al. (2006) destacam que compartimentos bióticos como a fauna edáfica (micro, meso e macro) são importantes reservatórios de matéria orgânica do solo. Os principais processos que influenciam o carbono no solo também foram descritos por Lal et al. (1997), Quadro 1, atribuindo a diminuição do carbono no solo aos processos de erosão, decomposição, volatilização e lixiviação ocorridos no solo. Enquanto os processos pelo aumento do carbono estariam relacionados a sedimentação, deposição, humidificação e agregação.

Os estudos apresentados evidenciam que muitas variáveis podem atuar como controladoras dos estoques de carbono no solo. Em nível regional, as variáveis climáticas, como temperatura e chuvas exercem grande importância. Em nível local, as propriedades do solo, como densidade e fertilidade são consideradas (Assad et al., 2013). A seguir serão apresentadas algumas relações entre o carbono orgânico e componentes da paisagem.



Quadro 1 - Principais processos que influenciam o carbono no solo.

Fonte: Lal et al., (1997).

2.3. O carbono orgânico e as propriedades do solo

Entre os condutores primários relacionados ao teor de matéria orgânica, em regiões tropicais, destacam-se a estrutura, umidade do solo, manejo, clima e mineralogia (Scott et al., 1996; Zech et al., 1997; Schoenholtz et al., 2000; Telles et al., 2003).

Reeves (1997) atribui o carbono orgânico do solo (COS) como um importante indicador para determinar os padrões de qualidade do solo e isso se explica pela forte relação existente entre esses atributos e os atributos químicos, físicos e biológicos servindo, portanto como um avaliador de sustentabilidade.

Tendo em vista que a matéria orgânica é a principal fonte de COS, Castro Filho et al., (1998) apresentaram a importância da MO em relação aos atributos físicos do solo, contribuindo na melhoria da infiltração, porosidade, armazenamento de água no solo e aeração. Segundo Castro Filho et al. (2002) a agregação do solo é um fator facilitador no aumento dos estoques de carbono orgânico do solo. Essa relação dos índices de agregação do solo com o carbono orgânico também foi apresentada por Neto et al., (2015) ao analisar a variabilidade espacial dessas propriedades, sobre um Neossolo Litótico Eutrófico, verificou a existência de elevada correlação espacial. Neves et al., (2009) constataram que o COS contribui com os processos de ciclagem da MO além de configurar-se como indicador

de qualidade do solo devido suas características como fonte e dreno de nutrientes do ecossistema.

Aduam et al., (2003) observaram em diversas classes de solos que o teor de argila é um dos atributos físicos determinantes na estabilização da MOS, e os estoques de carbono do solo possuem correlação direta com a mesma, configurando sua importância no controle desses estoques. Zinn et al., (2007a, 2007b) apresentaram que a mineralogia e a textura dos solos exercem maior influência na retenção de carbono orgânico do solo, em áreas tropicais.

Resck et al. (2008) apresentam que o carbono orgânico do solo define-se pelas relações existentes entre vegetação, manejo, clima e drenagem, além de propriedades do solo como mineralogia e textura. Outros estudos descreveram o controle do COS exercido pelos teores de óxidos de Al e Fe em Latossolos sob Cerrado e outros solos tropicais (Barthès et al., 2008).

A relação dos estoques de carbono com a textura do solo também é apresentada por Lal (2007), onde os solos mais arenosos tendem a apresentar maior perda de carbono. Esse fator é explicado devido a fácil lixiviação, menor agregação e baixa atividade das argilas do solo. Já Boddey et al. (2004) destacaram que os maiores valores de estoques de carbono encontram-se em solos de textura mais fina, com maior teor de argila.

Em estudo sobre ECS em plantações de eucaliptos, até profundidade de 100 cm, Gatto et al (2010) relataram que altitude, déficit hídrico e teores de argila e Al são os atributos responsáveis pelas maiores variações do estoque de carbono do solo.

Em sistemas de plantio com espécies arbóreas, Nair et al., (2011) observaram que os estoques de carbono dependem da qualidade do solo e estão diretamente correlacionados com a fração argila-silte. Zinn et al. (2012) também relataram que os teores de COS estão relacionados aos teores de argila em dois levantamentos de solos na região de Minas Gerais (Sul e Serra do Espinhaço Meridional), considerando as profundidades entre 20 e 200 cm seria exercido pelos teores de argila. Rosedo & Rosa (2012) confirmam em seus estudos que a textura, argilosa, pode ser considerada como fator determinante para dificultar as perdas de COS.

Apesar de diversos estudos apresentarem a correlação direta dos ECS com o teor de argila, Saiz et al., (2012) estudando as variações dos ECS, ocasionadas devido as precipitações, identificaram que os teores de areia total foram mais determinantes que os teores de argila. Fator esse explicado devido às características do ambiente, seco e altamente intemperizado. Apesar dos trabalhos apresentarem constantemente que a maior associação

da matéria orgânica do solo se dá por meio dos teores de argila, outros trabalhos, como o de Bruun *et al.*, (2010) apresenta que a proteção da MO do solo está associada ao tipo de argila e os teores de Al e Fe. Zinn *et al.*, (2007a) e Resck *et al.*, (2008) ao estudarem a dinâmica do carbono orgânico do solo já haviam apresentado que as argilas eram responsáveis pela estabilização dos compostos coloidais ou húmicos da matéria orgânica do solo devido a adsorção.

Além das propriedades do solo, fatores como condições climáticas locais, relevo, drenagem e tipo de manejo de solo adotado entre outras variáveis exercem variações nos ECS (Lal, 2005; Smith, 2008). Segundo Neto *et al.*, (2015) perdas de carbono orgânico total podem ser associadas a condições como baixa cobertura vegetal e escoamento superficial da água associadas a movimentação do terreno devido a topografia.

2.4. O carbono orgânico e o relevo

O relevo é um agente integrador nas mais diversas propriedades do solo na paisagem, além de ter correlação direta com a produtividade das culturas, (Marques Jr., 2009). As pequenas variações do relevo podem definir uma maior ou menor taxa de decomposição da M.O., Toledo (2009) e Manfrinato *et al.*, (2002) verificaram uma correlação entre o teor de C e a elevação do terreno. Essa correlação baliza a influência do regime hidrológico sobre a permanência de C e sua migração para áreas rebaixadas no terreno. A variação do carbono orgânico associada ao relevo e outros fatores, foi reportado por Fontana *et al.*, (2014) apresentando a variação em uma topolitossequência em ambientes de Mar de Morros. Os resultados mostraram acréscimo nos teores de carbono orgânico do topo de áreas de encosta em direção à várzea de 18,9 a 36,8 g kg⁻¹.

Olszewski *et al.*, (2007) estimaram os estoques de carbono em unidades geoambientais e observaram que houve um decréscimo nos estoques de carbono das posições mais altas do terreno, 2787 m – Maciço montanhoso do Itatiaia, para as áreas mais baixas, 600 m – Planalto deprimido do Médio Baixo Rio, de 106 t ha⁻¹ para 55 t ha⁻¹.

Já os estudos de Dieleman *et al.*, (2013) em altitudes distintas, de florestas tropicais e pastos, apresentaram as variações de COS entre 4,8 e 19,4 kg C m⁻², com incrementos de 5,1 kg C m⁻² a cada 1.000 metros acrescidos na altitude. Essa investigação concluiu que os solos das florestas tropicais de altitude contêm maior estoque de COS.

2.5. O carbono orgânico e a cobertura vegetal e uso do solo

Diversas são as fontes de carbono orgânico do solo. Tratando-se de ambientes naturais, o carbono é proveniente da vegetação nativa, porém essa realidade se altera quando se trata de ambientes antrópicos. As áreas de pastagens são um exemplo onde o carbono é oriundo da decomposição de resíduos derivados da pastagem presente nas áreas de cultivo (Cerri et al., 1990).

Quando ocorrem alterações nos sistemas naturais, devido à ação antrópica, um desequilíbrio é gerado no sistema. Segundo Cerri et al., (2008) essa mudança afeta diretamente o equilíbrio fazendo com que a quantidade de C inserida no sistema seja menor que a de saída.

Castro Filho et al., (2002) observaram que a mudança no sistema de preparo do solo impacta diretamente os estoques de carbono no solo. A alteração do sistema de preparo convencional para o plantio direto impactou diretamente nos estoques de carbono na profundidade de 0-20 cm, porém na de 0-40 cm não verificaram alteração significativa.

Já em relação à fixação ou remoção do carbono orgânico devido à mudança da cobertura vegetal os estudos são contraditórios. Moraes (1995) observou que a matéria orgânica do solo decresce nos primeiros anos de implantação de pastagens, contudo, esses valores vão aumentando com o tempo até atingirem níveis similares aos testemunhos da área, locais com vegetação de floresta ausente de perturbações significativas. Outros autores encontraram diminuição dos teores de matéria orgânica do solo devido à substituição de áreas naturais por pastagens (Veldkamp, 1994; Camargo et al., 1999).

O manejo do solo também é um vetor das mudanças nos teores de carbono orgânico do solo. Rosset et al., (2014) apresentaram o quanto o manejo é capaz de alterar atributos químicos do solo e os estoques de carbono orgânico total (COT). Em área de plantio de cana sob Latossolo Vermelho, constataram que a sucessão: cana – queima – colheita – aplicação de vinhaça e torta de filtro as perdas de COT foram menores, 44%, em relação à sucessão de manejo: cana – queima – colheita - sem aplicação de resíduos as perdas foram na ordem de 71% de COT.

Estudos sobre a relação dos estoques de carbono em sistemas de plantio direto na região do Cerrado, Corazza et al., (1999), apresentaram valores médios entre 75 a 88 t ha⁻¹ na camada de 0-30 cm de profundidade. Silva et al., (2004) verificaram que a substituição de pastagens naturais no Cerrado por outras espécies de pastagens manejadas não reduzem

os estoques de carbono no solo, fator esse associado a reposição devido ao acúmulo de material orgânico.

Porém, outros autores apontam que a substituição do Cerrado por atividades agropecuárias conduzem à redução dos ECS. Maia et al., (2009) observaram que áreas naturais possuíam $35,21 \text{ Mg ha}^{-1}$ de carbono decrescendo para $33,49 \text{ Mg ha}^{-1}$ após a substituição por pastagens. Siqueira Neto et al., (2009) corroboram com esses dados ao analisar a conversão de áreas de cerradão para pastagens, plantio convencional e direto com teores de carbono no solo de 23 g kg^{-1} nas áreas com pastagens e nas áreas com plantio convencional entre 15 a 23 g kg^{-1} .

Fernandes et al., (1999) constataram essa redução quando substituída a vegetação nativa por pastagens. Os teores de carbono orgânico do solo na camada de 0-40 cm de profundidade quando comparados com as áreas de vegetação nativa, apresentaram menor valor. No estudo a redução foi de 32% do COS em área de Podzol Hidromórfico após a introdução de *Brachiaria decumbens* Stapf. Prain.

Szakács (2003) em estudo sobre sequestro de carbono em solos arenosos de Cerrado sob pastagem comprovou a existência de variação dos estoques de carbono. Os valores foram de $22,41 \text{ t ha}^{-1}$, $12,81 \text{ t ha}^{-1}$ e $7,7 \text{ t ha}^{-1}$, correspondentes a pasto degradado, significativamente degradado e moderadamente degradado. Os resultados demonstraram que a variação estava diretamente ligada ao manejo da pastagem.

Rangel e Silva (2007) ao conduzirem experimento sobre estoque de Carbono Orgânico (CO) em Latossolo na profundidade de 10-20 cm, em três tipos de cobertura vegetal, reflorestamento com pinus, eucalipto e área de mata nativa, observaram que os valores de CO das áreas de reflorestamento com pinus e eucaliptos estiveram acima dos valores apresentados no sistema mata nativa. O reflorestamento com pinus apresentou $30,60 \text{ t ha}^{-1}$, eucalipto $26,27 \text{ t ha}^{-1}$ e mata nativa $16,20 \text{ t ha}^{-1}$.

Bayer et al., (2006) demonstraram essa variação ao estudarem o comportamento dos estoques de carbono em um Latossolo Vermelho em região de Cerrado, a 0-20 cm de profundidade, com diferentes usos: sistema de plantio direto ($57,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$), sistema de plantio convencional ($54,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$) e vegetação nativa ($54,0 \text{ Mg C ha}^{-1}$).

Neves et al., (2009) estudando os indicadores biológicos da qualidade do solo em cinco sistemas distintos de uso, tais como: cerrado nativo, eucalipto + arroz, eucalipto + soja, eucalipto + pastagem e eucalipto + pastagem + gado de corte, nas profundidades de 0-5, 5-20 e 20-40 cm observaram uma tendência de redução nos teores de COS com o aumento da

profundidade do solo, fator este, explicado devido à presença de maior quantidade de resíduos orgânicos nas camadas mais superficiais.

De acordo com Houghton (2010) tanto o uso da terra quanto as mudanças no seu uso influenciam nos estoques de carbono no solo. Mitra (2005) ainda apresenta que os estoques de carbono no solo, em sistemas naturais, são formados pelo processo de fotossíntese, devido ao ganho de carbono, através dos fluxos de CH₄ (metano) e CO₂ (dióxido de carbono).

Nair et al., (2011) verificaram que histórico de uso da terra encontra-se entre um dos fatores preponderantes para a determinação dos estoques de carbono dos solos, o uso determina a qualidade do material que servirá de aporte para acúmulo ou perda do carbono. Assad *et al.*, (2013) constataram que as práticas de manejo adequadas podem promover aumento nos ECS.

Devido à estreita relação do carbono com a matéria orgânica muitos desses estudos são realizados apenas nas primeiras camadas do solo. Ao analisar a mudança do plantio convencional para o plantio direto, nos mais diversos estudos, é possível verificar que os valores de acúmulo ou perda de carbono são distintos conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Acúmulo ou perda de C do solo na mudança do sistema de plantio (convencional para plantio direto).

Local	Classe de solo	Culturas*	Camada (cm)	Tempo (anos)	Taxa de C (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Referência
--REGIÃO DE CERRADO--	Latossolo Vermelho	S/T	0-20	15	+0,50	CORAZZA et al. (1999)
	Latossolo Vermelho	S/T	0-40	15	+0,80	CORAZZA et al. (1999)
	Latossolo	S/P-M/P	0-20	8	+0,30	BAYER et al. (2006)
REGIÃO SUL	Latossolo	S/T	0-20	22	+0,31	MACHADO; SILVA (2001)
	Latossolo	S/T	0-40	22	-0,17	MACHADO; SILVA (2001)

Latossolo Vermelho	S/T/M	0-40	21	0,00	CASTRO FILHO et al. (2002)
Latossolo Vermelho	S/T-S/A-M/T	0-40	22	+0,90	SÁ et al. (2001)
Cambissolo húmico álico	M-S/T-A	0-20	8	+1,00	BAYER; BERTOL (1999)
Latossolo Vermelho	S/T	0-20	11	+0,59	MACHADO; SILVA (2001)
Latossolo Vermelho	S/T	0-40	11	+0,29	MACHADO; SILVA (2001)

* A: aveia; S: soja; E: eleusine; M: milho; T: trigo; P: pasto.

Os dados apresentam contradição em relação às diferenças entre os teores de COS. Para uma mesma produção e deposição de biomassa ao solo, o teor de COS pode variar de acordo com a qualidade do material aportado e a influência de diversos fatores sobre a microbiota do solo (Costa et al., 2009).

O aporte de estoques de carbono considerando a quantidade e qualidade do material deixado no solo em cultivos de frutas tropicais, banana e citrus diferiram (Guimarães et al., 2014). As áreas cultivadas com banana apresentaram acréscimo no COT de 14%, enquanto as de citros perdas de COT da ordem de 38% em relação a áreas de florestas nativa.

Em geral, os efeitos no ECS quanto à conversão de áreas naturais para uso agropecuário na região do Cerrado ainda carece de estudos, (Bayer et al., 2010). Esses autores evidenciam para a problemática desses estudos serem conduzidos nas profundidades iniciais, 0-30 cm, sendo a recomendação no mínimo até 1 metro em áreas de pastagens e lavouras.

2.6. O carbono orgânico e as classes de solos

As classes de solo contemplam em sua classificação diversas características capazes de explicar parte dos processos controladores do carbono orgânico e o seu respectivo estoque de carbono no solo.

Em estudos sobre a matéria MOS na região do Oeste da Bahia, a 0-15 cm de profundidade, Silva et al., (1994) verificaram que durante o cultivo de soja ao longo de cinco anos os teores de MOS apresentaram um decréscimo variando com cada classe de solo estudada. Os decréscimos estão associados as variações de textura dessas classes de solos: 80% para o Neossolo Quartzarênico, 76% para o Latossolo Vermelho-Amarelo (15% - 30% de argila) e de 41% para o Latossolo Vermelho-Amarelo (argila > 30%).

Melo (2003) em estudo no Acre estimou os estoques de carbono dos diversos solos da região: Argissolos, Luvisolos, Cambissolos, Latossolos, Alissolos e solos Hidromórficos. Os resultados apontaram que os Argissolos tenderam a perder mais carbono com a mudança do uso e cobertura da terra em relação aos outros solos estudados. Nesse mesmo estudo, ainda foi possível aferir que as maiores concentrações de carbono encontravam-se sobre os Luvisolos, Tabela 2.

Tabela 2 – Estoque de carbono (kg m^{-2}) das classes de solos encontradas no Acre nas profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm.

Classes de solo	C (kg m^{-2})	
	0-30 cm	0-100 cm
Luvisolos Crômicos	4,7	7,5
Luvisolos Hipocrômicos	4,4	7,1
Cambissolos Háplicos Ta Eutróficos	3,7	5,9
Cambissolos Háplicos Ta Distróficos	3,4	6,9
Cambissolos Háplicos Tb Distróficos	4,7	6,4
Argissolos Vermelhos Distróficos	3,6	6,8
Argissolos Amarelos Distróficos	3,5	5,8
Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos	3,0	6,1
Alissolos Crômicos	3,6	6,8
Alissolos Hipocrômicos	3,8	7,8
Gleissolos Háplicos Ta Eutróficos	3,2	6,3
Gleissolos Háplicos Ta Distróficos	5,0	7,4
Latossolos Vermelhos Distróficos	3,3	5,9
Latossolos Amarelos Distróficos	5,0	7,4

Fonte: Adaptado de Melo (2003).

Analisando perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo Háplico (CX) e Latossolo Vermelho (LV) sob chuva natural, Silva et al., (2005) demonstraram que o carbono orgânico do solo varia, sobre efeito de chuvas, de acordo com as características de cada solo, apresentando perdas médias de estoques de carbono orgânico ao longo do ano na ordem de 205,65 Mg ha⁻¹ C (CX, 364 g kg⁻¹ de argila) e 14,90 Mg ha⁻¹ C (LV, 617 g kg⁻¹ de argila).

Chig et al., (2008) ao analisarem diversas propriedades do solo, dentre elas o carbono orgânico, em microbacias na Amazônia meridional, observaram uma variação dos teores médios de carbono orgânico em relação aos solos estudados: Argissolo Amarelo Distrófico plíntico com 22,4% de argila (PAd; 7,90 g kg⁻¹ de C), Plintossolo Pétrico Concrecionário distrófico típico com 28,55% de argila (FFcd; 9,84 g Kg⁻¹ de C), Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico com 27,38% de argila (LVAd; 9,75 g Kg⁻¹ de C) e Latossolo Vermelho Distrófico típico com 31,35% de argila (LVd; 10,33 g Kg⁻¹ de C), para profundidade de 0-20 cm.

Ferreira et al., (2011) avaliando a resistência de agregados em função dos teores de carbono em dois tipos de solo: Latossolo Vermelho distrófico típico classe textural franco-argilo-arenosa (TM) e Latossolo Vermelho distrófico típico classe textural franco-argilosa (TA), encontraram valores distintos de carbono no solo. Para as profundidades de 0-5 e 5-20 cm os valores foram de 17,4 g Kg⁻¹ e 10,7 g Kg⁻¹ para TM, 22,8 g Kg⁻¹ e 17,0 g Kg⁻¹ para TA.

São vários os estudos sobre os estoques de carbono do solo, porém, nem sempre estão associados aos atributos dos solos que o influenciam. Contudo, é possível verificar por meio dos dados apresentados que existe uma variação dos estoques de carbono em função das classes de solo.

2.7. Considerações finais

Diante do exposto, a mensuração dos processos que controlam o fluxo e armazenamento de carbono orgânico no solo requer o entendimento dos fatores primários e secundários que controlam essa variável ambiental.

Mas, esse entendimento nem sempre é consenso entre os diversos estudos realizados. Nesse sentido, as discussões e dados sobre os estoques de carbono no solo no presente estudo permite esclarecer alguns questionamentos. A Figura 3 ilustra um quantitativo dos trabalhos

publicados envolvendo o tema estoque de carbono (período 1982 – 2015) inserido em seus respectivos temas centrais tais como: carbono, carbono no solo, carbono orgânico, ciclagem de carbono, etc.

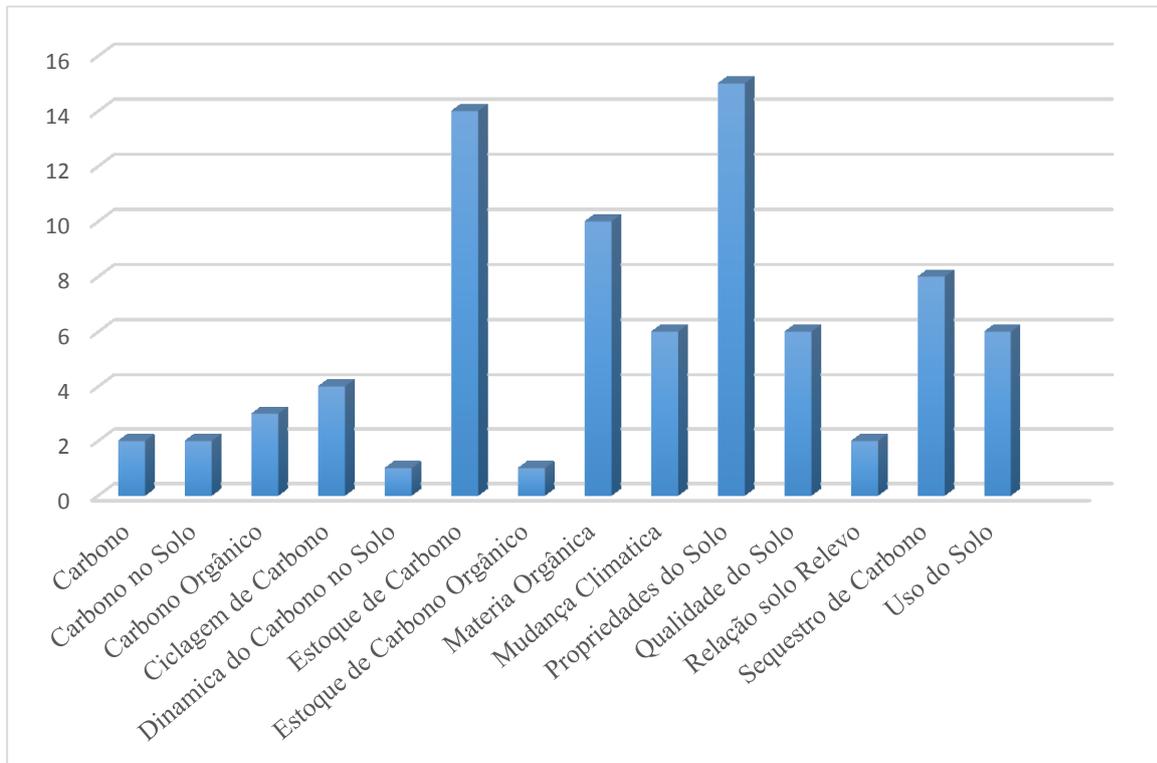


Figura 3. Relação entre temas envolvendo trabalhos com temáticas centrais que discutem ou apresentam dados sobre estoques de carbono no solo (período 1982 a 2015).

Já a Figura 4 apresenta o quantitativo da informação sobre os estoques de carbono no período de 1982 a 2015.

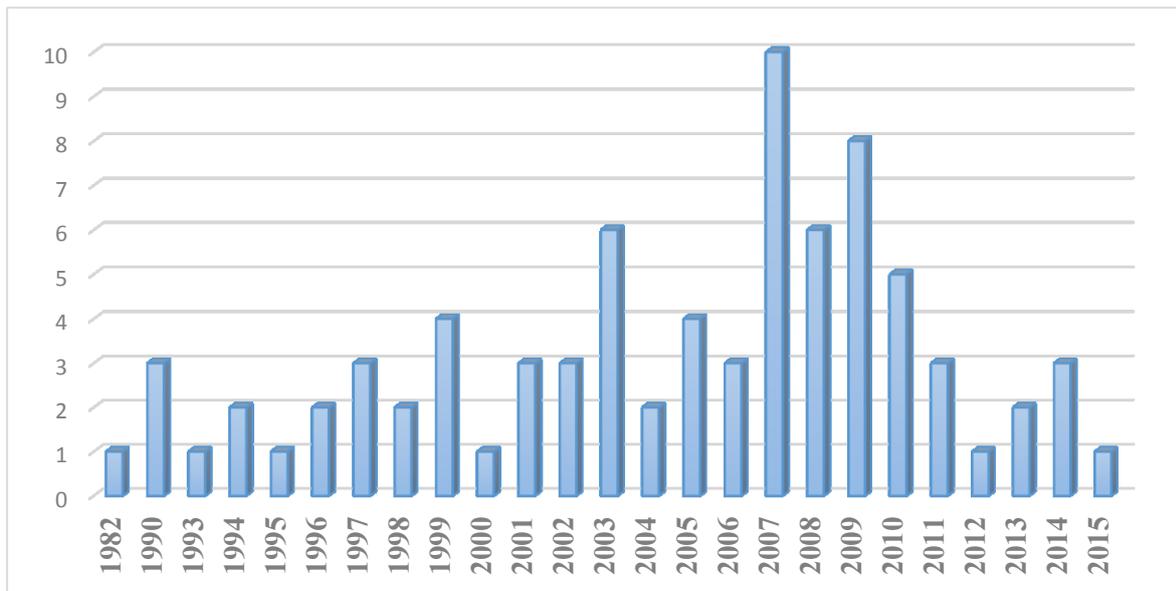


Figura 4. Evolução da quantidade de trabalhos que abordam carbono no solo no período de 1982 a 2015.

Conclui-se que apesar de um volume de informações aqui apresentadas, ainda existe uma demanda por estudos sobre os estoques de carbono no solo e uma aferição sobre qual ou quais fatores controlam e se correlacionam com essa variável ambiental relacionada à qualidade do solo.

2.8. REFERÊNCIAS

ADUAM, R. E.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. Ciclagem de Carbono em Ecossistemas Terrestres – O caso do Cerrado Brasileiro. **Embrapa Cerrados. Documentos**, Planaltina, DF, n. 105, 2003. 30 p.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; MARTINS, S. C.; GROppo, J. D.; SALGADO, P. R.; EVANGELISTA, B.; VASCONCELLOS, E.; SANO, E. E.; PAVÃO, E.; LUNA, R.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences Discussions**, v. 10, p. 5499–5533, 2013.

BODDEY, R.; ALVES, B. J. R., URQUIAGA, S. S. Sequestro de Carbono em Solos Sob Sistemas Agropecuários Produtivos. **Embrapa Agrobiologia. Seropédica**, (Boletim técnico), 2004. 3p.

BODDLEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C. P.; MARTINETO, L.; MADARI, B. E.; MILORI, D. M. B. P.; MACHADO, P. L. O. Estoques de

carbono nos solos do Brasil: quantidade e mecanismos de acúmulo e preservação. In: LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; MACHADO, P. L. O.; URQUIAGA, S. (Eds.). Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira. 33-82p. 2012.

BARTHÈS, B. G.; KOUAKOUA, E.; LARRÉ-LARROUY, M. C.; RAZAFIMBELO, T. M.; LUCA, E. F.; AZONTONDE, A.; NEVES, C. S. V. J.; FREITAS, P. L.; FELLER, C. L. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. **Geoderma**, v. 143, p. 14-25, 2008.

BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um cambissolo húmico afetado por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 687-694, 1999.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, v. 86, p. 237-245, 2006.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre, RS, 1997. cap. 2, p. 7-18.

BAYER, L. B.; BATJES, N. H.; BINDRABAN, P. S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 137, p. 47-38, 2010.

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**. v. 47, n. 2, p. 151-163, 1996.

BERNOUX, M. **Conteúdo de carbono dos solos da Amazônia ocidental e mudanças decorrentes da conversão da floresta em pastagens**. 1998. 98 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo.

BOINA, A. **Quantificação de estoques de biomassa e de carbono em floresta estacional semidecidual, Vale do Rio Doce, Minas Gerais**. 2008. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

BRUUN, T. B., ELBERLING, B.; CHRISTENSEN, B. T.: “Lability of Soil Organic Carbon in Tropical Soils with Different Clay Minerals”, **Soil Biol. Biochem**, v. 42, p. 888–895, 2010.

CAMARGO, P. B.; TRUMBORE, S. E.; MARTINELLI, L. A.; DAVIDSON, E. A.; NEPSTAD, D. C.; VICTORIA, R. L. Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia. **Global Change Biology**, v. 6, n. 5, p. 693-702, 1999.

CASTRO FILHO, C.; LOURENÇO, A.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 65, p. 45-51, 2002.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PADANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotação de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.

CERRI, C. C.; EDUARDO, B. P.; PICCOLO, M. C. Use of stable isotopes in soil organic matter studies. In: International Symposium on the use of stable isotopes in plant nutrition, soil fertility and environmental studies, Viena. **Proceedings**, International Atomic Energy Agency. 1990. p. 247-259.

CERRI, C. E. P.; FEIGL, B.; CERRI, C. C. Dinâmica da matéria orgânica do solo na Amazônia. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. de O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. rev. atual. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 325-358.

CHIG, 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. **Acta Amazonica**, v. 38, n. 4, p. 715-722, 2008.

CORAZZA, E. J.; SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 425-432, 1999.

COSTA, O. V.; CANTARUTTI, R. B.; FONTES, L. E. F.; DA COSTA, L. M.; NACIF, P. G. S.; FARIA, L. M. Estoque de carbono e indicadores de qualidade de solo de tabuleiro sob pastagem no sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1137-1145, 2009.

DIELEMAN, W. I. J.; VENTER, M.; RAMACHANDRA, A.; KROCKENBERGER, A. K.; BIRD, M. I. Soil carbon stocks vary predictably with altitude in tropical forests: Implications for soil carbon storage. **Geoderma**, v. 204-205, p. 59-67, 2013.

DUIKER, S. W.; ROTHON, F. E.; TORRENT, J.; SMECK, N. E.; LAL, R. Iron (hydr)oxide crystallinity effects on soil aggregation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison. v. 67, p. 606-611, 2003.

FERNANDES, F. A.; CERRI, C. C.; FERNANDES, A. H. B. M. Alterações na matéria orgânica de um Podzol hidromórfico pelo uso com pastagens cultivadas no Pantanal Mato-Grossense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 10, p. 1943-1951, 1999.

FERREIRA, A. O.; SÁ, J. C. M.; GIAROLA, N. F. B.; HARMS, M. G.; MIARA, S.; BAVOSO, M. A.; BRIEDIS, C.; NETTO, C. Q. Variação na resistência tênsil de agregados em função do conteúdo de carbono em dois solos na região dos Campo Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 437-445, 2011.

FIDALDO, E. C. C.; BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B. E., COELHO, M. R.; MOURA, I. B.; LIMA, C. X. Estoques de carbono nos solos do Brasil. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**, 2007. 121 p.

FITZSIMMONS, M. J.; PENNOCK, D. J.; THORPE, J. Effects of deforestation on ecosystem carbon densities in central Saskatchewan, Canada. **Forest Ecology and Management**, v.188, p. 349-361, 2003.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; SANTOS, A. C.; BERNINI, T. A. Matéria orgânica de horizontes superficiais em topolitossequências em ambiente de Mar de Morros, Pinheiral, RJ. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 45, n. 2, p. 221-229, 2014.

GATTO, A. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1069-1079, 2010.

GUIMARÃES, D. V.; GONZAGA, M. I. S.; NETO, J. O. M. Management of soil organic matter and carbon storage in tropical fruit crops. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 301-306, 2014.

HOUGHTON, R. A. How well do we know the flux of CO₂ form land-use change? **Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology**, Estocolmo, v. 62B, p. 337-351, 2010.

LAL, R. Carbon management in agricultural soils. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 12, p. 303-322, 2007.

LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, R. F. **Methods for Assessment of Soil Degradation**. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C.; STEWART, B.A. (eds.). CRC Press: Boca Raton. 1. ed, 1997. 576p.

LAL, R. Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, v. 220, p. 242-258, 2005.

MAHECHA, M. D.; REICHSTEIN, M.; CARVALHAIS, N.; LASSLOP, G.; LANGE, H.; SENEVIRATNE, S. I.; VARGAS, R.; AMMANN, C.; ARAIN, M. A.; CESCATTI, A.; JANSSENS, I. A.; MIGLIAVACCA, M.; MONTAGNANI, L.; RICHARDSON, A. D. Global Convergence in the Temperature Sensitivity of Respiration at Ecosystem Level. **Science**, v. 329, p. 838-840, 2010.

MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Soil management under no-tillage systems in the tropics special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 4, p. 119-130, 2001.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 328-334, 2005.

MAIA, S. M. F.; OGLE, S. M.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. **Geoderma**, v. 149, p. 84-91, 2009.

MARQUES JR, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Paulista, Jaboticabal.

MANFRINATO W.; PICCOLO, M. C.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; CERRI, C. E. P. Monitoring carbon stocks in soil of a forest-pasture chronosequence and determining its origin with isotope technology in Guaraqueçaba (PR). International Symposium on Forest Carbon Sequestration and Monitoring, 2002, **Taiwan. Taiwan Forest Research Institute**. p. 1-10.

MELO, A. W. F. **Avaliação do estoque e composição isotópica do carbono do solo no Acre**. 2003. 74 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba – SP.

MITRA, S.; WASSMANN, R; VLEK.; P. L. G. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock. **Current Science**, v. 88, p. 25-35, 2005.

MORAES, J. L.; CERRI, C. C.; MELILLO, J. M.; KICKLIGHTER, D.; NEILL, C.; SKOLE, D. L.; STEUDLER, P. A. Soil carbon stocks of the brazilian Amazon basin. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, n. 1, p. 244-247, 1995.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, Campinas, São Paulo, v. 8, p. 5-28, 2007.

MAPA de solos do Brasil. Rio de Janeiro: **Embrapa-SNLCS**, 1981. 1 mapa, color., 93 cm x 1,20 m. Escala 1:5.000.000.

NAIR, P. K. R.; TONUCCI, R. G.; GARCIA, R.; NAIR, V. D. Silvopasture and carbono sequestration with special reference to the Brazilian Savanna (Cerrado). In: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. (Org.). **Carbon sequestration potential of agroforestry systems: Opportunities and Challenges**. New York: Springer Science. 2011. 326 p.

NEVES, C. M. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MACEDO, R. L. G.; MOREIRA, F. M. S.; D'ANDRÉA, A. F. Indicadores biológicos da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no Noroeste do estado de Minas Gerais. **Ciência Agrotécnica**, v. 33, p. 105-112, 2009.

NETO, F. C. C.; SAMPAIO, F. M. T.; VELOSO, M. E. C.; MATIAS, S. S. R.; ANDRADE, F. R.; LOBATO, M. G. R. Variabilidade espacial dos agregados e carbono orgânico total em Neossolo Litólico Eutrófico no município de Gilbués, PI. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 1, p. 75-83, 2015.

OLSZEWSKI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; COSTA, L. M. da C.; FERNANDES FILHO, E. I. Estimativa do estoque de carbono em unidades geoambientais da bacia hidrográfica do Rio Preto. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 7, n. 2, p. 56-64, 2007.

PACHECO, M. R. S.; HELENE, M. E. M. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂. **Estudos Avançados USP**, v. 9, p. 204-220, 1990.

PAULA, T. A. & VALLE, C. M. **Quantificação do estoque de carbono no solo e a mitigação da mudança climática**. In: II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica João Pessoa – PB, 2007. 10 p.

POST, W. M.; EMANUEL, W. R.; ZINKE, P. J.; STANGENBERGER, A. G. Soil carbon pools and world life zones. **Nature**, v. 298, p. 156-159, 1982.

PULROLNIK, K. Transformações do Carbono no Solo. **Embrapa cerrados. Documentos**, v. 264, 36p, 2009.

PRUSKI, F. F. Prejuízos Decorrentes da Erosão Hídrica e Tolerância de Perdas de Solo. In: PRUSKI, F.F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed. Viçosa, 2011. p. 13.

RANGEL, O. J. P. & SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistema de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1609-1623, 2007.

REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintaining quality in continuous cropping systems. **Soil & Tillage Research**, v. 43, p. 131-167, 1997.

RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S. B. & CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 5. ed. Rev. – Lavras: Editora UFLA, 2007. 322 p.

RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; FIGUEIREDO, C. C.; ZINN, Y. L. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S. da.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. de O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. Ed. Porto Alegre: Metrópole. 2008. cap. 21, p. 359-418.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. Fracionamento físico do solo em estudos de matéria orgânica. **Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, Rio de Janeiro: Embrapa Solos**, 2002. 86 p.

ROSSET, J. S.; SCHIAVO, J. A.; ATANAZIO, R. A. R. Atributos químicos, estoques de carbono orgânico total e das frações humificadas da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de manejo de cana-de-acúcar. **Ciências Agrárias**, v. 35, n. 5, p. 2351-2366, 2014.

SÁ, J. C. M. de.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; VENZKE FILHO, S. P.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. J. Organic mater dynamics and carbono sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. **Soil Science Society of American Journal**, v. 65, p. 1486-1499, 2001.

SCHOENHOLTZ, S. H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J. A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: Challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v. 138, p. 335-356, 2000.

SCOTT, N. A.; COLE, C. V.; ELLIOTT, E. T.; HUFFMAN, S. A. Soil textural control on decomposition and soil organic matter dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 4, p. 1102-1109, 1996.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M. C.; SCOPEL, E.; COSTA JUNIOR, C.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. **Acta scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 4, p. 709-717, 2009.

SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do Oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, p. 541-547, 1994.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; CORAZZA, E. J.; VIVALDI, L. Carbon storage under cultivated pastures in a clayey Oxisol in the Cerrado Region, Brazil. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 103, p. 357-363, 2004.

SILVA, A. M. Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo e Latossolo sob chuva natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 12, p. 1223-1230, 2005.

SILVA, R. F.; AQUINO, A. M.; MERCANTE, F. M.; GUIMARÃES, M. F. Macrofauna invertebrada do solo sob diferentes sistemas de produção em Latossolo da Região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 4, p. 697-704, 2006.

SILVA, I. R.; MEDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.) **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007. p. 275-375.

SLEUTEL, S.; NEVES, S. de; HOFMAN, G. Estimates of carbon stock changes in Belgian cropland. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 19, n. 2, p. 166-171, 2006.

SMITH, P. Land use change and soil organic carbon dynamics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 81, p. 169-178, 2008.

SUGUIO, K.; BIGARELLA, J. J. **Ambientes Fluviais**. Florianópolis: Editora da UFSC. 2 ed. Florianópolis-SC, 1990. 183 p.

SOMBROEK, W. G.; NACHTERGAELE, F. O.; HEBEL, A. Amounts, dynamics and sequestering of carbono in tropical and subtropical soils. **Ambio**, v. 22, n. 7, p. 417-426, 1993.

SZAKÁCS, G. G. J. **Sequestro de carbono nos solos – avaliação das potencialidades dos solos arenosos sob pastagens**. 2003. 126 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP.

TELLES, E. C. C.; CAMARGO, P. B.; MARTINELLI, L. A.; TRUMBORE, S. E.; COSTA, E. S.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C. Influence of soil texture on carbono dynamics and storage potential in tropical forest soils of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 17, n. 2, p. 9.1-9.12. 2003.

TOLEDO, J. J. **Influência do solo e topografia sobre a mortalidade de árvores e decomposição de madeira em uma floresta de terra firme na Amazônia Central**. 2009. 84 f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, Manaus.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 175-180, 1994.

WATSON, R. T. (Ed.). **Climate change 2001: synthesis report: third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University, 2001. 408 p.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; BIGHAM, J. M.; RESCK, D. V. S. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: Soil structure. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 4, p. 1215-1224, 2007a.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; BIGHAM, J. M.; RESCK, D. V. S. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: Texture and mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 4, p. 1204-1214, 2007b.

ZINN, Y. L.; GUERRA, A. R. ; SILVA, A. C. ; MARQUES, J. J ; OLIVEIRA, G. C. & CURI, N. Perfis de carbono orgânico do solo nas regiões sul e serra do Espinhaço meridional, Minas Gerais: modelagem em profundidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1395-1406, 2012.

WMO (World Meteorological Organization). **Statement on the status of the global climate in 2009**. WMO-N° 1055, WMO, Geneva, 2010, 13p.

CAPITULO II

Quantificação vertical dos estoques de carbono no solo: estudo de caso na bacia do Sarandi-DF

Elton Souza Oliveira

Adriana Reatto

Henrique Llacer Roig

Lucas de Sousa Ramalho

Revista a ser definida

3. QUANTIFICAÇÃO VERTICAL DOS ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO SARANDI-DF

Resumo

É certo que os estoques de carbono no solo apresentam variabilidade em função da classe de solo. Porém essa variação se estende a outros fatores além da variação vertical no solo, apresentando valores diferenciados em cada profundidade. Além dos fatores naturais que influenciam na variabilidade dos estoques de carbono no solo, os mesmos, podem ter interferência quanto as técnicas de coleta, procedimentos de laboratório e até mesmo quantitativo amostral, quando espacializados sobre determinada área. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo contribuir com uma revisão teórica sobre as técnicas de amostragem e analítica da caracterização dos estoques de carbono no solo e a quantificação vertical desses estoques de carbono na bacia do Sarandi-DF. A partir dos resultados obtidos foi possível quantificar os estoques de carbono no solo e identificar em cada classe de solo quais profundidades apresentavam maiores concentrações de estoques de carbono no solo, como o Gleissolo Melânico com 54,2 t/ha na profundidade de 20-40 cm, seguido do Gleissolo Háplico 43,8 t/ha na camada 0-20 cm, Gleissolo Melânico com 35,2 t/ha na camada 0-20, Cambissolo com 35,2 t/ha na camada 0-20 cm, os Latossolos Vermelho Amarelo e Amarelo com 32,4 t/ha na camada 0-20 cm e por fim o Latossolo Vermelho com 32,4 t/ha na camada 0-20 cm.

Palavras Chave: Coleta de solos, técnicas de amostragem, mapeamento.

3. VERTICAL CHARACTERISTICS OF CARBON STOCKS ON LAND: A CASE STUDY IN EXPERIMENTAL WATERSHED ON CERRADO

Abstract

It is true that carbon stocks in the soil present variability depending on soil type. But this variation extends to other factors beyond the vertical variation in soil, with different values at each depth. Besides the natural factors that influence the variability of carbon stocks in the soil, they may have interference as the collection techniques, laboratory procedures and even sample quantity when spatialized on a particular area. In this context, this paper aims to contribute a theoretical review of the sampling techniques and analytical characterization of carbon stocks in the soil and the vertical quantification of these carbon stocks in Sarandi-

DF basin. From the results it was possible to quantify carbon stocks in soil and identify each class of soil depths which had higher concentrations of carbon stocks in the soil, such as Melanic Gleisol with 54.2 t / ha at a depth of 20-40 cm, followed by Gleysol Haplic 43.8 t / ha in the 0-20 cm layer, Melanic Gleisol with 35.2 t / ha on 0-20, Cambisol with 35.2 t / ha in the layer 0-20 cm, the latosols Red Yellow and Yellow with 32.4 t / ha in the 0-20 cm layer and finally the Rhodic with 32.4 t / ha in the 0-20 cm layer.

Index terms: Soil collection, sampling techniques, mapping

3.1. Introdução

Na avaliação do manejo e conservação do solo tem-se optado por indicadores de qualidade do solo, os quais devem ser sensíveis às variações de manejo e de clima, possuir fácil mensuração, serem econômicos e úteis para explicar o processo estudado (Doran & Zeiss, 2000).

Uma informação relevante, porém com poucos dados, é o estoque de carbono no solo (ECS). A variação espaço-temporal do ECS para uma determinada área é o saldo líquido entre a entrada e a saída (Mahecha et al.; 2010, Resende et al., 2007). O conhecimento dessa variabilidade e espacialização dos estoques de carbono no solo é fundamental para a caracterização e monitoramento de áreas contribuindo como indicadores importantes na prestação de serviços ambientais.

A variabilidade e espacialização dos estoques de carbono no solo é condicionado por fatores como clima, relevo, classes de solo, tipos de cobertura vegetal e uso da terra, uma vez que as ações em conjunto desses fatores influenciam direta ou indiretamente a ciclagem na matéria orgânica do solo, importante componente para determinação do carbono orgânico do solo e posteriormente quantificação dos estoques de carbono no solo.

Quando o assunto é voltado para estimativas de estoques de carbono, em solos do Brasil, observa-se que são poucos os dados disponíveis. Essa falta de dados deve-se a pequena quantidade de informação disponível sobre a quantidade de carbono orgânico nos solos sob os diversos tipos de uso nas mais diversas regiões do país (Fidalgo et al., 2007).

A quantificação desses estoques e carbono depende de muitas etapas desde os procedimentos diversos amostrais - Santos et al., (2014), Arevalo (2002) e Embrapa (1997) - e os laboratoriais. Walkley & Black, Mebius, Cololimétrico ou Gravimétrico (Sato, 2013).

Apesar da variedade de métodos para definição do CO₂ um dos limitantes para a integração dos dados existentes sobre os estoques de carbono é a incerteza dos métodos que foram utilizados, sejam os procedimentos de campo – quais as técnicas utilizadas para amostrar o solo e qual a experiência de quem executou a atividade - ou até mesmo a forma com que as amostras foram conduzidas e analisadas em laboratório. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo contribuir com uma revisão teórica sobre as técnicas amostrais e analíticas da caracterização dos estoques de carbono no solo e a quantificação vertical desses estoques de carbono na bacia do Sarandi-DF.

3.1.1. Técnicas de amostragem de solo

Uma importante etapa, na maioria dos estudos, e que demanda grande quantidade de tempo e recurso é o trabalho de campo. Segundo Webster & Oliver (1990) esta etapa encontra-se entre as que mais demandam recurso e tempo.

Na amostragem de solo os pontos, em sua maioria, não são definidos de forma aleatória buscando-se atender as especificidades de cada estudo. Além da distribuição dos pontos a definição da técnica de amostragem de solo a ser utilizada depende de fatores tais como: características do solo, finalidade do estudo e até mesmo a experiência de quem irá coletar o solo. Palmer (2002) apresenta em seu trabalho a necessidade de se levar em consideração a profundidade a ser amostrada para definição da técnica a ser utilizada. Além da definição das técnicas que deverão ser utilizadas Byrnes (1994) em seu estudo apresenta que a seleção do material de campo a ser utilizado para amostragem do solo dependerá de fatores como: tipo de amostra a se coletar (deformado ou indeformada), profundidade a ser amostrada e o que serão analisadas nessas amostras.

Nas pesquisas que dependem de amostragem de solo são vários os condicionantes para definição da quantidade de amostras necessárias e do local a ser amostrado. Segundo Medina Satomayor (2009) essa dificuldade não é única, visto que, o grau de precisão desejado e o custo da amostragem são condicionantes de extrema importância no delineamento do plano de amostragem. Apesar da importância da fase de amostragem de solos os esforços geralmente são voltados apenas para a quantificação dos erros provenientes dos tipos de métodos e das análises em laboratório. Nos trabalhos realizados para análise de carbono orgânico no solo e estoques de carbono o mesmo se repete apesar dos procedimentos de campo interferir diretamente nos resultados as pesquisas são geralmente voltadas apenas

para a comparação dos métodos de análise realizados em laboratório (Oliveira, Mendes e Vivaldi, 2011.; Carmo & Silva, 2012.; Sato, 2013).

Apesar da importância dos métodos de análise em laboratório se faz necessário definir um procedimento para amostragem de tal forma que os dados possuam representatividade da variável ambiental que está sendo analisada. A ausência de dados representativos pode acarretar, após as análises em laboratório, a geração de informação equivocada e que não condiz com a propriedade analisada. Segundo Medina Sotomayor (2009) a metodologia utilizada na coleta define se as amostras serão ou não representativas. Nesse sentido, se faz necessário a definição de um desenho amostral. A definição dos locais de amostragem tem por objetivo manter a eficiência e simplicidade nos estudos (IPCC, 1995). Além de buscar a eficiência, a definição dos pontos de coleta pode seguir diferentes metodologias e critérios, conforme apresentado. Os procedimentos para escolha dos pontos de coleta podem ser definidos pelo método sistemático, amostragem ao acaso ou pelo método estratificado (Crépin e Johnson, 1993, Mason, 1992).

Segundo Freese (1962) a amostragem ao acaso fundamenta-se no princípio de que ao se escolher uma amostra de n unidades, cada combinação de n possui igual possibilidade de ser selecionada e sua seleção não pode sofrer influência por outra amostra selecionada. Diferentemente da amostragem ao acaso no método de amostragem estratificado X unidades são inicialmente divididas em subgrupos de $X_1, X_2 \dots, X_n$ unidades e sem sobrepor para compor a totalidade amostrada (Cochran, 1953). Já a amostragem sistemática é realizada seguindo-se critérios sistemáticos. Segundo Crépin e Johnson, (1993) a amostragem nesse método separa as unidades para amostra respeitando distâncias fixas, porém o ponto inicial deve ser definido ao acaso.

A determinação do número de amostras e da metodologia que assegure a obtenção de resultados confiáveis da área a ser analisada proporcionará economia de tempo e dinheiro. Segundo Clay et al., (1999) a intensidade amostral adequada para os diversos ambientes deve ser alta de forma que proporcione alta probabilidade de se estabelecer as relações de causa e efeito. Porém, nos estudos voltados para estoques de carbono verifica-se uma grande quantidade de trabalhos realizados com números diversos de quantidade amostral, fator que se explica pelo tamanho da área, objetivo da pesquisa e até mesmo restrições financeiras.

3.1.2. Técnicas para análise de carbono no solo

Além dos métodos para coleta de amostras de solo as técnicas para análise em laboratório também interferem nos resultados da quantificação do carbono orgânico e posterior definição dos estoques de carbono no solo. Segundo Ferreira (2013) para se definir os teores de carbono em amostras de solo existem diversas metodologias, destacando-se a oxidação por via úmida e a combustão a seco.

O método que utiliza o princípio da oxidação em via úmida utilizando oxidantes, descrito por Walkley (1946), ficou conhecido como método de Walkley e Black para análise de carbono orgânico do solo. A utilização desse método passou a se difundir devido a sua praticidade e baixo custo, porém, existem problemas com o descarte do cromo que pode acarretar prejuízos ambientais conforme apresentado por Brunetto *et al.*, (2006). Além do problema do descarte do cromo o método de Walkley e Black não oxidava completamente a matéria orgânica, fazendo com que fosse necessária à utilização de fatores de correção devido às características específicas de cada tipo de solo (Nelson & Sommers, 1996). Devido à problemática do cromo outros métodos surgem para aperfeiçoar o presente método ou até mesmo substituí-lo, entre essas técnicas pode-se citar a combustão por via seca.

Diferentemente do método de determinação do CO por via úmida as técnicas baseadas no processo de combustão por via seca, gravimetria e analisadores automáticos, não apresentam a mesma problemática no descarte de resíduos. Na combustão a seco a amostra é aquecida em corrente de oxigênio purificado em temperaturas acima de 700 °C. O CO e inorgânico são convertidos em CO₂, sendo assim possível aferir por cromatografia gasosa, gravimetria, titulação ou espectrometria de infravermelho (Ferreira, 2013).

Segundo Sato (2013) os métodos por via seca possibilitam a análise de maior número de amostras de forma mais rápida, porém a aquisição e manutenção dos equipamentos utilizados possuem altos custos o que limita o número de laboratório com tais equipamentos. Além dos métodos citados anteriormente, tem-se novas metodologias baseadas na utilização do infravermelho vêm surgindo, técnicas utilizando princípios espectroscópicos, conforme apresentado por Brunetto *et al.*, (2006).

Além das técnicas utilizadas em laboratório para quantificar o CO e de forma subsequente definirem-se os estoques de carbono no solo, outras técnicas estão sendo utilizadas para se estimar os ECS. Entre elas, podemos mencionar as técnicas de geoprocessamento e/ou sensoriamento remoto, assim como os procedimentos geoestatísticos. Buscando alternativas para minimizar os gastos com amostragem e

analíticos, essas técnicas surgem como uma nova alternativa (Santos, 2014; Xu et al.,(2011; Couto, 2009, França et al., 2014 e Hoffmann et al., 2014).

3.1.3 Relação entre o quantitativo amostral e a área de estudo

Além dos fatores já apresentados outros parâmetros que interferem na definição dos estoques de carbono no solo, porém não bem definidos nos estudos, é a relação quantidade de amostras vs tamanho da área de estudo. Diversos estudos voltados para quantificação e caracterização dos ECS são realizados ou em áreas experimentais, parcelas experimentais, ou na dimensão das bacias hidrográficas. A Tabela 3 apresenta alguns estudos que utilizaram quantitativos amostrais distintos, apesar das áreas possuírem tamanhos aproximados.

Tabela 3 – Relação entre o tamanho da área de estudo e o quantitativo amostral.

Área (ha)	Pontos de Amostragem	Profundidades	Intervalo (cm)	Referência
15.262.583	182	2	0-30 e 0-100	Melo (2003)
76	297	6	0-10, 10-20, 20-30, 45-50, 65-70 e 95-100	Dieleman et al., (2013)
3.247	203	2	0-10 e 10-20	Sotomayor (2009)
860	409	1	0-30	Hoffmann et al., (2014)
35	8	4	0-5, 5-10, 10-15 e 15-20	Conte et al., (2011)
63	6	3	0-10, 10-20 e 20-40	Paiva & Faria (2007)
2.018.600	15	2	0-20 e 20-40	Rosendo & Rosa (2012)

A definição do quantitativo amostral deve ser estabelecida de forma que os dados coletados possuam representatividade da área a ser analisada para que o objetivo da pesquisa seja efetivo. Nesse contexto, deve-se levar em conta a primeira lei da geografia, ou seja, todas as coisas são parecidas, mas, coisas mais próximas se parecem mais que coisas mais distantes (Tobler, 1979). Para a quantificação de ECS no solo deve se atentar ao fato de que tal variável ambiental é controlada por diversos fatores e uma amostragem deficitária pode gerar informações equivocadas.

Porém deve-se atentar a definição da escala de informação que se pretende gerar, visto que, em determinadas situações o esforço amostral e financeiro podem inviabilizar os estudos. Além da distribuição espacial dos pontos a serem coletados outra forma de se

caracterizar os estoques de carbono no solo é por meio de análises verticais, em profundidades. Os estudos já citados realizam esse procedimento uma vez que os ECS se comportam de forma distinta verticalmente considerando que a mudança da profundidade altera sua relação com os outros componentes da paisagem.

3.2. Etapas e Métodos

3.2.1. Variação vertical dos estoques de carbono no solo na bacia do Sarandi-DF

O Cerrado encontra-se entre os maiores biomas do território brasileiro ocupando a posição de segundo maior, sua abrangência estende-se por 11 estados mais o Distrito Federal além de possuir 200 milhões de hectares. Além de sua extensão esse bioma possui característica bastante heterogênea de geologia, fitofisionomias, biodiversidade, clima e tipos de solos (Silva et al., 2006; Reatto et al., 2008; Sano et al., 2010). Apesar da importância do bioma Cerrado pouco ainda se sabe sobre os estoques de carbono nesse ecossistema, principalmente o existente nos solos (Paiva e Faria, 2007).

Diante do que já foi apresentado fica evidente a necessidade de se conhecer e caracterizar os estoques de carbono presentes no solo, uma vez que essa variável ambiental é vista como um dos indicadores de qualidade do solo e conseqüentemente é utilizada na prestação de serviços ambientais. Porém o conhecimento a respeito dos ECS depende de estudos prévios em áreas de referência dentro do bioma Cerrado. Nesse contexto uma bacia que se encontra inserida no Bioma Cerrado e é dotada de informações e estudos anteriores é a bacia do córrego Sarandi.

Segundo Lima (2013) a bacia do Sarandi, Figura 5, possui cerca de 30 km² onde cerca de 40% da área ainda possui vegetação natural e encontra-se localizada na região administrativa de Planaltina e abrange parte da área do Centro de Pesquisas Agropecuária do Cerrado (Embrapa Cerrados).

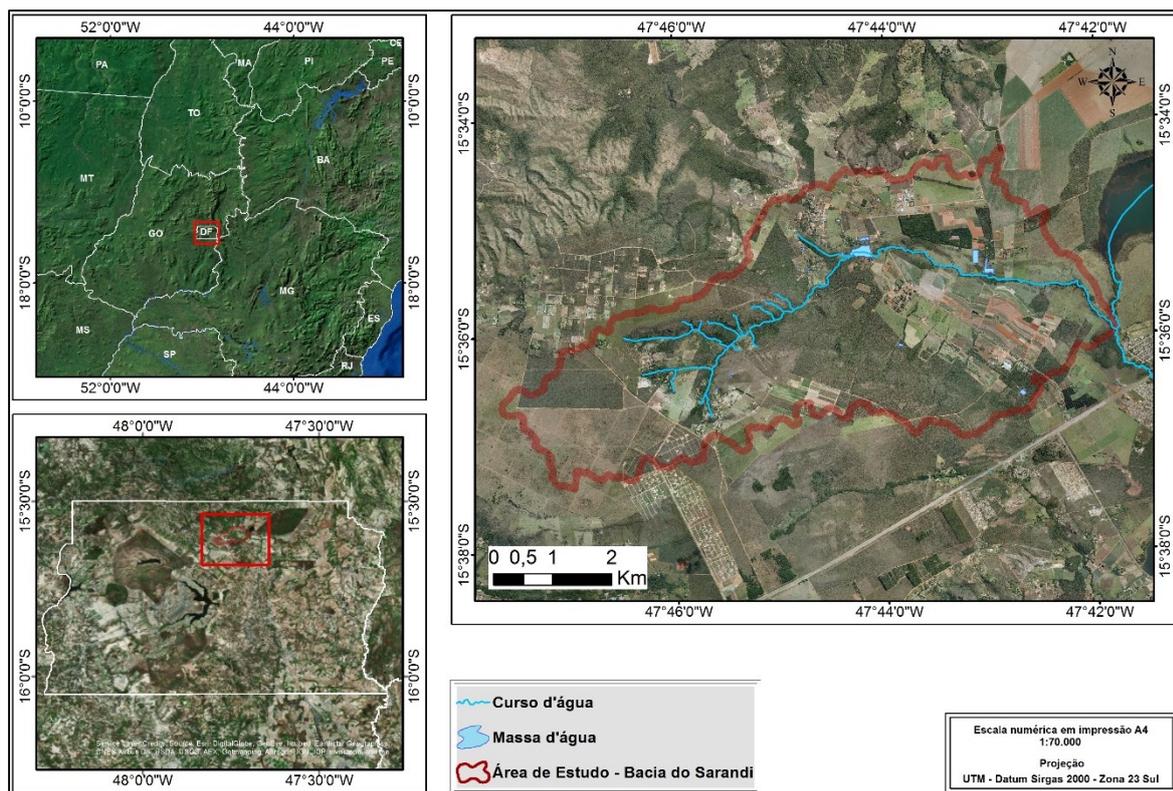


Figura 5. Localização da bacia hidrográfica do Sarandi.

Fonte: Adaptado de Lima et al., (2014).

Entre as fitofisionomias presentes na área da bacia encontram-se, predominantemente, o cerrado sentido restrito, mata de galeria, cerradão e formações campestres (Ribeiro e Walter, 2006). A bacia ainda possui importância no cenário hídrico uma vez que a mesma é afluente do rio São Bartolomeu e deságua no ribeirão Mestre D'armas (Neves et al., 2013).

Segundo Arruda et al., (2008) esta bacia faz parte da ecorregião do Planalto Central e encontra-se inserida na área nuclear do Cerrado. Segundo a classificação de Köppen, a área encontra-se no clima predominantemente Aw onde as chuvas concentram-se entre novembro e janeiro e a estiagem entre julho e agosto. A temperatura varia entre 13 °C a 28 °C com média de precipitação superior a 1.500 mm.

A Tabela 4 apresenta de forma sintética a caracterização da área em estudo, bacia do Sarandi-DF, em relação a integração das principais classes de solos, classes geológicas, classes geomorfológicas e classes de cobertura vegetal e uso da terra.

Tabela 4 .Caracterização da bacia do Sarandi quanto as classes: geomorfológica, geológica, pedológica e a cobertura vegetal e uso da terra.

Classes Geomorfológicas	Classes Geológicas	Classes de Solos	Classes de Cobertura Vegetal e Uso da Terra
Chapadas	Metarritmito Arenoso, Metarritmito Argiloso e Quartzitos Médios	Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Amarelo, Cambissolo Háptico, Gleissolo Melânico, Gleissolo Háptico e Neossolo Quartzarênico	Cerrado Sentido Restrito, agricultura de sequeiro e pastagem.
Frente de Recuo Erosivo	Metarritmito Argiloso e Quartzitos médios	Cambissolos Neossolos e Latossolo Amarelo	Cerrado Sentido Restrito
Rampa de Colúvio	Psamo-pelito carbonatada e Quartzitos médios	Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho Amarelo	Agricultura irrigada
Zona Hidromórfica	Metarritmito Arenoso, Metarritmito Argiloso e Quartzitos médios	Gleissolo Melânico e Gleissolo Háptico	Mata de Galeria

Fonte: Adaptado de Lima et al., (2014).

Para a caracterização e quantificação dos estoques de carbono no solo dessa bacia, partiu-se de um levantamento e mapeamento de solos da bacia em escala 1:30.000 (Lima et al., 2014). Os pontos e perfis de solos foram plotados na área da bacia e verificou-se como estavam em termos de espacialização e representatividade em relação às classes de solos presentes na bacia (Figura 6). Após essa análise, sistematizou-se o procedimento amostral e foi feita uma expedição a campo para completar as informações em algumas classes de solos, assegurando um conjunto de dados com maior robustez.

Os pontos foram amostrados em diferentes profundidades – 0,20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm e 80-100 cm - e os procedimentos adotados foram os recomendados pelo Manual de Coleta e Descrição de Solos no Campo (Santos et al., 2005). Ao final da etapa de coleta chegou-se ao quantitativo amostral constante na Tabela 5, e representada na Figura 6.

Tabela 5. Intervalo de profundidades utilizadas para coleta de solo e quantitativo de amostras por camada.

Profundidades amostradas (cm)	Número de amostras por camadas
0 – 20	39
20 – 40	36
40 – 60	73
60 – 80	68
80 – 100	68

Com o objetivo de minimizar os efeitos, já existentes, controladores dos ECS na fase de comparação dos dados as amostras foram espacializadas de tal forma que minimizasse os vazios geográficos existentes entre os pontos de coleta. A coleta também visou à representatividade da informação sobre as características específicas da bacia, ou seja, buscou-se uma distribuição amostral de forma que sempre houvesse pontos de coleta sobre a maioria dos solos existentes na bacia do córrego Sarandi, Figura 6.

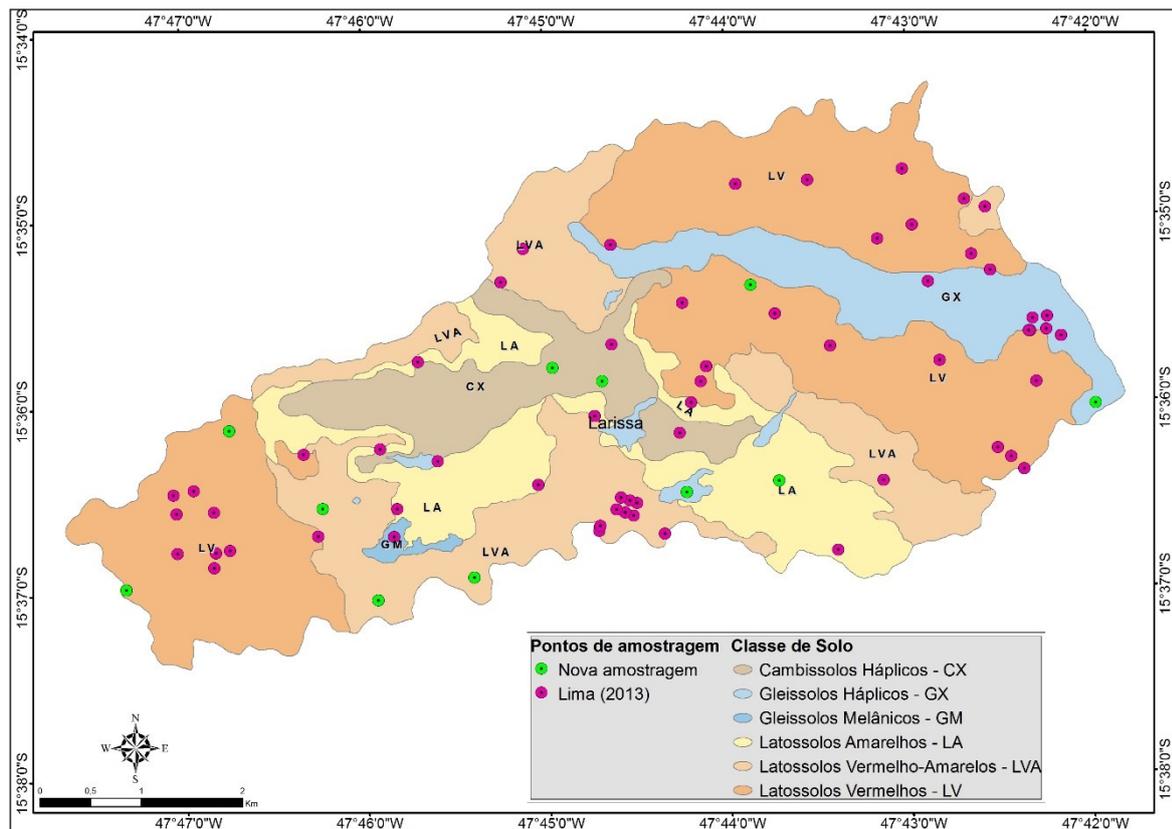


Figura 6. Distribuição amostral em relação às classes de solo na bacia do Sarandi-DF.

A determinação dos estoques de carbono no solo foi realizada a partir dos teores de carbono orgânico pelo método de Walkley e Black (1934), e os valores de densidade aparente do solo a partir de amostras indeformadas coletadas utilizando-se anel volumétrico, segundo Blake e Hartge, (1986).

Os estoques de carbono no solo foram calculados para cada uma das camadas, conforme a expressão $ECS = (CO \times Ds \times e)/10$, em que ECS é o estoque de carbono em t ha; CO indica o teor de Carbono Orgânico em g dm³; Ds é a Densidade do solo do horizonte estudado em g cm³ e “e” é a espessura do mesmo em cm. A caracterização dos estoques de carbono no solo por classe de solo em cada uma das profundidades amostradas obteve-se pela média dos ECS presentes em cada uma das classes de solo. Ao todo foram amostrados 75 pontos totalizando um conjunto de 284 camadas, organizadas conforme Tabela 6.

Tabela 6.Quantitativo amostral por classes de solo na bacia experimental do Sarandi.

Classes de Solo	Quantitativo amostral
Cambissolo Háplico - CX	7
Gleissolo Melânico - GM	5
Gleissolo Háplico - GX	46
Latossolo Amarelo - LA	32
Latossolo Vermelho - LV	160
Latossolo Vermelho Amarelo - LVA	67

3.3. Resultados e Discussões

Compreendendo os processos controladores dos ECS, sendo a classe de solos um deles, optou-se por analisar os dados deixando essa variável ambiental fixa. Ao adotar esse procedimento obtiveram-se os resultados da média de estoques de carbono no solo por classe de solo podendo assim caracterizar o comportamento dos ECS tanto verticalmente quanto por classe de solo, Figura 7.

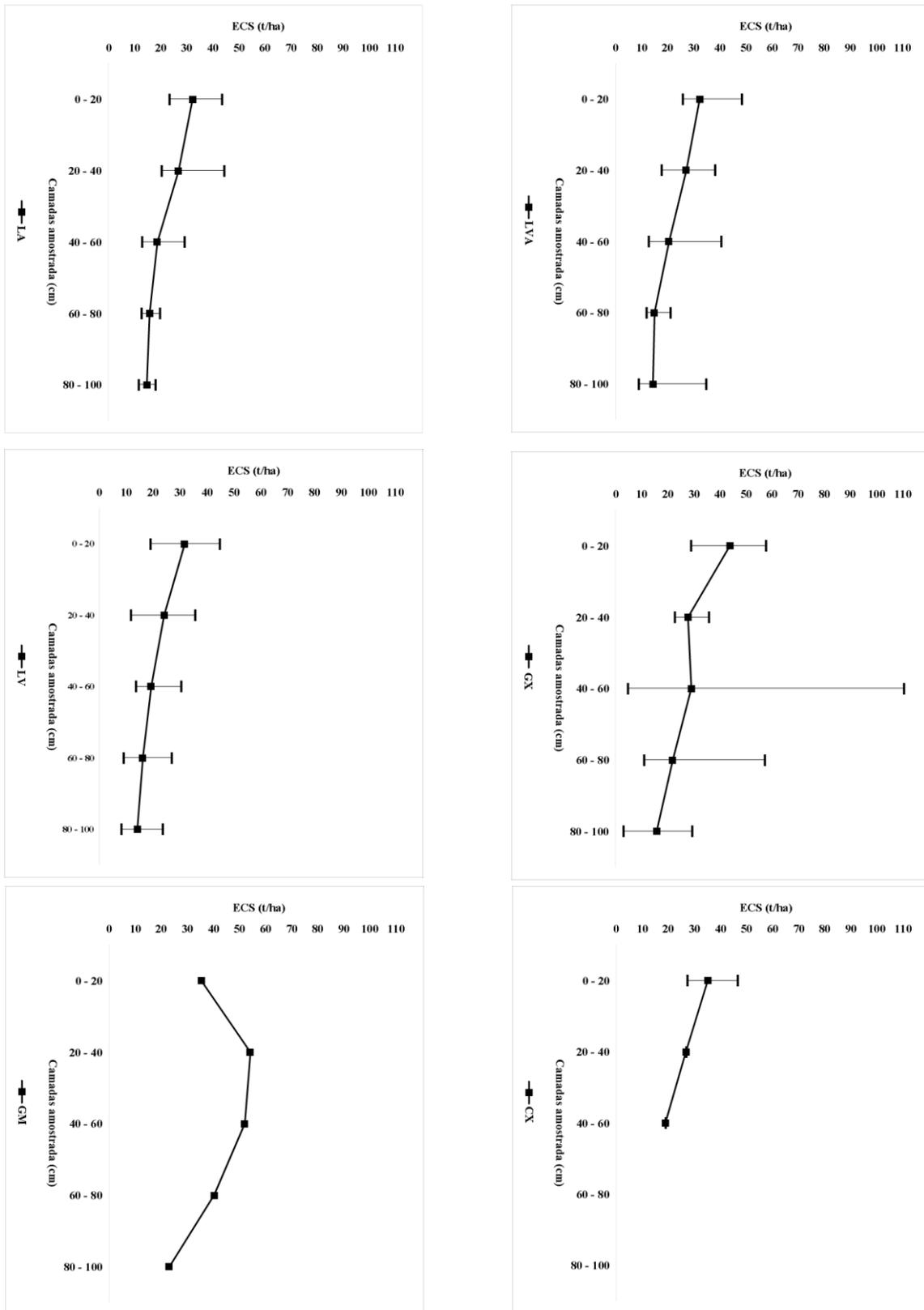


Figura 7. Valores médios dos estoques de carbono no solo (ECS) em (t ha). Cambissolo Háplico (CX), Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háplico (GX), Latossolo Amarelo (LA), Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho Amarelo (LVA).

Para melhor compreensão e entendimento do comportamento dos estoques de carbono em cada classe de solo presente na bacia foi realizada uma análise da variabilidade vertical e uma análise estatística descritiva para estimar esses estoques em cada camada amostral, calculando-se média e desvio padrão, Tabela 7 e valor de máximo, valor mínimo e coeficiente de variação, (Tabelas 8 e 9).

Tabela 7. Média (\bar{x}) e Desvio padrão (Dp) dos estoques de carbono no solo (ECS – t ha) por camada amostrada.

Classe de Solo**	0 - 20 cm		20 - 40 cm		40 - 60 cm		60 - 80 cm		80 - 100 cm	
	\bar{x}	Dp	\bar{x}	Dp	\bar{x}	Dp	\bar{x}	Dp	\bar{x}	Dp
CX	35,2	7,9	26,9	0,0	19,0	0,0	N*	N*	N*	N*
GM	35,4	0,0	54,2	0,0	52,0	0,0	40,4	0,0	23,1	0,0
GX	43,8	11,2	27,8	4,9	29,1	24,8	21,9	13,2	15,9	8,7
LA	32,4	5,7	26,9	7,7	18,8	5,7	15,8	2,7	14,8	2,4
LV	31,7	6,7	24,2	6,0	19,3	4,0	16,2	4,4	14,2	3,3
LVA	32,4	7,1	27,2	7,1	20,5	6,2	15,0	2,4	14,4	6,0

* Não amostrado (N).

**Cambissolo Háptico (CX), Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háptico (GX), Latossolo Amarelo (LA), Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho Amarelo (LVA).

Tabela 8. Valor de máximo (Ma), valor de mínimo (Mi) dos estoques de carbono no solo (ECS).

Classe de Solo**	0 - 20		20 - 40		40 - 60		60 - 80		80 - 100	
	Ma	Mi	Ma	Mi	Ma	Mi	Ma	Mi	Ma	Mi
CX	46,7	27,4	26,9	26,9	19,0	19,0	N*	N*	N*	N*
GM	0,0	35,4	54,2	54,2	52,0	52,0	40,4	40,4	23,1	23,1
GX	57,7	29,0	35,9	22,7	110,7	4,6	57,2	11,0	29,5	3,0
LA	43,6	23,4	44,5	20,5	29,2	12,8	19,9	12,6	18,0	11,6
LV	44,8	19,0	35,7	11,7	30,5	13,5	26,8	9,0	23,5	8,2
LVA	48,5	25,7	38,3	17,7	40,7	12,7	21,0	11,9	34,7	8,8

* Não amostrado (N). **Cambissolo Háptico (CX), Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háptico (GX), Latossolo Amarelo (LA), Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho Amarelo (LVA).

Tabela 9. Coeficiente de variação (CV%) dos estoques de carbono no solo (ECS).

Classe de Solo**	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
	CV (%)	CV (%)	CV (%)	CV (%)	CV (%)
CX	22,4	0,0	0,0	N*	N*
GM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
GX	25,7	17,6	85,4	60,4	54,7
LA	17,5	28,7	30,2	17,1	16,4
LV	21,2	25,0	20,9	27,1	23,6
LVA	21,9	25,9	30,4	15,9	41,5

* Não amostrado (N). **Cambissolo Háplico (CX), Gleissolo Melânico (GM), Gleissolo Háplico (GX), Latossolo Amarelo (LA), Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho Amarelo (LVA).

Na literatura vários autores indicam diferentes métodos para classificação do coeficiente de variação (Pimentel Gomes, 2000; Ferreira, 1991; Warrick & Nielsen, 1980), porém vale ressaltar que o CV é algo intrínseco a cada processo analisado. No presente estudo o CV serviu como indicador se os ECS sobre a mesma classe de solo possuíam variabilidade, caso positivo seria um indicativo que outras características da paisagem estariam exercendo maior controle sobre esses estoques. O resumo de cada um dos métodos para classificação do CV pode ser observado no Quadro 2 abaixo.

Quadro 2. Resumo dos métodos para classificação do coeficiente de variação.

AUTOR	FAIXA	CV
Warrick & Nielsen (1980)	Menor que 12%	Baixo
	Entre 12% e 62%	Médio
	Maior que 62%	Alto
Ferreira (1991)	Entre 10% e 15%	Baixo
	Entre 15% e 20%	Médio
	Entre 20% e 30%	Alto
	Maior que 30%	Muito Alto
Pimentel Gomes (2000)	Menor o igual a 10%	Baixo
	Entre 10% e 20%	Médio
	Entre 20% e 30%	Alto
	Maior que 30%	Muito Alto

Conforme já apresentado, são vários os fatores ambientais que controlam e consequentemente exercem ação sobre os estoques de carbono no solo, por entender que os valores médios apresentados foram definidos com base apenas no limite das classes de solo, desconsiderando assim, nessa fase do estudo, o uso do solo e cobertura vegetal entende-se que adotar um parâmetro de maior rigidez seria desnecessário.

Tendo em vista o apresentado, optou-se pelo método de Warrick & Nielsen (1908). De acordo com os valores do coeficiente de variação (CV), a variabilidade dos dados de estoque de carbono na bacia experimental foi classificada, em baixa ($CV < 12\%$), média ($12 < CV < 62\%$) e alta ($CV > 62\%$).

3.4. Considerações finais

Em geral observa-se que as maiores diferenças nos ECS sobre as diferentes classes de solos foram encontrados nas camadas entre 20-40 cm e 40-60 cm. Mesmo com a presença de diversos tipos de uso do solo e cobertura vegetal sobre a bacia do Sarandi, conforme apresentado por Assis et al., (2013), Neves et al., (2013) e Lima et al., (2014), observa-se que os coeficientes de variação apresentaram-se como médio, ($12 < CV < 62\%$), (Warrick & Nielsen, 1980), indicando que amostras coletadas, sobre outros tipos de uso porém sobre a mesma classe de solo, não apresentam grande variação em relação aos seus resultados de estoques de carbono no solo.

Entre os valores médios encontrados as maiores concentrações dos estoques de carbono no solo foram encontradas sobre o Gleissolo Melânico, exceto na primeira camada, 0-20 cm. Após a camada 20-40 cm observa-se uma redução dos ECS, esse comportamento é decorrente das características do ambiente, Figura 8, constituído de uma área de acúmulo de material localizada em porções planas, com declividade abaixo de 3%.



Figura 8. Áreas de ocorrência de Gleissolo Melânico na bacia do Sarandi.

Fonte: Lima et al., (2014).

A associação dessas características proporciona um aumento da oxidação de compostos orgânicos fazendo com que a deposição desses compostos ocorra com maior intensidade. A menor concentração do ECS na camada de 0-20 está associada à ciclagem da matéria orgânica devido à interação com a cobertura vegetal.

O solo analisado que mais se aproxima dos valores encontrados sobre as áreas de Gleissolo Melânico é o Gleissolo Háptico. Nessa classe de solo observou-se tendência similar aos demais dados, ou seja, redução dos estoques de carbono no solo na medida em que se decresce no perfil, porém, na camada 40-60 cm houve um acréscimo em relação à camada anterior, 20-40 cm, em seguida os valores retornaram à tendência e continuaram reduzindo. Os outros valores encontrados nessa classe de solo podem estar relacionados às características similares deste solo com o Melânico, até mesmo em relação ao ambiente, Figura 9.



Figura 9. Áreas de ocorrência de Gleissolo Háptico na bacia do Sarandi.

Inversamente aos valores encontrados no Gleissolo Melânico, o Latossolo Vermelho apresentou as menores concentrações nos estoques de carbono no solo, 14,2 t ha à 80-10 cm. A análise dos pontos coletados sobre essa classe de solo permitiu aferir seu comportamento vertical onde as concentrações do ECS se assimilam as outras classes de solo, que apresentam maiores concentrações nas camadas superficiais e redução subsequente nas camadas subsuperficiais.

Essa tendência de redução dos valores dos estoques de carbono no solo já foi reportada em outros trabalhos (Chaves, L.H.H. e Farias, C. de A. (2008); Gatto et al., (2010). A quantificação desse processo de redução dos estoques de carbono no solo pode ser explicada por controladores primários, propriedades físicas e edáficas do solo além de material de origem.

Apesar dos diversos trabalhos já existentes sobre a caracterização e quantificações dos estoques de carbono no solo o presente trabalho chama a luz da discussão não só para a análise dos dados obtidos em campo, mas para os procedimentos necessários até chegar-se aos métodos de quantificação e caracterização. Observa-se que entre os procedimentos necessários para os estudos sobre estoques de carbono no solo a definição da técnica para determinação do carbono no solo configura-se como uma etapa que merece atenção. Nesse sentido diversos estudos corroboram com essas limitações e os pontos positivos de cada procedimento, entre eles pode-se citar o desenvolvido por SANTOS, *et al.*, 2007, SATO, 2013 e FERREIRA, 2013.

3.4. REFERÊNCIAS

ASSIS, T.; COUTO-JUNIOR, A.F.; NEVES. G.; REATTO, A.; MARTINS, E.S.; GOMES, M.P.; SENA-SOUZA, J.P.; REIS, A.M.; RAMALHO, L.S.; CLAUDINO, V.C.M. 2013. Evolução temporal da cobertura da terra de uma bacia experimental do Cerrado utilizando sensoriamento remoto multisensor e multitemporal. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 7739-7745.

AREVALO, L.A.; ALEGRE, J.C.; VILVAHUAMAN, L.J.M. 2002. Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra. **Embrapa Floresta – Documentos 73**, 41 p.

ARRUDA, M.B. 2008. Ecorregiões, unidades de conservação e representatividade ecológica do bioma Cerrado. In: SANO, M.S.; ALMEIDA, S.M.; RIBEIRO, J.F. (eds.). **Cerrado: ecologia e flora**. Embrapa Cerrados, Planaltina, p. 230-272.

BRUNETTO, G; MELO, G.W.; KAMINSKI, J.; FURLANETTO, V.; FIALHO, F.B. 2006. Avaliação do método de perda de peso por ignição na análise de matéria orgânica em solos da Serra Gaúcha do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, 36(6): 1936-1939.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd. ed. Madison: Wisconsin, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 363-375. (Agronomy Series, 5)

BYRNES, M.E. In: Field sampling methods for remedial investigations. **Boca Raton – Florida**: CRC Press, INC., 1994.

CARMO, D.L & SILVA, C.A. 2012. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36: 1211-1220.

CHAVES, L.H.G.; FARIAS, C.A. 2008. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: Solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência Agrária**, 3(1): 20-25.

CLAY, D.E.; CARLSON, C.G.; CHANG, J.; CLAY, S.A. & MALO, D.D. 1999. Systematic evaluation of precision farming soil sampling requirements. In: ROBERT, P.C.; RUST, R.H. & LARSON, W.E., eds. **INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE**, 4., Madison, 1999. Proceedings. Madison, ASA-CSSA-SSSA. p.253-265.

CRÉPIN, J. JOHNSON, R.L. 1993. Soil Sampling for environmental assessment. In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil sampling and methods of Analysis**. Boca Raton: Lewis Publisher. p. 5-18.

CLAESSEN, M.E.C. (Org.). 1997. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro: **Embrapa-CNPS**. Páginas: 212.

COCHRAN, W.G. 1953. Sampling techniques. New York: **Wiley Publications in Statistics**, 330 p.

COUTO, D.L.N. 2009. Albedo em cerrado *sensu stricto* como resposta à variação climática e biológica – conexões com índice de vegetação, estoques de carbono e fluxos de CO₂. **Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas**, Universidade de São Paulo, 93 páginas. Dissertação.

CONTE, O.; WESP, C.L.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F.; LEVIEN, R.; NABINGER, C. 2011. Densidade, agregação e frações de carbon de um argissolo sob pastagem natural submetida a níveis de ofertas de forragem por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35: 579-587.

DIELEMAN, W.I.J.; VENTER, M.; RAMACHANDRA, A.; KROCKENBERGER, A.K.; BIRD, M.I. 2013. Soil carbon stocks vary predictably with altitude in tropical forests: Implications for soil carbon storage. **Geoderma**. 204-205:59-67.

DORAN, J.W & ZEISS, M.R. 2000. Soil health and sustainability: Managing the biotic components of soil quality. **Applied Soil Ecology**, 15:3-11.

FRANÇA, A.M.S.; SANO, E.S.; CARVALHO, A.M. Função de pedotransferência pra estimativa de teor de carbono em solo sob áreas de campo limpo úmido do distrito federal. **Anais XIV Safety, Health and Environment Word Congress**, Cubatão, SP, Brasil, 39-43.

FERNANDES, F.A.; FERNANDES, A.H.B.M. 2008. Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo. Corumbá: **Embrapa Pantanal – Comunicado Técnico 69**, 4 p.

FERREIRA, E.A.B. 2013. Dinâmica de longo prazo do carbono do solo em sistemas de manejo no cerrado. **Instituto de Ciências Biológicas**, Universidade de Brasília, 235 páginas. Tese.

FERREIRA, P. V. 1991. Estatística Experimental aplicada à Agronomia. **EDUFAL**, 437p.

FRESE, F. 1962. Elementary forest sampling. Washington: **USDA**. 91 p.

FIDALGO, E.C.C.; BENITES, V. DE M.; MACHADO, P. L.O. DE A.; MADARI, B.E.; COELHO, M.R.; MOURA, I. B. DE; LIMA, C. X. DE. 2007. Estoque de carbono nos solos do Brasil. 27 p. (**Boletim Embrapa de Pesquisa e Desenvolvimento**, 121.)

GATTO, A. 2010. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1069-1079.

HOFFMANN, U.; HOFFMANN, T.; JURASINSKI, G.; GLATZEL, S.; KUHN, N.J. 2014. Assessing the spatial variability of soil organic carbono stocks in na alpine setting (Grindelwald, Swiss Alps). **Geoderma**. 232-234: 270-283.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 1995. **Segunda evaluación cambio climático**. 81 p.

LIMA, L.A.S. 2013. Aplicação dos métodos semi-automático e lógica fuzzy para o mapeamento de solos da bacia do Sarandi. **Dissertação de Mestrado do Instituto de Geociências – UnB**, nº 49. 125 p.

LIMA, L.A.S.; REATTO, A.; ROIG, H.L.; MARTINS, E.S.; GOMES, M.P. 2014. Caracterização dos solos da bacia do Sarandi. 47 p. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Cerrados**. ISSN 1676-918X, ISSN online 2176-509, 318.

MASON, B.J. 1992. Preparation of soil sampling protocols: sampling techniques and strategies. **US-EPA**, Las Vegas, não paginado.

MAHECHA, M.D.; REICHSTEIN, M.; CARVALHAIS, N.; LASSLOP, G.; LANGE, H.; SENEVIRATNE, S.I.; VARGAS, R.; AMMANN, C.; ARAIN, M.A.; CESCATTI, A.; JANSSENS, I.A.; MIGLIAVACCA, M.; MONTAGNANI, L. and RICHARDSON, A.D. 2010. Global Convergence in the Temperature Sensitivity of Respiration at Ecosystem Level. **Science**, 329:838-840.

MELO, A.W.F. 2003. Avaliação do estoque e composição isotópica do carbono do solo no Acre. **Dissertação de Mestrado** – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba – SP, 74p.

MEDINA SOTOMAYOR, J.F. 2009. Métodos de amostragem de solos para a determinação de carbono em três ambientes. **Centro de Energia Nuclear na Agricultura**, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 101 páginas. Dissertação.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *In*: BLACK, C.A. (ed.) Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Madison, **Soil Science of America and American Society of Agronomy**, 9:961 -1010.

NEVES, G.; COUTO-JUNIOR, A.F.; ASSIS, T.; REATTO, A.; MARTINS, E.S.; GOMES, M.P.; SENA-SOUZA, J.P. 2013. Avaliação da fragmentação da cobertura natural em uma bacia experimental no Cerrado. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 3062-3067.

OLIVEIRA, J.R.A.; MENDES, I.C.; VIVALDI, L.J. 2011. Carbono da biomassa microbiana em solos de cerrado: comparação dos métodos fumigação-incubação e fumigação-extração. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Cerrados**. ISSN 1676-918; 9, páginas: 22.

PALMER, C.J. 2002. Techniques to measure and strategies to monitor forest soil carbono. *In*: KIMBLE, J.M.; BIRDSER, R.A.; LAL, R. **Teh potencial of U.S. forest soils to sequester carbono and mitigate te greenhouse effect**. Boca Raton: Lewis Publ. chap. 5, p. 73-90.

PAIVA, A.O.; FARIA, G.E. 2007. Estoques de carbono do solo sob cerrado sensu stricto no Distrito Federal, Brasil. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**, 1(1): 59-65.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba: Nobel, 2000. 477 p.

REATTO, A.; CORREIA, J.R.; SPERA, S.T.; MARTINS, E.S. 2008. Solos do Bioma Cerrado: Aspectos pedológicos. In: Sano, S.M.; Almeida, S.P. & Ribeiro, J.F. (Eds.). **Cerrado: Ecologia e Flora. Embrapa Informação Tecnológica**, Brasília, p. 107 – 149.

RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. 2007. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 5. ed. Rev. –Lavras: Editora UFLA, 322 p. : il.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B.M.T. 2008. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, M.S.; ALMEIDA, S.M.; RIBEIRO, J.F. (Eds.). **Cerrado: ecologia e flora**. Embrapa Cerrados, Planaltina, p. 152-212.

ROSENDO, J.S.; ROSA, R. 2012. Comparação do estoque de C estimado em pastagens e vegetação nativa de Cerrado. **Sociedade & Natureza**, 24 (2): 359-376.

SEGNINI, A.; SANTOS, L.M.; SILVA, W.T.L.; MARTIN-NETO, L.; BORATO, C.E.; MELO, W.J.; BOLONHEZI, D. 2007. Estudo comparativo de métodos para a determinação da concentração de carbono em solos como altos teores de Fe (Latosolos). **Química Nova**, 31(1): 94-97.

SANTOS, F.L.S.; RAMALHO, L.S.; MARQUES, T.A.; SENA-SOUZA, J.P.; REATTO, A.; MARTINS, E.S.; COUTO Jr. A.F.; NARDOTO, G.B. 2014. Teor de carbono orgânico do solo e aspectos biofísicos da cobertura vegetal da bacia do Córrego Sarandi, Planaltina, DF. 29 p. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Cerrados**. ISSN 1676-918X, ISSN online 2176-509, 316.

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

SATO, J.H. 2013. Métodos para determinação do carbono orgânico em solos do Cerrado. **Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária**, Universidade de Brasília, 90 páginas. Dissertação.

SANO, E.E.; ROSA, R.; BRITO, J.L.S.; FERREIRA L.G. 2010. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, 166: 113–124.

SILVA, J.F.; FARIÑAS, M.R.; FELFILI, J.M.; KLINK, C.A. 2006. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the Cerrado region of Brazil. **Journal of Biogeography**, 33: 536-548.

TOBLER, W. R. Cellular geography. 1979. In: GALE, S.; OLSSON, G. (Ed.). **Philosophy in geography**. Dordrecht: D. Reidel Pub. Co., p.379-386.

XU, X.; LIU, W.; ZHANG, C.; KIELY, G. 2011. Estimation of soil organic carbon stock and its spatial distribution in the Republic of Ireland. **Soil and Management**, 27: 156-162.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Sci.**, v. 37, p. 29-38.

WEBSTER, R. & OLIVIER, M.A. Statistical methods in soil and land resource survey. Oxford, **Oxford University Press**, 1990. 316p.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.) Applications of soil physics. New York: Academic press, 1980. p.319-344.

CAPITULO III

Espacialização dos estoques de carbono no solo em uma bacia experimental no Bioma Cerrado

Elton Souza Oliveira

Henrique Llacer Roig

Adriana Reatto

Revista a ser definida

4. ESPACIALIZAÇÃO DOS ESTOQUES DE CARBONO NO SOLO EM UMA BACIA EXPERIMENTAL NO BIOMA CERRADO

Resumo

A crescente demanda para caracterização e quantificação do ciclo biogeoquímico do carbono e, por conseguinte a espacialização desses estoques de carbono, diversos estudos vem modelando esta variável por meio de técnicas em ambiente de sistema de informação geográfica. Apesar do crescente número de estudos envolvendo a modelagem dos estoques de carbono no solo observa-se que muitos dos modelos já estabelecidos realizam, em boa parte, análises unicamente pontuais. Apesar da evolução, as técnicas utilizadas para modelagem e espacialização dos estoques de carbono no solo (ECS) apresentam ainda hoje limitações devido a necessidade de realização de grande esforço amostral e, em muitos dos casos, os ECS são espacializados sem levar em consideração as barreiras naturais que fazem com que essa variável apresente mudança brusca, inviabilizando assim algumas das técnicas de interpolação da informação. A fim de se minimizar os esforços amostrais e aproveitar dados existentes provenientes de outros tipos de mapeamentos, o estudo se propôs a apresentar uma alternativa de modelagem e espacialização dos estoques de carbono no solo por meio da técnica de Regressão Geograficamente Ponderada (*Geographically Weighted Regression – GWR*). Foram utilizadas informações provenientes do mapa de solos da bacia experimental do Sarandi. A técnica apresentou bons resultados permitindo a quantificação e espacialização dos estoques de carbono no solo na bacia. Por meio da utilização da técnica do GWR em conjunto com outras etapas e definição de unidades de análises foi possível modelar os estoques de carbono no solo na área de estudo. As equações de regressão geradas para as profundidades de 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm e 80-100 cm apresentaram respectivamente R^2 ajustado de 0,96, 0,9, 0,9, 0,98 e 0,96, com significância de $P < 0,05$, evidenciando que a técnica é uma alternativa viável para modelagem dos estoques de carbono no solo a partir de variáveis já existentes ou levantamentos que não exigem grande esforço e tempo se comparados com as técnicas atuais para quantificação desses estoques.

Palavras Chave: Mapeamento, interpoladores, modelagem, matéria orgânica no solo.

4. SPATIALIZATION OF CARBON STOCKS ON LAND IN WATERSHED OF EXPERIMENTAL SARANDI, NO CERRADO

Abstract

With the increasing discussions about the changes in the carbon biogeochemical cycle and the growing demand for quantification and spatial distribution of carbon stocks in the soil several studies have model this variable through techniques in geographic information system environment. Despite the growing number of studies involving the modeling of carbon stocks in the soil it is observed that many of the models already established realize, in good part, only specific analysis.

Despite the evolution of the techniques used for modeling and spatial distribution of carbon stocks in the soil (ECS) have today limitations due to the need to perform large sampling effort and in many cases the ECS are spatially without taking into account the natural barriers that make that this variable present abrupt change, thus impeding some of the information interpolation techniques.

In order to minimize the sampling efforts and leverage existing data from other mapping the study was to present an alternative modeling and spatial distribution of carbon stocks in the soil through the Geographically Weighted Regression technique (Geographically Weighted Regression - GWR), using information from the Sarandi of the experimental basin soil map together with other data the technique presented good results thereby facilitating quantification and spatial distribution of carbon stocks in the soil.

By using GWR technique together with other steps and defining units of analysis it was possible to model the carbon stocks in the soil in the study area.

The regression equations generated for the depths of 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm and 80-100 cm respectively had adjusted R^2 of 0.96, 0.9, 0.9, 0.98 and 0.96 indicating that the technique is a viable alternative to modeling the carbon stocks in the soil from existing variables or surveys that do not require great effort and time compared with current techniques to quantify these stocks.

Index terms: Mapping, interpolation, modeling, soil organic matter.

4.1. Introdução

O manejo e a conservação do solo e da água nas bacias hidrográficas podem estar associados aos índices de qualidade do solo, os quais podem ser expressos de diferentes formas. Esses índices ou indicadores, segundo Doran e Zeiss (2000), devem apresentar sensibilidade às variações de clima, manejo, ser econômico, possuir fácil mensuração e devem ser úteis na explicação dos processos ecossistêmicos ou ambientais.

O índice de qualidade do solo que agrega as informações em nível de bacia são os estoques de carbono no solo (ECS). Apesar da grande quantidade de estudos sobre os ECS existe uma carência desse indicador espacializado, sendo apresentado na maioria dos estudos de forma pontual ou em pequenas parcelas experimentais (Leite e Mendonça, 2003; Calonego, 2012; Simões et al., 2010). Assim, o conjunto de dados obtidos dos ECS em uma determinada área a partir de análises pontuais torna-se limitantes tanto em sua extrapolação quanto na espacialização devido a ausência de outras variáveis que exerçam influência sobre os estoques de carbono no solo. Esse fator explica-se, pois, muitas dessas parcelas experimentais não possuem variação quanto à classe de solo, tipo de uso, cobertura vegetal e outras variáveis presentes na paisagem.

Uma alternativa para a produção de tais dados seria a modelagem dos ECS a partir dos condutores primários, propriedades que exercem maior controle sobre os ECS sendo assim capaz de melhor explicá-lo, uma vez que as variações dos ECS, em uma determinada área, podem ser definidas pelo saldo líquido entre a entrada e a saída, que é controlada por esses condutores primários (Resende et al., 2007; Maheca et al., 2010).

Bennema (1974) foi um dos pioneiros na modelagem de carbono orgânico no solo (COS), onde apresentou o decréscimo nesses teores em latossolos brasileiros, sob vegetação nativa, usando equações do tipo $COS = ap^b$ (COS em %; p = profundidade em cm; e a e b , parâmetros estimáveis). Outros estudos descreveram o controle do COS exercido pelos teores de óxidos de Al e Fe em Latossolos sob Cerrado e outros solos tropicais (Barthès *et al.*, 2008). Zinn *et al.*, (2012), também apresentou que os teores de COS na Região Serrana no Sul do Brasil, nas profundidades entre 20 e 200 cm, seria exercido pelos teores de argila. Rosedo & Rosa (2012) seguindo essa linha confirmam que a textura, argilosa, pode ser considerada como fator determinante para dificultar as perdas de COS.

Além das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo fatores como condições climáticas locais, relevo, drenagem, tipo de manejo de solo adotado entre outras variáveis exercem variações nos ECS (Lal., 2005; Smith., 2008). Ainda segundo Assad *et al* (2013)

as práticas de manejo adequadas podem promover aumento nos ECS. Porém vários autores apontam que a substituição do Cerrado por lavouras e pastagens leva à redução dos ECS (Silva *et al.*, 2004; Maia *et al.*, 2009; Siqueira Neto *et al.*, 2009; Gatto *et al.*, 2010).

Conforme exposto, muitas variáveis podem controlar os estoques de carbono no solo. Em nível regional as variáveis climáticas, como temperatura e chuvas, exercem grande importância. Em nível local as propriedades do solo tais como densidade e fertilidade também são variáveis fundamentais ao seu entendimento (Assad *et al.*, 2013).

Mapear a distribuição geográfica dos ECS torna-se, nesse contexto, fundamental para o adequado uso e conservação deste recurso natural. Segundo Carvalho *et al.*, (2009) a cartografia de solos é vital à conservação e ao gerenciamento dos recursos naturais, porém é necessário o conhecimento pedológico, a compilação de dados ambientais (clima, geologia, vegetação e relevo), a análise e interpretação de imagens.

Devido à demanda por informações sobre a distribuição espacial dos estoques de carbono no solo a aplicação da abordagem quantitativa configura-se como uma importante ferramenta para a otimização dos procedimentos. O processo muito se assemelha ao do mapeamento digital de solos (MDS) uma vez que busca criar e disponibilizar a informação espacial sobre os ECS através de métodos de observação em campo e laboratoriais, associados a sistemas de inferência com base nos fatores de formação dos solos (Mcbratney *et al.*, 2003). Nesse sentido, uma das ferramentas que tem auxiliado no processo de mapeamento é a utilização de um Sistema de Informação Geográficas (SIG) permitindo analisar e gerenciar as múltiplas camadas de dados espaciais. A redução da interferência do julgamento humano e os procedimentos quantitativos e automáticos, no mapeamento, destacam-se em relação às técnicas tradicionais (Zhou *et al.*, 2003).

Segundo Ten Caten *et al.*, (2011) uma das estratégias utilizadas no MDS é a extrapolação das relações solo-paisagem de uma área mapeada, definida como área de referência, para regiões onde estas relações ainda não são bem conhecidas, procedimento esse, que pode ser adaptado para estimar os estoques de carbono no solo. A utilização de modelos para prever a classificação e até mesmo as propriedades dos solos na região do Cerrado apresenta-se, ainda, pouco aplicáveis uma vez que, os parâmetros existentes não se aplicam a grandes áreas. A necessidade da geração de modelos entre as relações solo vs paisagem vs uso que possam ser regionalizados configura-se como uma alternativa viável e ágil, em relação aos métodos tradicionais de mapeamento (Lima, 2013).

Nos estudos voltados para a compreensão dos estoques de carbono no solo o modelo Century, desenvolvido por Parton et al., (1987), é extremamente utilizado devido sua capacidade em modelar a matéria orgânica, principal compartimento de carbono na biosfera (Follet, 2001). Porém, sua utilização torna-se limitada em função dos seus procedimentos focarem em análises pontuais e não espaciais, apesar de já existirem esforços para adaptação desse modelo para análises espaciais (Bortolon et al., 2012; Silva, 2012).

Além da utilização de modelos como o Century é normal em diversos trabalhos à adoção de técnicas de interpolação de dados para a espacialização do carbono orgânico e dos estoques (Leite et al., 2015; Chaves e Farias, 2008). Nesse contexto, o mais indicado seria a utilização de uma técnica que seja capaz de gerar modelos de regressão dos estoques de carbono e ao mesmo tempo espacializar esse dado por meio de unidades de análises.

Admitindo-se que haja um grau de correlação entre as diversas propriedades do solo e as variáveis explicativas dos estoques de carbono no solo, e de que possam ser extraídas dos mapas temáticos por meio dos aplicativos em SIG. E a partir desse conjunto de informações extraídas, com a compilação de dados e levantamentos de campo, é possível a utilização de modelos de regressão para estimar os valores médios dos estoques de carbono no solo.

Modelos de regressão espacial, sejam univariados ou multivariados, buscam definir as relações existentes entre duas ou mais variáveis quantitativas, de tal maneira que uma variável “X” possa ser estimada a partir de uma variável “Y”, no caso de modelos univariados, ou a partir de outras variáveis “ $Y_1+Y_2+Y_3...$ ” no caso de modelos multivariados (Neter et al., 1996). Nesse sentido, a técnica com potencial para a integração desse tipo de análise é a Geographically Weighted Regression – GWR (Regressão Geograficamente Ponderada - RGP). O GWR configura-se como uma importante ferramenta para exploração de modelos que visa ajustar cada ponto observado com as demais informações considerando a distância entre eles (Druck et al., 2004).

O modelo GWR, desenvolvido por Brunson et al., (1996) e proposto por Fotheringham et al., (2002) permite que seja modelado de forma interativa a tendência espacial de um determinado fenômeno de forma contínua a partir de parâmetros variantes no espaço (Câmara et al., 2002). A definição dos parâmetros a serem inseridos no modelo de regressão lhe permite uma interferência subjetiva. A técnica GWR, ainda, lhe admite uma posterior avaliação dos estoques de carbono no solo espacializados por meio da avaliação dos mapas de desvio dos erros e pelo relatório dos resumos estatísticos.

A GWR apresenta vantagens em relação a outros modelos comumente utilizados pois é uma técnica integrada a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), permitindo com isso que a análise dos ECS ocorra de forma espacial e distribuída, não mais de forma pontual. Além da espacialização dos dados, a técnica indica ao usuário qual o melhor conjunto de dados para prever o fenômeno a ser modelado.

Uma das vantagens da utilização do modelo GWR em face aos outros tipos de modelos tradicionais de regressão é a possibilidade de se realizar uma análise que leve em conta a heterogeneidade das variáveis analisando individualmente cada parte da área de estudo. Para que isso seja possível é necessária a divisão da área de estudo em unidades de análise, cada unidade é composta por um padrão espacial próprio (Druck et al., 2004).

Tendo em vista que a técnica do GWR gera modelos para cada unidade de análise, diferentemente das regressões globais, cada unidade colabora com seus próprios valores para os coeficientes que irão compor a regressão (Carvalho et al., 2006). Esse procedimento faz que a generalização de resultados seja reduzida, diferentemente de outras técnicas em que os modelos tradicionais de regressão as estimativas são feitas de forma que o resultado seja generalizado.

Nesse contexto, o trabalho objetivou testar a técnica GWR para a modelagem e espacialização dos estoques de carbono no solo em uma bacia hidrográfica. Essa modelagem e espacialização permitirá a regionalização e extrapolação dos estoques de carbono no solo. Subsidiando ações de planejamento voltadas para o manejo e conservação de áreas, contribuindo assim, na construção de indicadores relacionados à qualidade do solo.

4.2. Etapas e métodos

4.2.1. Área de estudo

A bacia do Sarandi possui cerca de 30 km² e localiza-se ao norte do Distrito Federal (Figura 10), na região administrativa de Planaltina – Distrito Federal, e abrange parte da área do Centro de Pesquisa Agropecuária do Cerrado (Embrapa Cerrados).

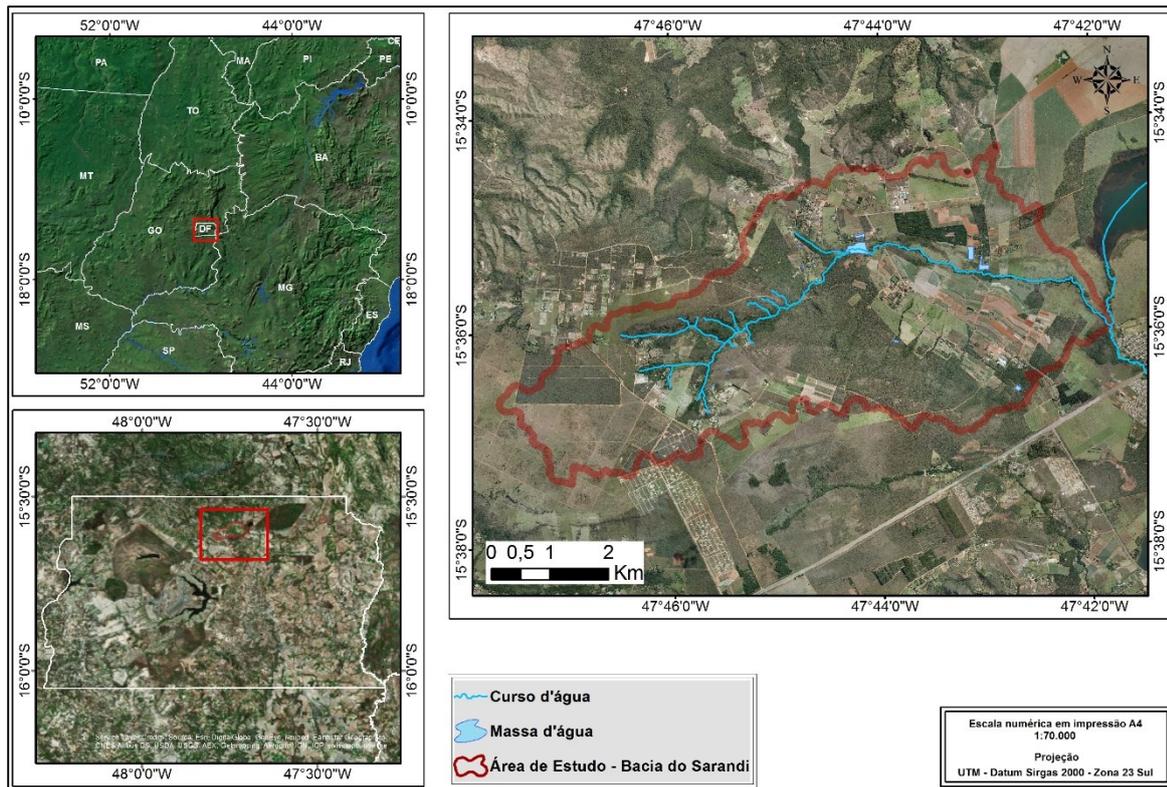


Figura 10. Localização da bacia experimental do Sarandi.

Fonte: Adaptado de Lima et al., (2014).

O Rio Sarandi compõe a sub-bacia Mestre D'Armas, na Bacia do São Bartolomeu, (Lima 2013). Segundo a classificação de Köppen, a área encontra-se no clima predominantemente Aw onde as chuvas concentram-se entre novembro e janeiro e a estiagem entre julho e agosto. A temperatura varia entre 13 °C a 28 °C com média de precipitação superior a 1.500 mm.

As Figuras 11A, B, C e D apresentam a caracterização da bacia hidrográfica do Sarandi-DF, em relação a integração das principais classes de solos, classes geológicas, classes geomorfológicas e classes de cobertura vegetal e uso da terra.

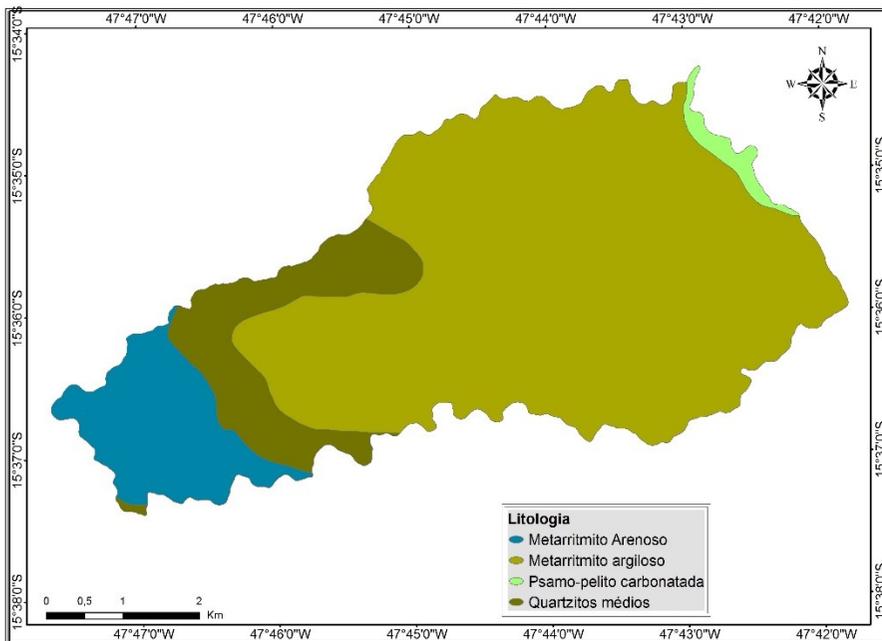


Figura 11 A. Geologia da bacia do Sarandi –DF.

Fonte: Lima et al., (2014)

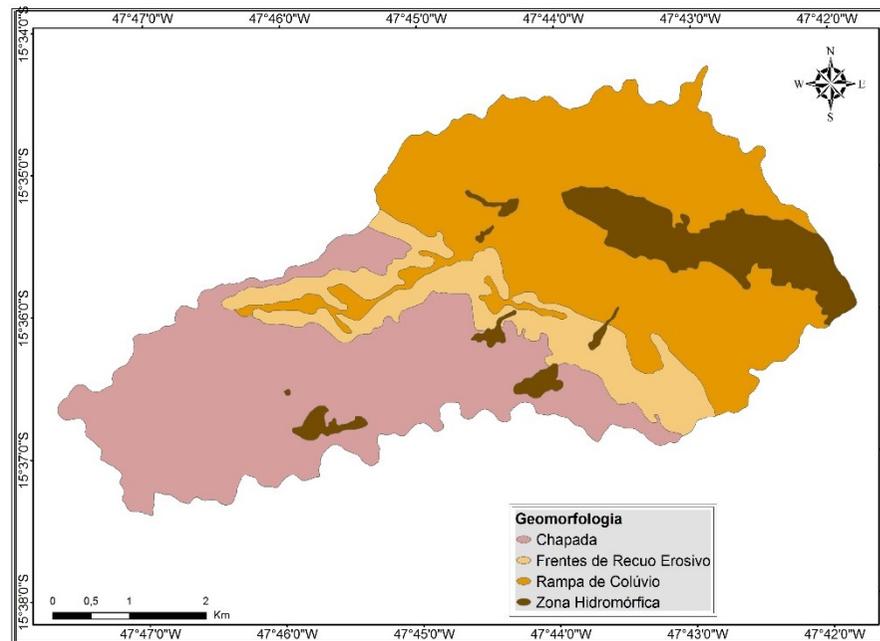


Figura 11 B. Geomorfologia da bacia do Sarandi –DF.

Fonte: Lima et al., (2014)

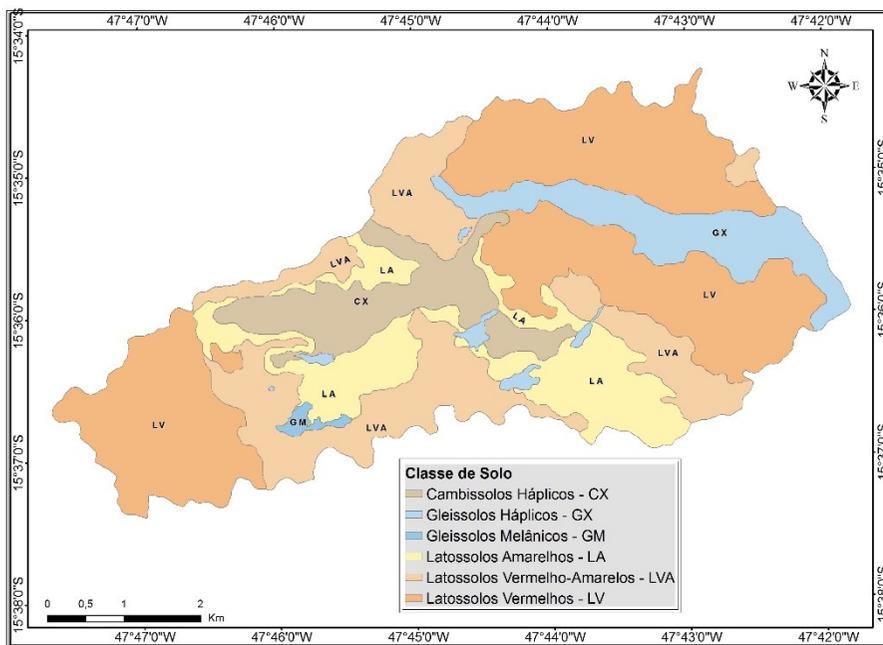


Figura 11 C. Classes de solo da bacia do Sarandi –DF.

Fonte: Lima et al., (2014)

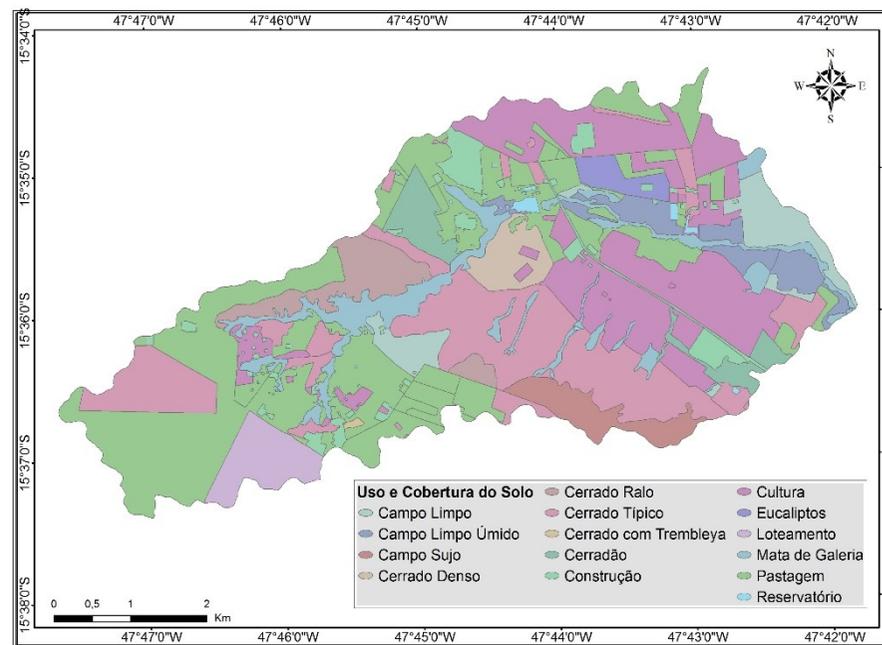


Figura 11 D. Uso e cobertura do solo da bacia do Sarandi –DF.

4.2.2. Metodologia

4.2.2.1. Construção da base de dados

A base de dados utilizada para esse estudo foi composta por basicamente três fases. A primeira por dados levantados a partir da base de dados pedológicos segundo Lima (2013) e dados de cobertura vegetal e uso do solo compilados dos trabalhos de Assis et al., (2013) e Neves et al., (2013), e posteriormente atualizados por meio das ortofotos (fotos aéreas corrigidas geometricamente) do Distrito Federal disponíveis no site da Companhia de Planejamento do Distrito Federal (Codeplan) referentes ao ano de 2013.

Os dados compilados referentes ao uso do solo e cobertura vegetal foram gerados a partir de imagens do sensor Landsat TM-5 por meio da técnica de interpretação visual, considerando cor, forma e textura. Apesar da compilação de dados referentes aos anos de 1996, 2001, 2006 e 2011 foi utilizado nas análises apenas o dado de uso do solo e cobertura vegetal referente ao ano de 2013, atualização gerada posteriormente, visto que os locais dos dados coletados não haviam sofrido alteração no tipo de uso.

A segunda fase constitui-se de levantamentos complementares de dados em campo para minimizar os vazios existentes na área de estudo com o intuito de minimizar possíveis erros na modelagem devido à carência de dados. Nessa fase utilizou-se de GPS e auxílio de ortofotos de alta resolução disponíveis no site da Codeplan, para a definição dos pontos de coleta. A terceira fase configurou-se por geração de variáveis morfométricas a partir de imagens do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) com resolução espacial de 30 metros (1 arc-second), adquiridas no site da USGS, a fim de eliminar o dado qualitativo referente às classes geomorfológicas e com isso inserir dados quantitativos.

4.2.2.2. Geração das variáveis morfométricas

As variáveis morfométricas obtidas foram: declividade e índice de umidade topográfico, que caracteriza as áreas de saturação de água superficial e o conteúdo de água nos solos (Alves, 2008). Outras variáveis como direção de vertente e curvatura foram geradas a fim de obter mais informações para chegar-se a um modelo mais próximo do ideal, além de que tais variáveis são de mais fácil aquisição minimizando a necessidade de geração de dados provenientes de coletas de dados em campo. Porém, em testes preliminares, verificou-se que as mesmas não contribuíam para o modelo, fator que fez com que as mesmas fossem retiradas da análise. Do conjunto de variáveis morfométricas, o índice de umidade

topográfico foi compilado e a declividade foi gerada a partir de imagem do SRTM com resolução de 1 arco-segundos (o equivalente a aproximadamente 30 metros).

A utilização da declividade se deu devido ao entendimento de que áreas mais planas na paisagem, de forma geral, são mais propensas ao acúmulo de material e consequentemente com isso seria um facilitador para o acúmulo de material orgânico levado pela ação da água, enquanto que áreas mais declivosas possuem um fator limitante ao acúmulo de material. Já o Índice de Umidade Topográfico (IUT) foi escolhido devido a sua aplicação como variável em mapeamentos digitais de solo. Como existe uma correlação entre os tipos de solos e os ECS essa variável apresentou-se como uma informação em potencial na modelagem dos dados. O IUT também é utilizado para separar os solos com caráter hidromórfico, de áreas com relevo plano, e de outros solos de ocorrência de áreas de relevo suave ondulado e plano (Sitoli, 2008; Prates 2010). O Quadro 3 apresenta uma síntese das variáveis morfométricas utilizadas nesse estudo.

Quadro 3. Síntese das variáveis morfométricas utilizadas no estudo.

Variável	Conceito	Forma de se estimar	Unidade de medida
Declividade	Ângulo de inclinação (zenital) da superfície do terreno em relação à horizontal.	Proporção entre desníveis altimétricos entre pixels vizinhos e suas respectivas distâncias horizontais.	Graus, 0 a 90° ou porcentagem, 0 ao infinito.
Índice de Umidade Topográfico (TWI)	Distribuição espacial de zonas de saturação superficial e conteúdo de água nas paisagens.	Produto dos fatores L e S, calculados em função da declividade, direção de fluxo e quantidade de fluxo acumulado por pixel.	Adimensional

Fonte: Lima (2013)

4.2.2.3. Aquisição dos dados pedológicos

Os dados pedológicos utilizados foram provenientes de duas etapas, uma configurou-se na compilação de dados já existentes na área de estudo segundo Lima (2013) e as informações complementares foram levantadas em campo. A metodologia utilizada em

campo foi à mesma adotada por Lima (2013), visto que alterações na metodologia poderia ocasionar a incompatibilidade na comparação de dados.

A metodologia utilizada para a realização das coletas de amostras de solo em campo foi a proposta por Santos et al., (2005) descrita no Manual de Coleta e Descrição de Solos no Campo. Ao todo foram coletadas 317 amostras de solo distribuídas entre 71 pontos na bacia do Sarandi. Todas as amostras deformadas foram coletadas utilizando-se de trado holandês, para realização de análises químicas e parte das análises física, e trado do tipo TAI (trado para coleta de amostras indeformadas do solo) para realização de análise física de densidade do solo, para o cálculo dos estoques de carbono no solo.

Após a fase de coleta de amostras em campo as mesmas foram armazenadas em sacos plásticos e posteriormente preparadas para a caracterização física e química em terra fina seca ao ar (TFSA) (Embrapa, 1997). Na rotina de análise química foram caracterizados os seguintes elementos: capacidade de troca catiônica (CTC), pH em água, cálcio + magnésio, fósforo, carbono, matéria orgânica, acidez titulável (H+Al), potássio, saturação por bases (V), soma de bases (SB). Na rotina de análise física foram realizadas as análises de textura e densidade do solo. As análises químicas foram realizadas segundo as recomendações do Manual de Análises Químicas de Solo, Plantas e Fertilizantes (Silva, 2009).

4.2.2.4. Regressão Geograficamente Ponderada (GWR)

A técnica utilizada consta no software ArcGis, desenvolvido pela ESRI. A técnica parte do princípio da definição de equações de regressão local para cada conjunto de feições analisadas no conjunto dos dados utilizados. Apesar da técnica do GWR consistir na utilização de uma ferramenta, em específico no software, a análise completa do procedimento requer a execução de uma série de procedimentos que serão necessários para a obtenção de resultados realmente consistentes.

No conjunto de análises e procedimentos realizados até chegar-se aos modelos finais encontra-se a análise da multicolinearidade dos dados, que consiste basicamente no agrupamento espacial de variáveis independentes. Teste como o de Akaike Information Criterion (AIC) também foram realizados para obtenção de melhores resultados. Entre as análises presentes na fase de execução do procedimento encontra-se o teste de avaliação de redundância entre variáveis independentes (Variance Inflation Factor – VIF). A utilização do VIF permite ao operador limitar o aplicativo a utilizar na execução da modelagem apenas os valores inferiores a 7,5, evitando com isso que o modelo possua alto grau de redundância.

Na fase de ajuste da técnica deve-se, ainda, atentar-se a escolha do ajuste do tipo Kernel (adaptativo) ou do tipo fixo. O modelo de tipo Kernel não é aconselhável quando a base de dados for de tamanho reduzido.

Os procedimentos do GWR foram executados na extensão *Spatial Statistics Tools*, no ArcGis 10.2, porém antes da execução da técnica fez-se necessário a realização de três etapas, separadas com o objetivo de facilitar a modelagem e tornar o processo de compreensão mais intuitivo.

A etapa um consistiu na definição dos limites que seriam utilizados para a modelagem dos estoques de carbono no solo. A definição das unidades de modelagem foi resultado do cruzamento do mapa de solos com o de cobertura vegetal e uso do solo. A partir da fusão dessas duas informações foi possível a definição de áreas com características mais homogêneas.

A etapa dois, diferentemente da primeira, consistiu na organização dos dados coletados em campo e na geração de informações complementares, essas extraídas do SRTM. A partir do SRTM foram extraídas variáveis morfométricas, declividade e índice de umidade topográfica, e com os dados pedológicos foram realizados procedimentos de estatística descritiva afim de se obter os valores médios dos dados sobre cada unidade de análise para posterior inserção em ambiente SIG.

A etapa final, terceira, consistiu na análise da regressão, escolha do melhor modelo, execução da OLS e posteriormente geração dos estoques de carbono por meio da GWR. A Figura 12 apresenta sinteticamente o procedimento para execução do método GWR.

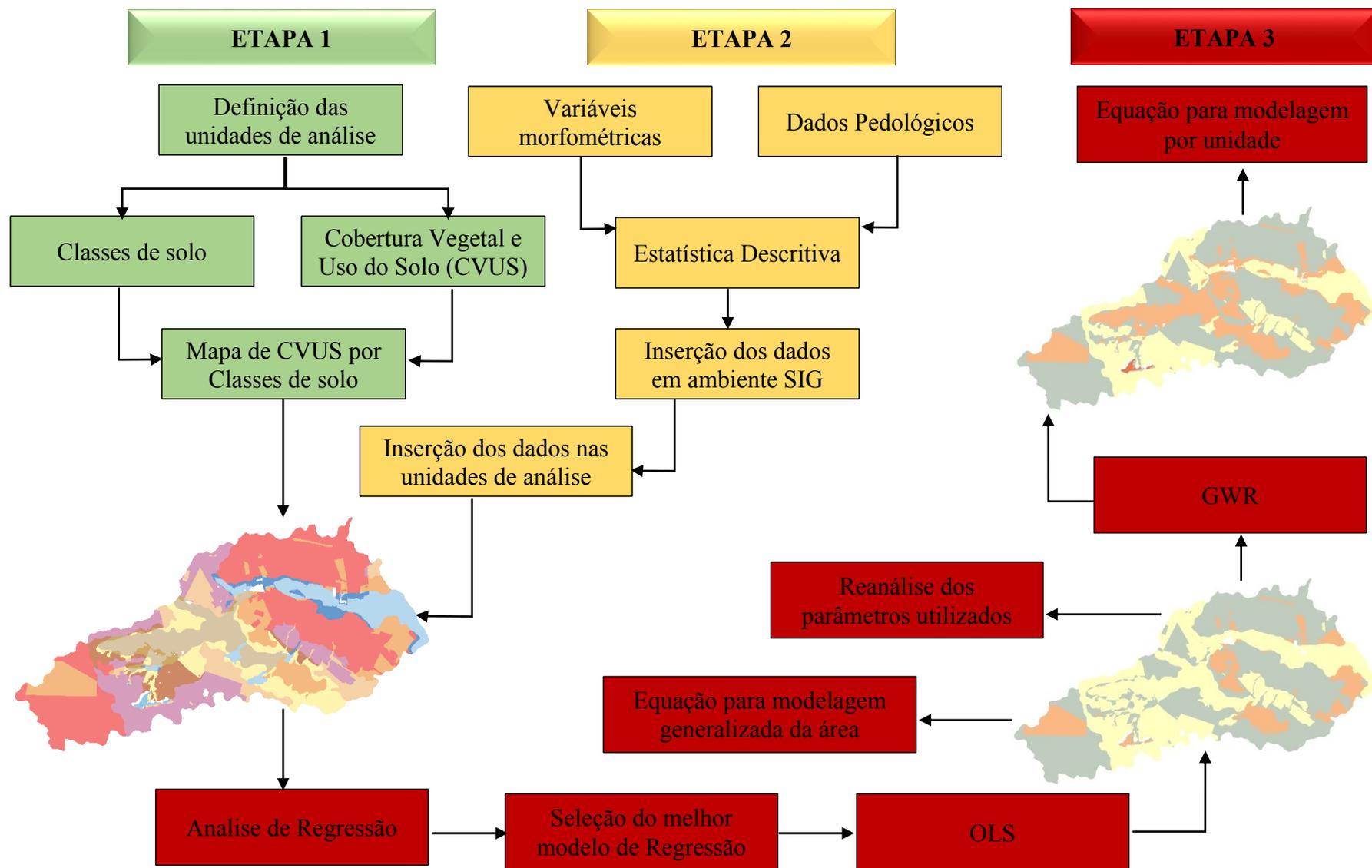


Figura 11. Etapas da aplicação do GWR para modelagem dos estoques de carbono no solo na bacia do Sarandi

Inicialmente foi definida qual seria a unidade mínima de análise para aplicação da técnica do GWR. Como a proposta configura-se em testar uma metodologia para geração dos estoques de carbono no solo, sem a necessidade de se realizar grandes esforços amostrais, definiu-se que a unidade seria as classes de solo compostas com os tipos de uso e cobertura vegetal. Vale ressaltar, que devido a quantidade de dados disponíveis, as unidades foram delimitadas de acordo com a situação da cobertura vegetal, em natural ou antropizada, conforme apresentado na Tabela 10,.

Tabela 10. Distribuição das unidades utilizadas para geração do modelo.

Classe de Solo	Situação da cobertura vegetal	Área (ha)
Latossolo Vermelho	Antrópica	1008,32
Latossolo Vermelho	Natural	368,59
Latossolo Amarelo	Antrópica	127,68
Latossolo Amarelo	Natural	273,45
Latossolo Vermelho-Amarelo	Antrópica	467,11
Latossolo Vermelho-Amarelo	Natural	232,07
Cambissolo Háplico	Antrópica	30,05
Cambissolo Háplico	Natural	273,85
Gleissolo Háplico	Natural	226,31
Gleissolo Háplico	Antrópica	74,94
Gleissolo Melânico	Natural	8,87
Gleissolo Melânico	Antrópica	7,37

Foram utilizadas as unidades de classes de solo em relação a sua cobertura vegetal natural ou antrópica e algumas áreas foram removidas como as áreas com massas d'água, lagos e reservatórios, e a área de Gleissolo Melânico (GM) sobre área antropizada.

Como a análise feita objetivou a espacialização dos ECS foram admitidos valores médios das variáveis utilizadas no modelo. Os valores admitidos médios, para cada unidade de análise, foram gerados a partir de um conjunto de "X" de amostras. Áreas em que não dispunham de mais de uma amostra admitiu-se aquele que o valor da unidade seria o correspondente a amostra existente. Esse procedimento se repetiu para as cinco profundidades analisadas, 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60, 60-80 cm 80-100 cm. Sempre que uma unidade espacial de análise não possuía dados, a mesma era removida do procedimento.

De posse das unidades de análise, os valores médios foram inseridos em cada uma delas para posterior realização da Análise de Regressão. A partir da etapa da análise de regressão todas as variáveis são testadas para definir-se qual conjunto de dados melhor explica a variável dependente, no caso os ECS. Após a fase inicial de análise foi utilizada a ferramenta de estatística espacial “OLS” (Ordinary Least Squares – Mínimos Quadrados Ordinários – MQO). Nessa etapa foi testado o ajuste da variável dependente em relação às variáveis explicativas.

Após a conferência do modelo de regressão global gerado pela OLS foi realizada a análise pelo método do GWR. Essa etapa consiste no ajuste do modelo de regressão para cada ponto de conjunto de dados, ponderando as observações e o resultado é o conjunto de parâmetros ajustados para cada unidade geográfica analisada (Carvalho et al., 2006).

4.2.2.5. Validação

Os resultados foram validados por meio de um conjunto de amostras previamente separados. Nas unidades de análise que possuíam apenas uma amostra não foi realizado o processo de validação devido à indisponibilidade de dado. Assim como, no processo metodológico de aplicação da técnica do GWR a fase de validação consistiu na comparação dos resultados obtidos pela modelagem com as médias dos estoques de carbono das amostras de validação.

4.3. Resultados

Na modelagem dos estoques de carbono no solo a partir da técnica do GWR foi possível a obtenção de modelos de regressão tanto global, na fase de execução da OLS, quanto modelos locais para estimar os estoques de carbono no solo de acordo com cada profundidade analisada e em conformidade com cada conjunto de variáveis capaz de explicar o comportamento dos ECS.

Na análise da profundidade 0-20 cm a regressão indicou como variáveis respostas para os estoques de carbono no solo a areia total, silte, relação silte/argila e o fósforo.

Tanto na OLS quanto no GWR os coeficientes de correlação ajustado apresentaram bons resultados, ambos R^2 ajustado igual a 0,96. Na verificação dos resultados gerados no GWR observou-se que os parâmetros para regressão local eram idênticos aos parâmetros da regressão global. Devido à homogeneidade dos parâmetros optou-se pela apresentação da regressão global. A equação global gerada pela OLS para os estoques de carbono no solo na

profundidade de 0-20 cm possui os seguintes parâmetros: $ECS_{(0-20cm)} = 44,37 + (-0,21 \times \text{areia total}) + (-0,63 \times \text{silte}) + (10,10 \times \text{relação silte argila}) + (1,08 \times \text{fósforo})$. Além da equação de regressão global pode-se observar a distribuição dos estoques de carbono no solo gerados na bacia do Sarandi na profundidade de 0-20 cm, Figura 13.

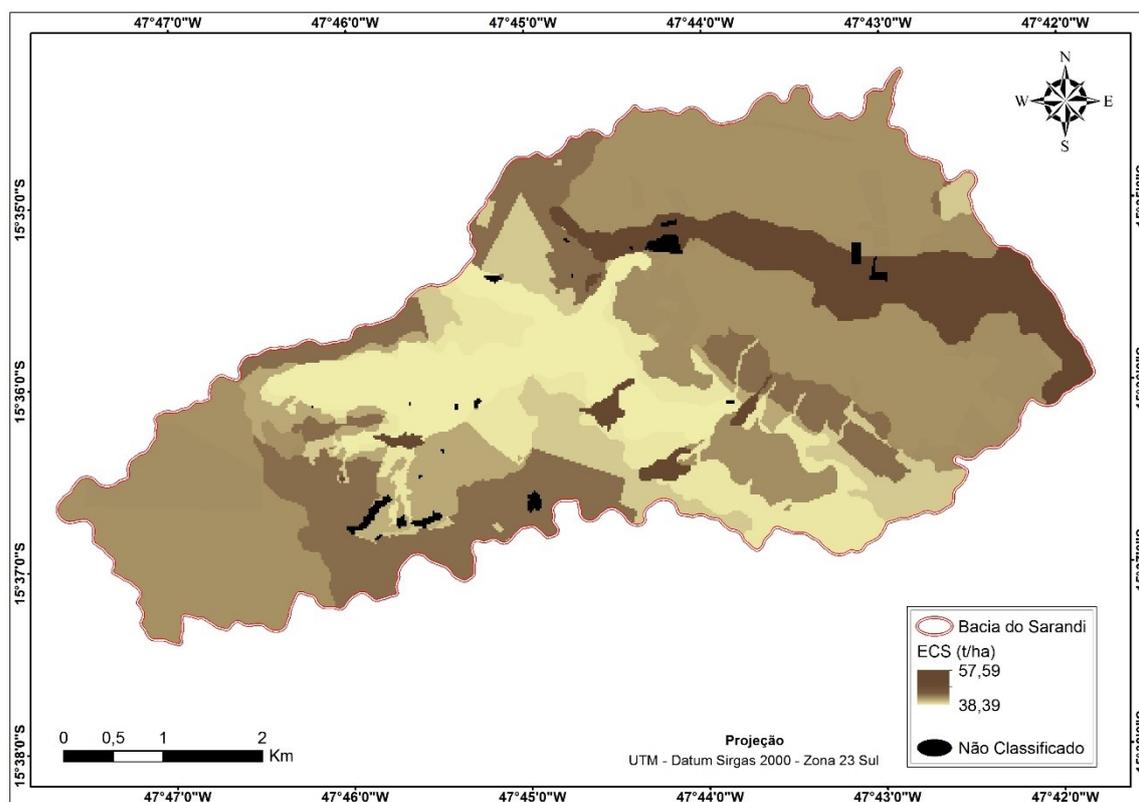


Figura 12. Distribuição dos estoques de carbono no solo gerados pela técnica GWR na profundidade de 0-20 cm, na bacia do Sarandi.

Além da espacialização dos estoques de carbono no solo é possível analisar os resíduos, diferença entre o dado observado e o estimado pelo modelo. Em conjunto com o mapa é possível aferir onde o modelo obteve melhor desempenho e onde a resposta não foi satisfatória. Os resultados obtidos pela técnica GWR pouco se diferenciou da OLS indicando que para essa escala de análise em ambas as regressões, local e global, apresentam resultados similares para a modelagem dos estoques de carbono no solo. Os valores para a equação de regressão local gerada pela técnica GWR praticamente em nada se diferenciou do passo anterior, OLS. Uma das possíveis causas dessa similaridade pode estar associada ao quantitativo de dados isso devido a separação das unidades de análise por classe de solo sobre situação do uso e cobertura vegetal do solo. Na Tabela 11 é possível ver um resumo dos dados obtidos para a camada de 0-20 cm.

Tabela 9. Dados obtidos pela técnica GWR para a camada de 0-20 cm na bacia do Sarandi.

Classe de Solo	Situação	ECS Observado	ECS Predito	Resíduo	Resíduo padronizado	ECS Validação
LV	Antrópica	32,89	34,50	-1,60	-1,10	28,30
LV	Natural	34,07	34,71	-0,64	-0,43	32,44
LA	Antrópica	33,38	33,16	0,22	0,61	43,55
LA	Natural	30,41	29,81	0,60	0,43	29,16
LVA	Antrópica	37,26	36,82	0,44	0,35	34,93
LVA	Natural	29,38	31,31	-1,93	-1,31	28,11
CX	Antrópica	30,35	29,55	0,80	0,77	SDV*
CX	Natural	28,19	28,79	-0,60	-0,55	44,69
GX	Natural	39,53	39,56	-0,03	-0,03	32,07
GX	Antrópica	57,66	57,60	0,06	0,65	50,45
GM	Natural	35,43	32,74	2,69	2,02	SDV*
GM	Antrópica	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**

* Sem dado para validação (SDV). ** Sem dado (SD). Cambissolo Háplico (CX); Gleissolo Melânico (GM); Gleissolo Háplico (GX); Latossolo Amarelo (LA); Latossolo Vermelho (LV); Latossolo Vermelho Amarelo (LVA); ECS – Estoque de Carbono no Solo.

Conforme apresentado anteriormente, as unidades de análise que não possuíam informações foram retiradas da modelagem e as unidades que possuíam apenas uma amostra, a mesma foi utilizada para gerar o modelo, porém nesses casos não houve dados posteriores para comparar com os dados obtidos em cada uma das etapas da modelagem, OLS e GWR.

Já na análise da profundidade 20-40 cm a regressão indicou como variáveis respostas para os estoques de carbono no solo a declividade, relação silte/argila, H+Al e saturação por base (SB). Os resultados da OLS e GWR apresentaram adequados R^2 ajustado, ambos 0,9. As variáveis controladoras dos estoques de carbono no solo na profundidade 20-40 cm, foram diferentes da camada 0-20 cm, apenas o dado da relação silte/argila manteve-se presente como controlador dos ECS nessa profundidade. A equação global gerada pela OLS apresentou os seguintes parâmetros: $ECS_{(20-40\text{ cm})} = 12,32 + 1,77 \times \text{declividade} + (-39,18 \times \text{relação silte argila}) + (3,41 \times H+Al) + (0,54 \times SB)$.

Uma das limitações encontradas ao longo do procedimento de modelagem foi a ausência de dados em camadas mais inferiores do solo. Esse fator ocasionou a ausência da modelagem nas camadas mais profundas, gerando com isso nos mapas áreas não

classificadas. Assim como na camada 0-20 após executar a técnica do OLS foi gerado o modelo a partir do GWR. Repetindo-se a tendência da camada anteriormente analisada na profundidade 20-40 cm o GWR não apresentou diferença quanto os parâmetros obtidos pelo modelo global e apresentou um R^2 ajustado de 0,9. A espacialização dos estoques de carbono no solo pode ser observada na Figura 14.

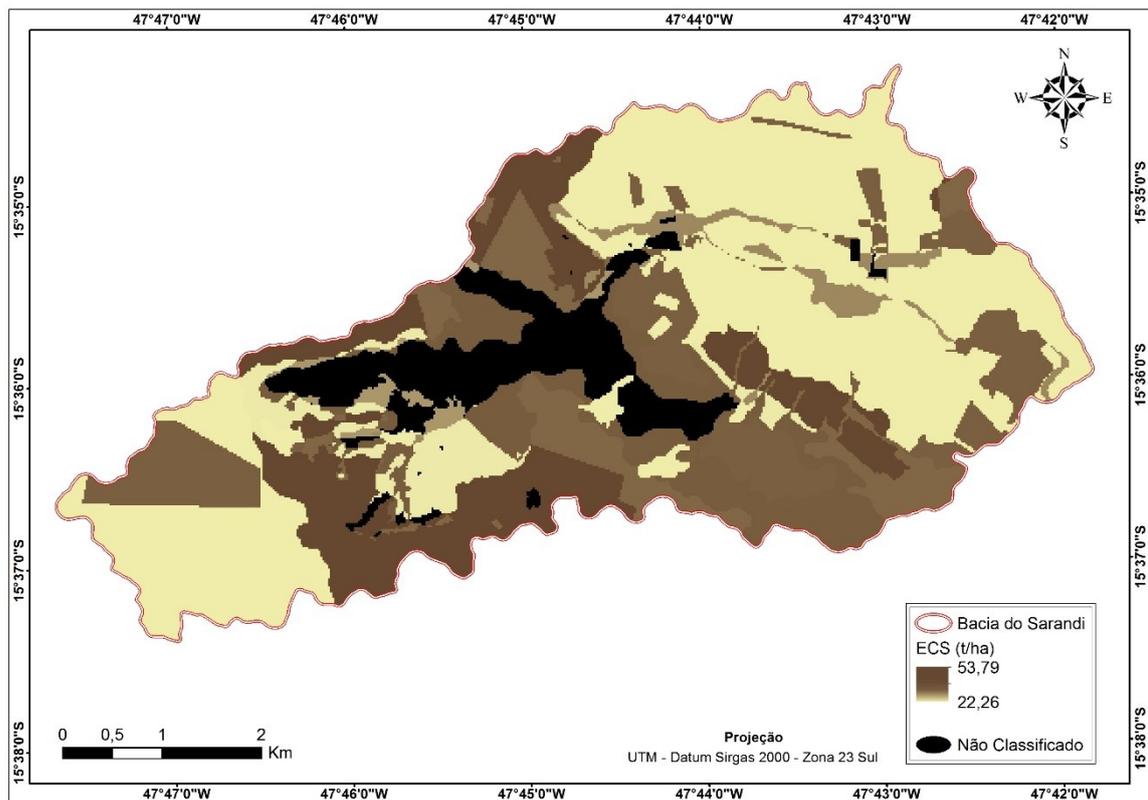


Figura 13. Distribuição dos estoques de carbono no solo gerados pela técnica GWR na profundidade de 20-40 cm, na bacia do Sarandi.

Após a aplicação da técnica do GWR para a profundidade de 20-40 cm observou-se que não há uma diferenciação entre a regressão global e local. A verificação das fases do procedimento para a camada de 20-40 cm, bem como a comparação dos resultados com a média dos dados de estoque de carbono no solo que não entraram no modelo pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 10. Dados obtidos pela técnica GWR para a camada de 20-40 cm na bacia experimental do Sarandi.

Classe de Solo	Situação	ECS Observado	ECS Predito	Resíduo	Resíduo padronizado	ECS Validação
LV	Antrópica	24,35	22,26	2,09	0,84	23,56
LV	Natural	28,06	28,89	-0,83	-0,32	21,11
LA	Antrópica	23,20	24,82	-1,62	-0,71	20,85
LA	Natural	32,90	29,03	3,87	1,45	22,69
LVA	Antrópica	29,45	29,78	-0,33	-0,90	34,00
LVA	Natural	24,41	28,63	-4,22	-1,59	20,82
CX	Antrópica	26,89	27,04	-0,15	-0,16	SDV*
CX	Natural	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**
GX	Natural	22,91	22,28	0,63	0,26	29,28
GX	Antrópica	27,69	27,53	0,16	0,14	29,95
GM	Natural	54,19	53,79	0,40	0,58	SDV*
GM	Antrópica	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**

* Sem dado para validação (SDV). ** Sem dado (SD). ***Cambissolo Háplico (CX); Gleissolo Melânico (GM); Gleissolo Háplico (GX); Latossolo Amarelo (LA); Latossolo Vermelho (LV); Latossolo Vermelho Amarelo (LVA); ECS – Estoque de Carbono no Solo.

Nessa etapa da análise, conforme mencionado anteriormente, foi necessário remover a unidade de análise referente ao CX sobre áreas naturais e o GM sobre áreas antrópicas. Nas áreas de CX antropizada não foi possível comparar os resultados do GWR com valores de ECS que não entraram no modelo devido a ausência de informação, porém a unidade de análise ainda pode ser aferida com base nos resultados de resíduo.

Para a camada 40-60 cm, outro conjunto de variáveis respostas para os ECS foi obtido. O procedimento indicou como variáveis respostas para os estoques de carbono no solo: a argila, areia grossa, H+Al e Ca². Similarmente o modelo demonstrou bons resultados na análise do GWR apresentando R² ajustado 0,9. Tratando-se dos parâmetros para a equação não houve diferenciação dos parâmetros locais para o global e devido a essa similaridade foi adotado a regressão global gerada pela OLS. O procedimento forneceu a seguinte equação: $ECS_{(40-60cm)} = -64,02 + (0,57 \times \text{argila}) + (2,74 \times \text{areia grossa}) + (5,9 \times \text{H+Al}) + (25,89 \times \text{Ca}^2)$.

Na camada 40-60 cm apesar do modelo indicar boa correlação, R^2 ajustado de 0,9, nota-se pelos dados que o modelo tem perdido qualidade se comparado com as camadas anteriormente analisadas. A distribuição dos estoques de carbono no solo resultantes dessa etapa pode ser observada na Figura 15.

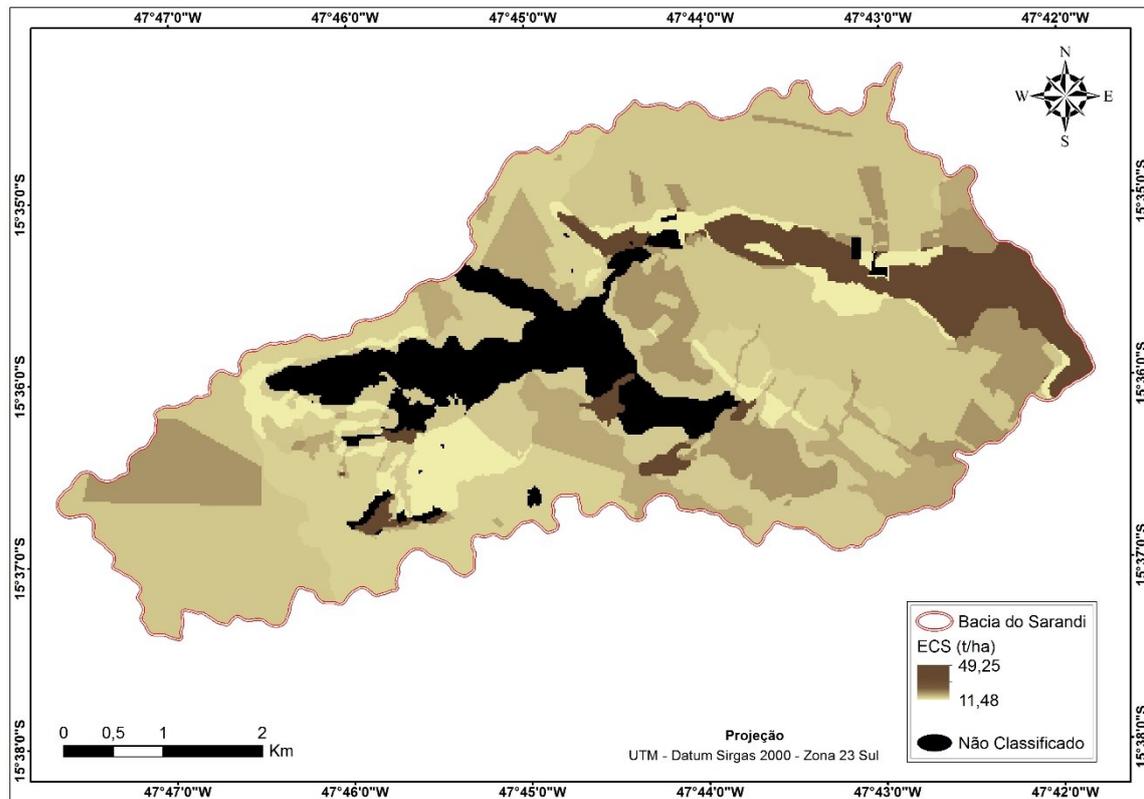


Figura 14. Distribuição dos estoques de carbono no solo gerados pela técnica GWR na profundidade de 40-60 cm, na bacia do Sarandi.

Mesmo com a perda de qualidade se comparado com os modelos gerados para as camadas anteriores analisadas observa-se que os resíduos não apresentaram valores elevados, indicando que as variáveis utilizadas na técnica GWR tem apresentado resultados satisfatórios. A verificação dos resultados obtidos na modelagem da camada 40-60 cm, bem como a comparação dos resultados com a média dos dados de estoque de carbono no solo que não entraram no modelo pode ser observado na Tabela 13.

Tabela 11. Dados obtidos pela técnica GWR para a camada de 40-60 cm na bacia do Sarandi.

Classe de Solo	Situação	ECS Observado	ECS Predito	Resíduo	Resíduo padronizado	ECS Validação
LV	Antrópica	18,06	18,48	-0,41	-0,16	19,08
LV	Natural	20,65	25,91	-5,26	-1,63	19,19
LA	Antrópica	14,68	13,39	1,29	0,39	12,80
LA	Natural	20,30	18,08	2,22	0,73	21,47
LVA	Antrópica	21,10	17,19	3,90	1,31	20,85
LVA	Natural	19,60	22,72	-3,12	-0,97	17,83
CX	Antrópica	18,95	18,60	0,35	0,17	SDV*
CX	Natural	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**
GX	Natural	37,91	39,08	-1,17	-0,66	29,82
GX	Antrópica	10,93	11,49	-0,56	-0,45	8,38
GM	Natural	52,02	49,26	2,76	1,62	SDV*
GM	Antrópica	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**

* Sem dado para validação (SDV). ** Sem dado (SD). ***Cambissolo Háplico (CX); Gleissolo Melânico (GM); Gleissolo Háplico (GX); Latossolo Amarelo (LA); Latossolo Vermelho (LV); Latossolo Vermelho Amarelo (LVA);ECS – Estoque de Carbono no Solo.

Nessa etapa da análise, conforme mencionado anteriormente, foi necessário remover a unidade de análise referente ao CX sobre áreas naturais e o GM sobre áreas antrópicas. Nas áreas de CX antropizada não foi possível comparar os resultados do GWR com valores de ECS que não entraram no modelo devido a ausência de informação, porém a unidade de análise ainda pode ser aferida com base nos resultados de resíduo.

Na análise dos dados da camada 60-80 o modelo apresentou como variáveis resposta para os estoques de carbono no solo a declividade, fósforo, Ca^2 e CTC. Assim, como os modelos anteriores o R^2 ajustado apresentou bom resultado, 0,98. Após análise, não houve diferenciação entre os dados da equação global para a local, adotou-se os seguintes parâmetros para a equação da regressão na camada de 60-80 cm: $ECS_{(60-80\text{ cm})} = 23,92 + (-4,33 \times \text{declividade}) + (-22,66 \times \text{fósforo}) + (-26,29 \times Ca^2) + (5,40 \times CTC)$. Além da diferenciação nos parâmetros utilizados para a regressão notou-se que os resíduos apresentaram menores valores. A espacialização dos estoques de carbono no solo pode ser observada, conforme Figura 16.

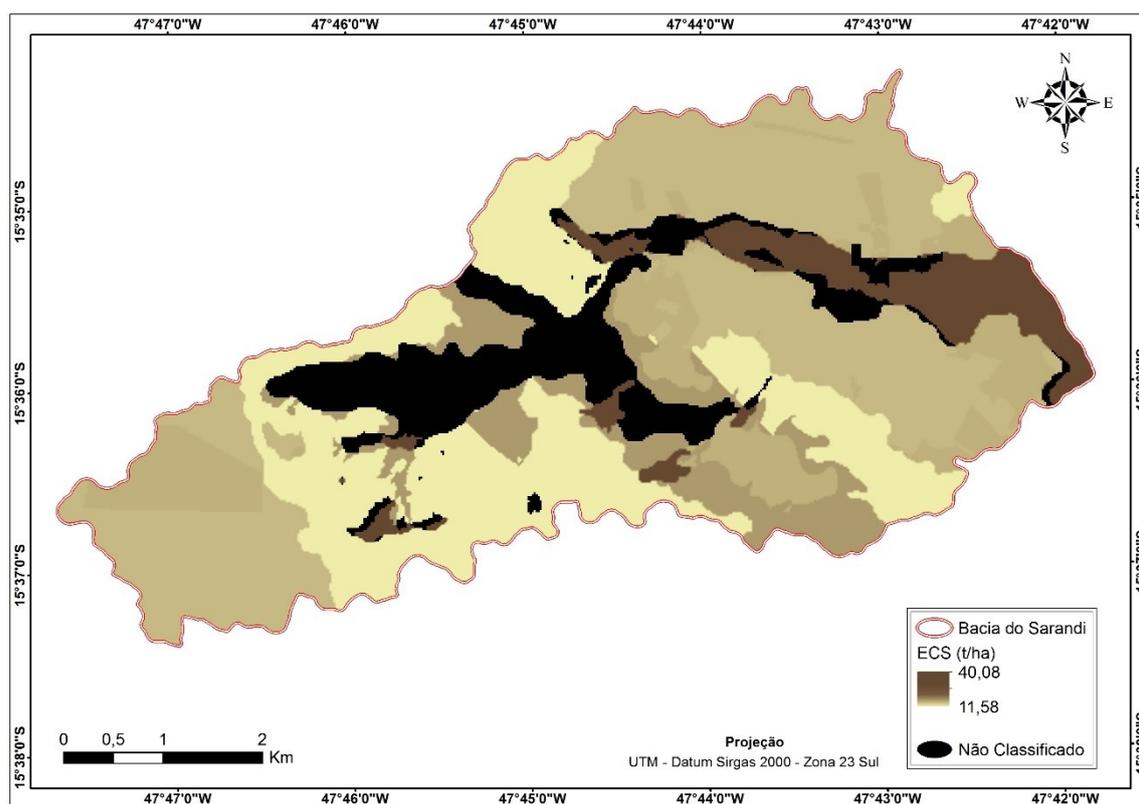


Figura 15. Distribuição dos estoques de carbono no solo gerados pela técnica GWR na profundidade de 60-80 cm, na bacia do Sarandi.

A partir dos dados, Tabela 14, observa-se que a variação do dado foi menor, fator esse que se explica devido a menor interferência do uso do solo devido ao afastamento das camadas iniciais. Assim como, já apresentado anteriormente algumas unidades de análise não foi possível a comparação dos dados gerados no modelo com os pontos de validação. Na camada de 60-80 cm o LA e GM sobre áreas naturais não foi possível realizar essa comparação, porém é possível comparar os valores preditos e o resultado dos resíduos.

Apesar da limitação da disponibilidade de dados para a comparação dos dados obtidos pela técnica, constatou-se que os resultados de resíduo se configuram como bom indicador para análise da confiabilidade dos dados gerados. A verificação do comportamento dos resultados obtidos na camada 60-80 cm pode ser observada na Tabela 14.

Tabela 12. Dados obtidos pela técnica GWR para a camada de 60-80 cm na bacia do Sarandi

Classe de Solo	Situação	ECS Observado	ECS Predito	Resíduo	Resíduo padronizado	ECS Validação
LV	Antrópica	16,29	16,67	-0,38	-0,53	15,83
LV	Natural	16,92	17,11	-0,19	-0,22	15,59
LA	Antrópica	12,64	11,59	1,06	1,53	SDV*
LA	Natural	17,36	18,57	-1,21	-1,63	15,09
LVA	Antrópica	13,62	13,82	-0,20	-0,25	17,17
LVA	Natural	14,15	13,72	0,43	1,13	14,00
CX	Antrópica	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**
CX	Natural	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**
GX	Natural	24,70	24,50	0,20	0,84	18,50
GX	Antrópica	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**
GM	Natural	40,38	40,09	0,29	1,66	SDV*
GM	Antrópica	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**

* Sem dado para validação (SDV). ** Sem dado (SD). ***Cambissolo Háplico (CX); Gleissolo Melânico (GM); Gleissolo Háplico (GX); Latossolo Amarelo (LA); Latossolo Vermelho (LV); Latossolo Vermelho Amarelo (LVA); ECS – Estoque de carbono no Solo.

Na última camada modelada, 80-100 cm, o modelo apresentou como parâmetros: a declividade, a areia grossa, a areia fina e a saturação por bases V (%) como sendo as variáveis respostas para os estoques de carbono no solo. O R² ajustado dessa camada foi de 0,96 e a única variável que se manteve, em relação a modelagem da camada de 60-80 cm, foi a declividade, indicando que provavelmente nas camadas mais inferiores a posição na paisagem é um indicador potencial para os estoques de carbono no solo. No que diz respeito à equação de regressão não houve diferenciação entre a local e global adotando-se assim, conforme feito anteriormente, os parâmetros da equação global, ficando da seguinte forma: $ECS_{(80-100\text{ cm})} = 19,26 + (2,55 \times \text{declividade}) + (-0,57 \times \text{areia grossa}) + (-0,21 \times \text{areia fina}) + (-0,24 \times V (\%))$. Assim como, nas fases anteriores as unidades que não possuíam dados foram retiradas do mapa. O mapa com os resultados dos estoques de carbono no solo para a camada 80-100 cm pode ser observado na Figura 17.

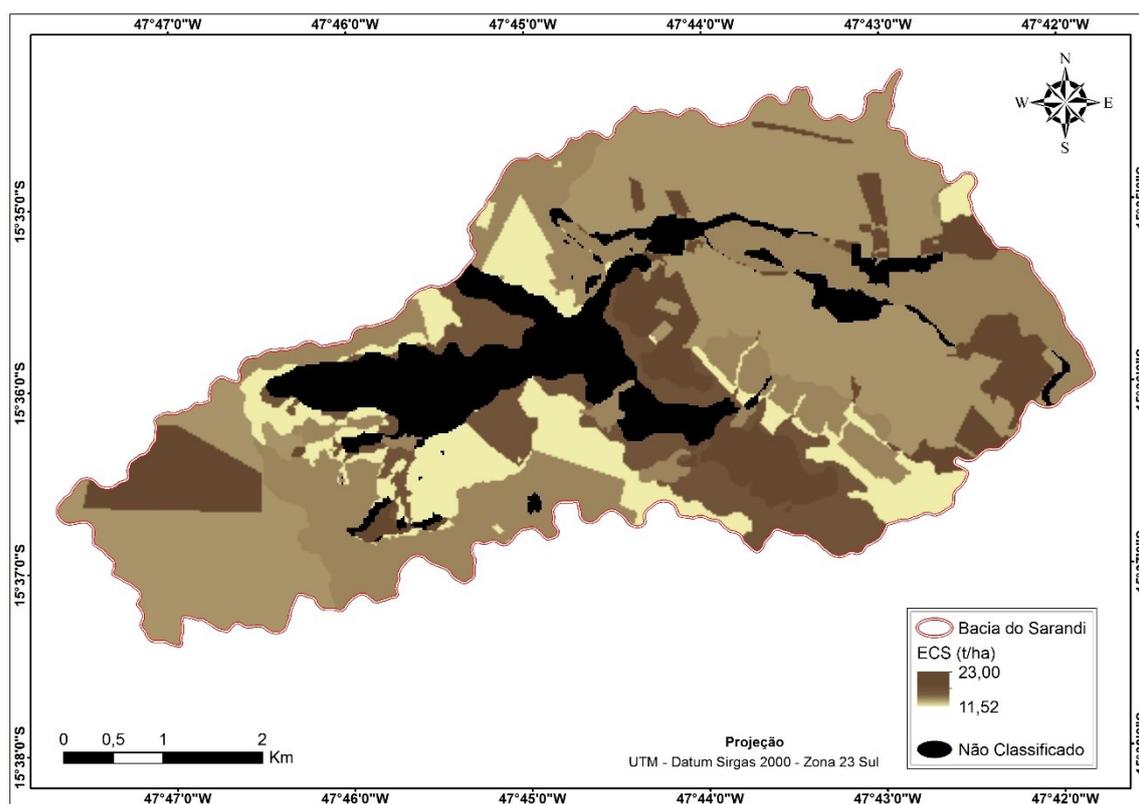


Figura 16. Distribuição dos estoques de carbono no solo gerados pela técnica GWR na profundidade de 80-100 cm, na bacia experimental do Sarandi.

Repetindo-se a tendência da camada 60-80 cm analisada, essa fase apresentou resíduo baixo, o que indica que a diferença entre o dado observado e gerado pelo modelo é pequena, fator esse associado, conforme já mencionado, a maior estabilidade dos componentes do solo e da paisagem nas camadas mais inferiores dos solos. O mesmo procedimento de exclusão de algumas unidades de análise foi realizado devido à ausência de dados para utilizar o GWR. Além da exclusão dessas unidades de análise, em algumas áreas não foi possível a comparação dos resultados obtidos com dados de validação.

Mesmo com a carência de alguns dados, situação essa já esperada devido a proposta de se aproveitar dados já existentes e realizar o menor esforço amostral possível, a modelagem na camada 80-100 cm apresentou bons resultados. A partir do resumo dos dados encontrados nessa fase, Tabela 15, é possível aferir como comportou-se a modelagem dos estoques de carbono no solo sobre cada unidade de análise.

Tabela 13. Dados obtidos pela técnica GWR para a camada de 80-100 cm na bacia do Sarandi.

Classe de Solo	Situação	ECS Observado	ECS Predito	Resíduo	Resíduo padronizado	ECS Validação
LV	Antrópica	13,59	13,85	-0,26	-0,66	13,17
LV	Natural	15,31	15,98	-0,67	-1,13	13,91
LA	Antrópica	11,64	11,53	0,11	0,30	SDV*
LA	Natural	15,84	15,64	0,20	0,92	15,22
LVA	Antrópica	15,13	14,26	0,86	1,51	15,17
LVA	Natural	11,72	11,92	-0,20	-0,62	12,44
CX	Antrópica	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**
CX	Natural	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**
GX	Natural	14,13	14,24	-0,11	-0,24	17,94
GX	Antrópica	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**
GM	Natural	23,07	23,01	0,07	0,32	SDV*
GM	Antrópica	SD**	SD**	SD**	SD**	SD**

* Sem dado para validação (SDV). ** Sem dado (SD). ***Cambissolo Háplico (CX); Gleissolo Melânico (GM); Gleissolo Háplico (GX); Latossolo Amarelo (LA); Latossolo Vermelho (LV); Latossolo Vermelho Amarelo (LVA); ECS – Estoque de Carbono do Solo.

4.4. Discussão

A proposta de estimar os estoques de carbono no solo por meio de outras variáveis ambientais é algo que já vêm sendo utilizado em outros trabalhos, como o de Hoffmann et al., 2014. Nesse trabalho se propôs em aplicar a técnica da Regressão Geograficamente Ponderada como uma alternativa para se estimar os ECS sem a necessidade de se realizar intensivos esforços amostrais.

Diferentemente do que se observa em alguns trabalhos como os de Morais (2014) e Minasny et al., (2006) em que os dados são interpolados, esse trabalho buscou utilizar a técnica para uma espacialização dos estoques de carbono no solo por unidades de análise na paisagem.

É evidente que as técnicas de interpolação de dados possuem sua importância e muito tem contribuído em diversos estudos, porém interpolar dados referentes aos estoques de carbono no solo, estando ciente de que esse componente ambiental possui comportamento distinto de acordo com cada classe de solo, tipo de cobertura vegetal, histórico da área,

posição na paisagem, regime pluviométrico entre tantos outros fatores torna-se algo a pensar com bastante atenção.

No presente trabalho as unidades para aplicação da técnica do GWR foram separadas por classes de solo por situação da cobertura vegetal do solo (antropizada ou natural), porém ressalta-se que essas unidades podem ser redefinidas de acordo com a necessidade de cada estudo e com a quantidade de dados disponíveis. Apesar de não ter sido testado no presente estudo, acredita-se que à medida que a escala de análise for alterada as equações de regressão do tipo local possuirão melhor poder de resposta para os estoques de carbono no solo, visto que isso minimizaria a generalização das análises.

Verifica-se que a técnica do GWR em conjunto com as etapas de exploração de modelos de regressão e análise dos mínimos quadrados (*Ordinary Least Squares – OLS*) configura-se como um procedimento eficaz para a predição e espacialização dos estoques de carbono no solo, sem que haja a necessidade de grandes esforços amostrais. Procedimento esse que pode ser executado para levantamentos prévios de ECS a partir de dados existentes já disponíveis como os mapas de uso e cobertura vegetal do solo e mapas de solos, uma vez que, as variáveis necessárias para a execução do procedimento podem ser retiradas dos valores médios de cada variável intrínseca em cada classe de solo. No que tange a disponibilização de mapas de solos para a execução desse procedimento, trabalhos com o de Lima et al. (2013) voltado para o mapeamento digital de solos configura-se como uma das ferramentas de auxílio no processo de se predizer os estoques de carbono no solo.

4.5. Considerações finais

A proposta de modelar estoques de carbono no solo por meio de técnicas como a GWR possui grande potencial visto que pode reduzir custos e tempo no levantamento da informação. A utilização de ferramentas como a apresentada configura-se como uma alternativa para geração de mapa de estoques de carbono no solo a partir de informações já existentes, provenientes de mapas de solos e outras bases cartográficas.

Porém ficou claro no presente trabalho que, ainda, se faz necessário a realização de mais testes em áreas experimentais que possuam conjunto de informações mais robustas dado que os estoques de carbono no solo sofrem influência de diversos processos.

Nesse sentido o trabalho sinalizou para aprimoramento da técnica apresentada e para elucidar questões referentes a limitações de coleta de dados e espacialização da informação.

4.5. REFERÊNCIAS

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; MARTINS, S.C.; GROppo, J.D.; SALGADO, P. R.; EVANGELISTA, B.; VASCONCELLOS, E.; SANO, E.E.; PAVÃO, E.; LUNA, R.; CAMARGO, P.B. and MARTINELLI, L.A. 2013. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences Discussions**, 10:5499–5533.

ASSIS, T.; COUTO-JUNIOR, A.F.; NEVES, G.; REATTO, A.; MARTINS, E.S.; GOMES, M.P.; SENA-SOUZA, J.P.; REIS, A.M.; RAMALHO, L.S.; CLAUDINO, V.C.M. 2013. Evolução temporal da cobertura da terra de uma bacia experimental do Cerrado utilizando sensoriamento remoto multisensor e multitemporal. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 7739-7745.

ALVES, M.R. Múltiplas técnicas no mapeamento digital de solos. **Tese de Doutorado**. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba, 2008, 160 p.

BARTHÈS, B.G.; KOUAKOUA, E.; LARRÉ-LARROUY, M.C.; RAZAFIMBELO, T.M.; LUCA, E.F.; AZONTONDE, A.; NEVES, C.S.V.J.; FREITAS, P.L. & FELLER, C.L. 2008. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. **Geoderma**, 143:14-25.

BENNEMA, J. 1974. Organic carbon profiles in Oxisols. **Pedologie**, 24:119-146.

BORTOLON, E.S.O.; MIELNICZUK, J. TORNQUIST, C.G.; LOPES, F.; GIASSON, E.; BERGAMASCHI, H. Potencial de uso do modelo Century e SIG para avaliar o impacto da agricultura sobre estoques regionais de carbon orgânico do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 831-849, 2012.

BRUSDON, C.; FOTHERINGHAM, A. S.; CHARLTON, M.E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. **Geographical Analysis**, 28(4): 281 -298, 1996.

CALONEGO, J.C.; SANTOS, C.H.; TIRITAN, C.S.; JUNIOR, J.R.C. Estoques de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 2, p. 128-135, 2012.

CÂMARA, G; MONTEIRO, A. M.; CARVALHO, M. 2002. - “Análise Espacial e Geoprocessamento” – **Curso on-line**, INPE.

CARVALHO, C.C.N.; ROCHA, W.F & UCHA, J.M. 2009. Mapa digital de solos: Uma proposta metodológica usando inferência fuzzy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, 13 (1):46–55.

CARVALHO, L. E. X.; SILVA, H. N.; LOUREIRO, C. F. G.; MENESES, H. B. Regressão linear geograficamente ponderada em ambiente SIG. **Transportes**, v. XIV, n. 2, p. 18-26, 2006.

CHAVES, L.H.G.; FARIAS, C.H.A. Variabilidade espacial do estoque de carbono nos Tabuleiros Costeiros da Paraíba: Solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, n. 1, p. 20-25, 2008.

DORAN, J.W & ZEISS, M.R. 2000. Soil health and sustainability: Managing the biotic components of soil quality. **Applied Soil Ecology**, 15:3-11.

DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. 2004. Análise Espacial de Dados Geográficos. Brasília: **EMBRAPA** (ISBN 85-7383-260-6).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. 1997. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro, 212p.

FOLLET, R.F. Soil management concepts and carbono sequestration zin croplands soils. **Soil & Tillage Research**, v.61, p.77-92, 2001.

FOTHERINGHAM, A.S.; BRUNSDON, C.; CHARLTON, M.E. 2002. **Geographically Weighted Regression, the Analysis of Spatially Varying Relationships**. Wiley, United Kingdom, UK.

GATTO, A. 2010. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34:1069-1079.

HOFFMANN, U.; HOFFMANN, T.; JURASINSKI, G.; GLATZEL, S.; KUHN, N.J. 2014. Assessing the spatial variability of soil organic carbono stocks in na alpine setting (Grindelwald, Swiss Alps). **Geoderma**. 232-234: 270-283.

LAL, R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. **Forest Ecology and Management**, 220:242-258.

LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.S. Modelo century de dinâmica da matéria orgânica do solo: Equações e pressupostos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 4, p. 679-686, 2003.

LEITE, L.F.C.; FERREIRA, J.S.; VELOSO, F.M.E.; MOUSINHO, F.E.P.; JUNIOR, A.F.R. Variabilidade especial das frações da matéria orgânica do solo em área degradada sob recuperação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 394-401, 2015.

LIMA, L.A.S. 2013. Aplicação dos métodos semi-automático e lógica fuzzy para o mapeamento de solos da bacia do Sarandi. **Dissertação de Mestrado do Instituto de Geociências – UnB**, nº 49. 125 p.

LIMA, L.A.S.; REATTO, A.; ROIG, H.L.; MARTINS, E.S.; GOMES, M.P. 2014. Caracterização dos solos da bacia do Sarandi. 47 p. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Cerrados**. ISSN 1676-918X, ISSN online 2176-509, 318.

MAIA, S.M.F.; OGLE, S.M.; CERRI, C.E.P. and CERRI, C.C. 2009. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. **Geoderma**, 149:84-91.

MAHECHA, M.D.; REICHSTEIN, M.; CARVALHAIS, N.; LASSLOP, G.; LANGE, H.; SENEVIRATNE, S.I.; VARGAS, R.; AMMANN, C.; ARAIN, M.A.; CESCATTI, A.; JANSSENS, I.A.; MIGLIAVACCA, M.; MONTAGNANI, L. and RICHARDSON, A.D. 2010. Global Convergence in the Temperature Sensitivity of Respiration at Ecosystem Level. **Science**, 329:838-840.

MCBRATNEY, A.B.; MENDONÇA SANTOS, M.L.; MINASNY, B. 2003. On digital soil mapping. **Geoderma**, 117:3–52.

MORAIS, V.A. Carbono no Cerrado de Minas Gerais: modelagem e estoques em solo, raízes e serrapilheira. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal de Lavras, 117 p.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B.; MENDONÇA-SANTOS. M.L.; ODEH, I.O.A GUYON, B. 2006. Prediction and digital mapping of soil carbono storage in the Lower Namoi Valley. *Australian Journal of Soil Research*, 44:233-244

NETER, J.; KUTNER, M.H.; MACHTSHEIM, C.J.; WASSERMAN, W. 1996. **Applied linear statistical models**. Chicago: Irwin.

NEVES, G.; COUTO-JUNIOR, A.F.; ASSIS, T.; REATTO, A.; MARTINS, E.S.; GOMES, M.P.; SENA-SOUZA, J.P. 2013. Avaliação da fragmentação da cobertura natural em uma bacia experimental no Cerrado. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 3062-3067.

PRATES, V. 2010. Utilização de índices para representação da paisagem como apoio para levantamentos pedológicos em ambientes de geoprocessamento. **Dissertação de Mestrado**. Universidade Federal do Paraná, 30p.

PARTON, W.J. et al. Analysis of factors controlling soil organicmatter levels in great plains grasslands. **Soil Science Society America Journal**, v.51, p.1173-1179, 1987.

RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. 2007. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 5. ed. Rev. –Lavras: Editora UFLA, 322 p. : il.

ROSENDO, J.S & ROSA, R. 2012. Comparação do estoque de C estimado em pastagens e vegetação nativa de cerrado. **Sociedade & Natureza**, 24 (2):359-376.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M.C.; SCOPEL, E.; COSTA JUNIOR, C.; CERRI, C.C. and BERNOUX, M. 2009. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. **Acta scientiarum. Agronomy**, 31(4):709-717.

SIMÕES, S.M.O.; ZILLI, J.E.; COSTA, M.C.G.; TONINI, H.; BALIEIRO, F.C. Carbono orgânico e biomassa microbiana do solo em plantios de Acacia mangium no Cerrado de Roraima. **Acta Amazonica**, v. 40, n. 1, p. 23-30, 2010.

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

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; CORAZZA, E.J. and VIVALDI, L. 2004. Carbon storage under cultivated pastures in a clayey Oxisol in the Cerrado Region, Brazil. **Agriculture Ecosystems & Environment**, 103:357-363.

SILVA, A.S.A. Adaptação do modelo Century 4.0 para simulação em escala regional. **Dissertação (Mestrado)**. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 61 p.

SILVA, F. C. (2009). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 624 p.

SIRTOLI, A.E. Mapeamento de solos com auxílio da geologia, atributos do terreno e índices espectrais integrados por redes neurais artificiais. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Paraná, 102 p.

SMITH, P. 2008. Land use change and soil organic carbon dynamics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 81:169-178.

SOUSA JUNIOR, J.G.A. & DEMATTÊ, J.A.M. 2008. Modelo digital de elevação na caracterização de solos desenvolvidos de basalto e material arenítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:449-456.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A. & SANTOS, M.L.M. 2011. Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. **Ciência Rural**, 41(5): 812-816.

ZINN, Y.L.; GUERRA, A.R. ; SILVA, A.C. ; MARQUES, J.J ; OLIVEIRA, G.C. & CURI, N. 2012. Perfis de carbono orgânico do solo nas regiões sul e serra do espinhaço meridional, minas gerais: modelagem em profundidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36:1395-1406.

ZHOU, Y.; NARUMALANI, S.; WALTMAN, W.J.; WALTMAN, S.W.; PALECKI, M. A. 2003. A GIS-based spatial pattern analysis model for ecoregion mapping and characterization. **International Journal of Geographic Information Science**, 17(5):445–462.

CAPITULO V

Conclusões finais

5. CONCLUSÕES FINAIS

Diante do trabalho apresentado observa-se que são diversos os fatores que controlam os estoques de carbono no solo, clima, relevo, cobertura vegetal, uso do solo, manejo, entre outros. É justamente devido a essa complexidade que se faz necessária a realização de mais pesquisas que visem não unicamente uma quantificação pontual dos estoques de carbono no solo, mas também sua distribuição vertical e espacial.

Na bacia do Sarandi a variabilidade dos estoques de carbono no solo está associada principalmente as classes de solo com interferência de outros fatores como o uso e cobertura vegetal do solo, visto que, a alteração dos ambientes modifica o ciclo dos estoques de carbono no solo. O entendimento dos fatores controladores dos estoques de carbono no solo na bacia do Sarandi serviu como base para a confecção dos modelos de análise espacial dos estoques de carbono no solo.

Entre as variáveis analisadas que exercem influência sobre os estoques de carbono no solo a que mais esteve presente nos modelos de regressão foi a declividade. Essa variável explica-se, pois o tipo de uso e cobertura aliado a variável declividade possui como característica a remoção ou acúmulo de matéria orgânica no solo.

A compartimentação da bacia do Sarandi em unidades de análise seria uma forma mais eficiente de minimizar as generalizações que podem ser originadas por possíveis processos como os de interpolação, os quais desconsideram os limites de grupos de variáveis controladoras dos estoques de carbono no solo.

A utilização da técnica da Regressão Geograficamente Ponderada (GWR) possibilitou estimar os estoques de carbono no solo por meio de outras variáveis ambientais, tais como areia total, silte, relação silte argila, fosforo, acidez potencial, saturação de base, declividade, areia grossa, cálcio e capacidade de troca catiônica por meio de equação de regressão global. Porém é necessário que antes do processo de modelagem por GWR sejam realizadas as etapas de análise de modelo de regressão e utilização da técnica dos Mínimos Quadrados Ordinários - Ordinary Least Squares (OLS).

Apesar da facilidade na execução dos procedimentos da técnica GWR faz-se necessário que o operador possua discernimento de como as variáveis ambientais interagem na paisagem em questão. Essa compreensão facilita no julgamento e na definição das unidades de análises a serem utilizadas na execução da técnica.