

**ESTIMATIVA E MODELAGEM DOS ESTOQUES DE CARBONO
EM SOLOS SOB ÁREAS DE CAMPO LIMPO ÚMIDO DO
DISTRITO FEDERAL**

**Estimates and modelling carbon stocks in soil under humid grassland
areas in the Federal District of Brazil**

Andreia Maria da Silva França
Instituto Federal de Brasília, Brasília, Distrito Federal, Brasil
andreia.franca@ifb.edu.br

Rodrigo José de Oliveira Paiva
drigoj@gmail.com

Artigo recebido em 15/09/2014 e aceito para publicação em 02/02/2015

RESUMO: Este trabalho teve como principal objetivo a obtenção de parâmetros quantitativos básicos sobre os estoques de carbono em áreas de Campo Limpo Úmido, além da modelagem de função para a estimação do conteúdo de carbono orgânico do solo (COS) a partir de parâmetros físicos do solo (ex. textura, densidade). Foram selecionados 4 regiões com Campo Limpo Úmido no Distrito Federal, caracterizadas pelo baixo impacto antrópico, sendo 2 delas sobre gleissolo e 2 sobre plintossolo, tipos de solo mais comuns nessas regiões. Em cada uma delas foi demarcado um transecto com 4 pontos equidistantes e realizada coleta de material em sete profundidades: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 50-60 cm. Foram determinadas a textura, a densidade aparente e o teor de carbono em cada profundidade. O estoque de carbono médio para as áreas de Campo Limpo Úmido até 60 cm de profundidade foi de 243.16 Mg C ha⁻¹ e o estoque total estimado para essas áreas no Distrito Federal foi de 205.86 Gg C. Os estoques de carbono e o COS em áreas de gleissolo foram maiores do que em áreas de plintossolo. A função obtida com a modelagem das variáveis independentes (densidade, areia, argila e silte) mostrou-se capaz de estimar adequadamente o COS, tanto para gleissolo ($R^2 = 0,88$, RMSD = 1,48; RMSD validação = 1,49) quanto para plintossolo ($R^2 = 0,77$, RMSD = 1,57; RMSD validação = 1,62).

Palavras chave: Estoque de Carbono. Cerrado. Áreas Úmidas. Campo Limpo Úmido.

ABSTRACT: The main purpose of this study was to obtain basic quantitative parameters for carbon storage and modeling the soil organic carbon (SOC) in Humid Grassland (*Campo Limpo Úmido*), a kind of grassland phytophysiology found in the Cerrado. We selected 4 regions of the Federal District with this kind of vegetation formation, characterized by low anthropic impact. In each one of the sampled regions, we marked a transect with 4 equidistant points and collected material at 7 different levels of depth: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 and 50-60 cm. We determined the texture, bulk density and concentration of carbon at each depth. The average carbon storage for Humid

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1982-451320150112>

Grassland areas, down to 60 cm deep, was 243.16 Mg C ha⁻¹ and the total estimated stock for these areas in the Federal District was 205.86 Gg C. In general, the samples obtained in gleysols showed a carbon stock and SOC superior to those in plinthosols. The function obtained with the modeling of the independent variables (bulk density, sand, clay and silt) proved to be able to properly estimate the SOC in gleysol ($R^2 = 0,88$, RMSD = 1,48; RMSD validação = 1,49) and in plinthosol ($R^2 = 0,77$, RMSD = 1,57; RMSD validação = 1,62).

Keywords: Carbon Stocks. Cerrado. Wetland. Grasslands.

INTRODUÇÃO

O aumento da concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) – CO₂, N₂O e o CH₄ - na atmosfera terrestre e sua estreita relação com as mudanças climáticas torna de grande importância o estudo desses elementos no meio ambiente. Diferentes compartimentos do ciclo biogeoquímico do carbono estão envolvidos na liberação de compostos de carbono para a atmosfera, sendo de particular relevância o carbono presente no compartimento solo. Esse representa cerca de quatro vezes mais do que o presente na biomassa vegetal e quase três vezes mais do que o presente na atmosfera (LAL; FOLLETT, 2009). Ambientes como formações vegetacionais de tipo campestre e áreas úmidas podem exercer um papel especialmente importante na mitigação desse processo, em especial pelas condições ambientais específicas sob as quais são mantidas que favorecem a acumulação de carbono orgânico.

Áreas campestres são responsáveis pela cobertura de grandes extensões de habitat natural no mundo (SCURLOCK; HALL, 1998). Esse tipo de formação, caracterizada pelo predomínio de um estrato herbáceo contínuo e a ausência de árvores ou arbustos, têm até 60% de toda sua ocorrência na região tropical, especialmente em ecossistemas de savana (SCURLOCK; HALL, 1998). No Brasil, esse tipo de ambiente está representado principalmente no Bioma Cerrado. Grace et al. (2006) indicaram que entre 10% e 30% de todo o carbono presente nos solos, localizam-se em regiões de savana tropical.

Os solos sob áreas úmidas, por sua vez, são reconhecidos na literatura como importantes áreas estocadoras e fontes potenciais para a liberação de carbono, devido, principalmente, às condições anaeróbicas sob as quais são mantidas (baixo nível de oxigênio, alta quantidade de água, baixa difusividade

de gases). Tais condições favorecem o acúmulo de matéria orgânica e carbono no solo (COLETTI et al., 2013). Pequenas diferenças climáticas, hidrológicas e no uso da terra podem alterar de forma importante o delicado balanço dos estoques de carbono dessas regiões, provocando sua liberação para a atmosfera (NEUE et al., 1997).

Ainda que o predomínio das fitofisionomias no Cerrado sejam as associadas a solos bem drenados, com formações savânicas, em que estão presentes arbustos, ocorrem nesse bioma diferentes fitofisionomias sobre solos periodicamente inundados, correspondendo a ecossistemas de áreas úmidas (WALTER; CARVALHO; RIBEIRO, 2008). O Campo Limpo Úmido é uma delas. Esse tipo de ambiente tem sua ocorrência onde o lençol freático é superficial, especialmente em áreas de nascentes, em encostas, nos fundos dos vales e bordeando as matas de galeria, em solos hidromórficos (WALTER; CARVALHO; RIBEIRO, 2008). Caracteriza-se pelo predomínio de um estrato herbáceo contínuo, ausência de árvores ou arbustos, além de grande abundância e riqueza de espécies da família Poaceae (MUNHOZ; FELFILI, 2008).

Apesar de sua potencial importância para a preservação do carbono no solo, até o momento, poucos estudos abordaram áreas de Campo Limpo Úmido (FERREIRA et al., 2008; MEIRELLES; FERREIRA; FRANCO, 2006). Trabalhos envolvendo a modelagem e desenvolvimento de funções de pedotransferência para solos do Cerrado têm observado uma relação entre o conteúdo de carbono orgânico no solo (COS) e suas características físicas e estruturais, como a textura, densidade e mineralogia (FRANÇA, 2011; REIN; DUXBURY, 2008; ZINN et al., 2007). O desenvolvimento de tais funções permite a estimação dos estoques de carbono a partir de informações com menor custo e maior rapidez para sua obtenção.

Considerando a potencial importância de fitofisionomias de Campo Limpo Úmido para a manutenção do carbono orgânico no solo, evitando sua emissão para a atmosfera, e com a finalidade de fornecer meios menos dispendiosos para a estimação dos estoques de carbono nesse tipo de ambiente, temos por principal objetivo neste estudo a obtenção de parâmetros quantitativos básicos dos solos nas regiões de ocorrência de Campos Limpos Úmidos, bem como o desenvolvimento de função que permita a estimação do carbono orgânico.

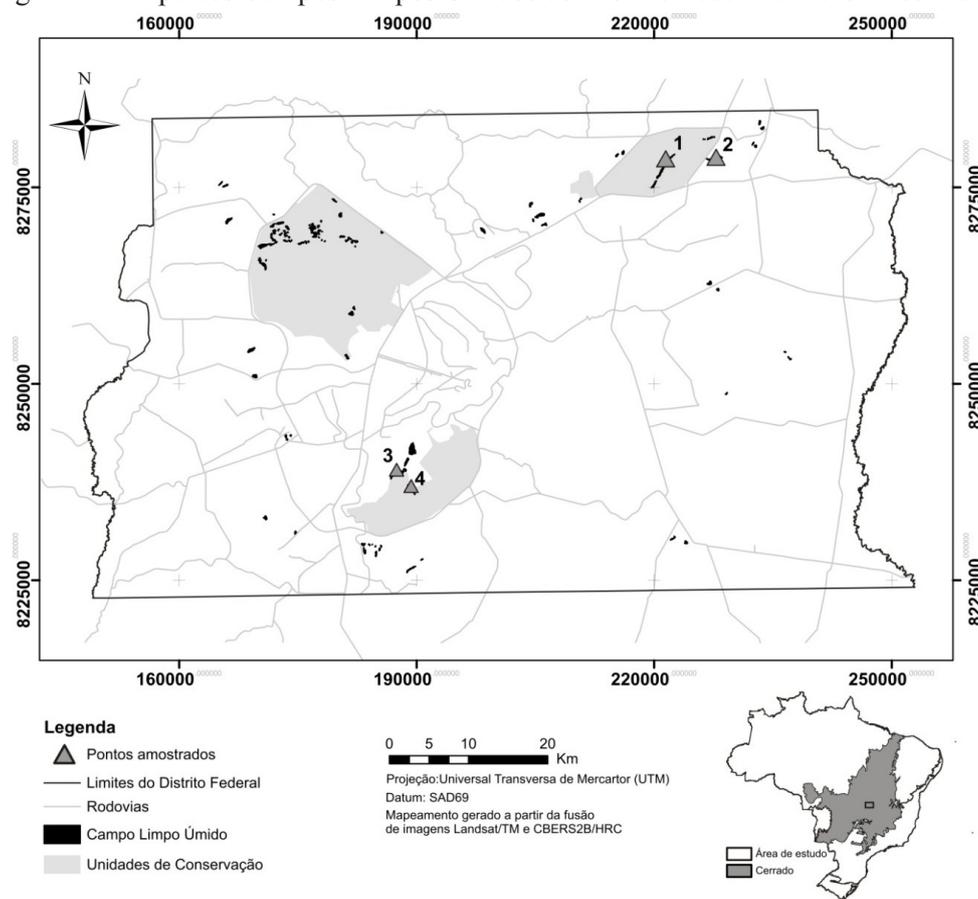
MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

O estudo foi realizado no Distrito Federal (Brasil), o qual compreende uma área de 5.779 km², localizado na região central do Bioma Cerrado (Figura

1). Essa região é caracterizada como uma região típica de Cerrado, composta por um mosaico heterogêneo de diferentes formações vegetacionais (EITEN, 1972; WALTER; CARVALHO; RIBEIRO, 2008), abrangendo cerca de 0,3% da área total do Cerrado (2,03 milhões de km²). A maior parte da paisagem natural na região é caracterizada por planaltos com solos bem drenados, mas também há a ocorrência de regiões periodicamente úmidas ou alagadas (SILVA et al., 2006). O clima na região é tropical úmido (Aw - classificação de Köppen), caracterizado por marcada sazonalidade, com invernos secos e verões chuvosos. Cerca de 70% do Distrito Federal é ocupado por regiões com classes de uso antrópico (IBAMA, 2014), sendo a maior parte das áreas naturais bem preservadas situadas em propriedades públicas destinadas à conservação do ambiente natural ou à pesquisa, a exemplo de unidades de conservação e unidades dedicadas à pesquisa ambiental.

Figura 1 – Mapa dos Campos Limpos Úmidos do Distrito Federal e áreas amostradas.



Fonte: elaboração dos autores.

As áreas de Campo Limpo Úmido normalmente situam-se em faixas horizontais sobre lados de vales, separando o Cerrado Stricto Sensu da Mata de Galeria. Na maioria das vezes, essas áreas formam limites bem definidos com essas fitofisionomias, numa região com abrupta transição entre diferentes comunidades biológicas e grande diversidade. Por serem áreas úmidas, nessas regiões o lençol freático tende a ser raso e frequentemente aflora à superfície. Os solos permanecem grande parte do ano saturado de água, impedindo ou dificultando sua coleta em períodos em que o lençol freático se encontra próximo à superfície. Os tipos mais comuns de solo nesse tipo de fitofisionomia são o gleissolo e o plintossolo.

O mapeamento de áreas de Campo Limpo Úmido no Distrito Federal foi realizado por França & Sano (2011), com a utilização de imagens multiespectrais – Landsat5/TM e CBERS2B/HRC – e o uso de técnicas de fusão IHS. Como resultado, houve a identificação de 846,61 ha de Campo Limpo Úmido no Distrito Federal (0,14% de toda a área de estudo).

Características do solo

Os solos presentes nas áreas estudadas são os gleissolos e os plintossolos. Os gleissolos formam-se a partir de sedimentos aluviais, com presença de lençol freático próximo à superfície na maior parte do ano, caracterizando um ambiente de acúmulo de matéria orgânica e de oxirredução (REATTO et al., 1998). São solos que ocasionalmente podem ter textura arenosa (areia ou areia franca) somente nos horizontes superficiais, desde que seguidos de horizonte glei de textura franco arenosa ou mais fina (EMBRAPA, 2006; FAO, 2006). São solos desenvolvidos em materiais inconsolidados (sedimentos ou saprolito) e muito influenciados por ocorrências de encharcamento prolongado. Tais condições são normalmente ocasionadas por um lençol freático próximo à superfície, pelo menos em alguns meses do ano, o que deixa os poros saturados com água por tempo relativamente prolongado. Essa saturação, na presença de matéria orgânica, diminui o oxigênio dissolvido e provoca a redução química e

dissolução dos óxidos de ferro, que é transformado, e parcialmente removido, o que faz com que surjam cores acinzentadas no horizonte subsuperficial (LEPSCH, 2002).

Os plintossolos correspondem a solos minerais hidromórficos, com séria restrição à percolação de água, encontrados em situações de alagamento temporário e, portanto, escoamento lento (REATTO et al., 1998). Morfologicamente apresentam horizonte de subsuperfície com manchas avermelhadas distribuídas no perfil, de aspecto variegado (resultado da concentração de ferro do solo), chamadas de plintita (EMBRAPA, 2006; FAO, 2006). São solos formados sob condições de algum impedimento ao movimento da água gravitativa, mormente em locais em que há grande oscilação do lençol freático facilitando a formação da plintita (LEPSCH, 2002). Ocorrem em regiões quentes e úmidas, especialmente naquelas com estação seca bem definida ou período com marcante diminuição da precipitação pluvial (OLIVEIRA; JACOMINE; CAMARGO, 1992).

Amostragem de campo

No Distrito Federal foram selecionados quatro sítios de amostragem com características típicas de Campo Limpo Úmido. Dois deles situaram-se na Estação Ecológica Águas Emendadas (área 1 - gleissolo e área 2 - plintossolo) e dois deles na Fazenda Água Limpa (área 3 - gleissolo e área 4 - plintossolo), unidade de pesquisa de propriedade da Universidade de Brasília. As áreas amostradas foram escolhidas por manterem preservadas suas características naturais, apresentando baixo impacto antrópico. A amostragem foi realizada durante o período de seca.

Em cada um dos quatro Campos Limpos Úmidos selecionados, foi delimitado um transecto na região central, iniciando na borda do Cerrado *sensu stricto* e finalizando na Mata de Galeria, atravessando toda a sua extensão. Em cada transecto foram demarcados 4 pontos amostrais equidistantes onde foram coletadas amostras em sete diferentes profundidades: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm e 50-60 cm.

Para a determinação do teor de carbono e textura do solo foram coletadas amostras deformadas utilizando trado holandês e para a determinação da densidade aparente do solo foram coletadas amostras indeformadas com auxílio de anéis volumétricos. Como resultado, obteve-se 112 amostras, sendo 56 amostras referentes às áreas de Campo Limpo Úmido sob gleissol e 56 amostras referentes às áreas de Campo Limpo Úmido sob plintossolo.

Preparação das amostras e análises laboratoriais

Em relação a características texturais do solo, foi determinado o conteúdo de areia, argila e silte para todos os intervalos de profundidade por meio de análise granulométrica das amostras deformadas, distinguindo suas frações em classes de acordo com seus diâmetros: argila (0,000-0,002 mm), silte (0,002–0,063 mm) e areia (0,063–2 mm).

A densidade aparente foi determinada obtendo-se amostras indeformadas de solo em diferentes profundidades, com a utilização de anel de aço de bordos cortantes e capacidade interna de 100 cm³. As amostras obtidas foram secas em estufa a 110 °C e pesadas com utilização de instrumento de precisão. A densidade aparente (D_a) foi determinada como função da massa de solo seco e do volume conhecido ($D_a = \text{Massa}/\text{Volume}$). Nenhuma das amostras obtidas para a análise da densidade conteve quantidade significativa de rochas ou fragmentos, não sendo necessária a correção dos valores obtidos.

As amostras de solo coletadas para a determinação do teor de carbono foram secas ao ar e posteriormente destorroadas e passadas em peneira de 2mm. Essas amostras foram trituradas com o auxílio de um moedor e utilizando-se gral e pistilo até que as partículas pudessem passar por peneira de malha de 0,25 mm. A cada troca de conjunto de amostras foi realizada a higienização de todo o material (moedor, gral, pistilo e peneiras), a fim de se evitar sua contaminação. Subamostras foram pesadas entre 20 e 30 mg, com precisão de 4 casas decimais, em cápsulas de estanho e submetidas à análise para determinação do teor de carbono total no solo (TOC).

O teor de carbono nas amostras de solo foi determinado por meio do método analítico por

combustão seca a 900°C (CHNS/O) em analisador elementar (Perkin Elmer, PE-2400 Séries II). Nesse método, uma pequena amostra de solo é aquecida até 900°C e é medido o CO₂ resultante da combustão do material. Os resultados são expressos como percentual e refere-se ao carbono orgânico e inorgânico presente nas amostras (TIESSSEN; MOIR, 1993). Foi realizado um total de 112 medições e a cada 10 amostras o aparelho foi calibrado com amostras-padrão cistina.

Modelagem e validação da função de pedotransferência

A função para a estimação do COS foi obtida com a utilização do algoritmo de otimização de Levenberg-Marquardt (LEVENBERG, 1944; MARQUARDT, 1963) por meio do software Matlab 2013 (MATLAB, 2013). O algoritmo mencionado tem por objetivo encontrar o melhor ajuste entre uma função objetivo e os dados observados, promovendo a redução da distância entre valores estimados e observados (redução de mínimos quadrados). Para a definição da função objetivo, a exemplo de Zinnet al. (2012), regressões lineares foram empregadas para detectar possíveis relações entre teores de COS e as variáveis independentes consideradas (profundidade, densidade, areia, argila e silte). Além dos dados originais, foram submetidas à regressão transformações logarítmicas das variáveis e a soma ou multiplicação entre até duas variáveis dependentes. Os termos integrantes da função objetivo foram definidos como aqueles que apresentassem as melhores características para a regressão linear (maior R^2 e menor *Root Mean Square Deviation - RMSD*).

Para a seleção dos coeficientes, a função objetivo foi submetida a 500 interações realizadas com diferentes conjuntos de dados, sendo tomados aleatoriamente 46 registros para treinamento e 10 registros para validação. Com o procedimento mencionado foi possível se obter os coeficientes (valores médios) e o ajuste médio dos valores estimados de COS aos dados observados, bem como aos dados de validação (SEE , R^2 , R^2 ajustado e $RMSD$).

Cálculos do Estoque de Carbono no Solo

O estoque de carbono orgânico no solo foi quantificado em base volumétrica expressa em Mg C ha⁻¹ para as camadas 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm e 50-60 cm de profundidade. O cálculo do estoque de carbono para uma determinada profundidade (ρ , cm) foi realizado com o uso da função:

$$EC = C \cdot \rho \cdot e/10$$

equação (1)

Onde:

EC = estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg ha⁻¹)

C = teor de C orgânico total na profundidade amostrada (g kg⁻¹)

ρ = densidade aparente do solo da profundidade (kg dm⁻³)

e = espessura da camada considerada (cm)

RESULTADOS

Para ambos os tipos de solos amostrados, gleissolose plintossolos, foi observada textura predominantemente argilo-siltosa, com um menor conteúdo de areia ao longo do perfil (Tabela 1).

Tabela 1 – características texturais e físicas de gleissolos e plintossolos em áreas de Campo Limpo Úmido (média ± erro padrão).

Solo / Profundidade	N	Densidade (kg dm ⁻³)	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)
Gleissolo	56	0.51 ± 0.04	9.16 ± 0.77	44.77 ± 2.36	46.07 ± 2.61
0-10 cm	16	0.34 ± 0.04	10.63 ± 1.81	44.88 ± 3.82	44.5 ± 4.45
0-5 cm	8	0.32 ± 0.06	11.50 ± 2.78	47.25 ± 5.02	41.25 ± 5.89
5-10 cm	8	0.35 ± 0.06	9.75 ± 2.48	42.50 ± 5.97	47.75 ± 6.88
10-20 cm	8	0.43 ± 0.07	11.50 ± 2.24	37.75 ± 5.47	50.75 ± 6.28
20-30 cm	8	0.51 ± 0.09	8.75 ± 2.37	43.88 ± 6.67	47.38 ± 7.82
30-40 cm	8	0.56 ± 0.10	7.50 ± 1.40	45.38 ± 6.81	47.13 ± 7.50
40-50 cm	8	0.66 ± 0.11	7.25 ± 0.92	47.50 ± 6.99	45.25 ± 7.60
50-60 cm	8	0.76 ± 0.11	7.88 ± 1.59	49.13 ± 7.93	43.00 ± 8.32
Plintossolo	56	0.66 ± 0.04	12.14 ± 0.65	46.21 ± 1.71	41.64 ± 1.95
0-10 cm	16	0.41 ± 0.04	8.5 ± 0.77	37.44 ± 2.36	54.06 ± 2.92
0-5 cm	8	0.37 ± 0.05	8.00 ± 1.09	37.13 ± 3.62	54.88 ± 4.34
5-10 cm	8	0.45 ± 0.05	9.00 ± 1.15	37.75 ± 3.28	53.25 ± 4.20
10-20 cm	8	0.56 ± 0.06	13.25 ± 1.03	38.63 ± 3.41	48.13 ± 3.50
20-30 cm	8	0.67 ± 0.08	12.50 ± 1.13	44.13 ± 4.46	43.38 ± 5.12
30-40 cm	8	0.76 ± 0.10	15.50 ± 2.20	50.00 ± 4.95	34.50 ± 4.45
40-50 cm	8	0.90 ± 0.08	13.00 ± 1.71	56.50 ± 2.12	30.50 ± 2.38
50-60 cm	8	0.90 ± 0.08	13.75 ± 2.11	59.38 ± 2.11	26.88 ± 1.48
Campo Limpo Úmido	112	0.59 ± 0.03	10.65 ± 0.52	45.49 ± 1.45	43.86 ± 1.64

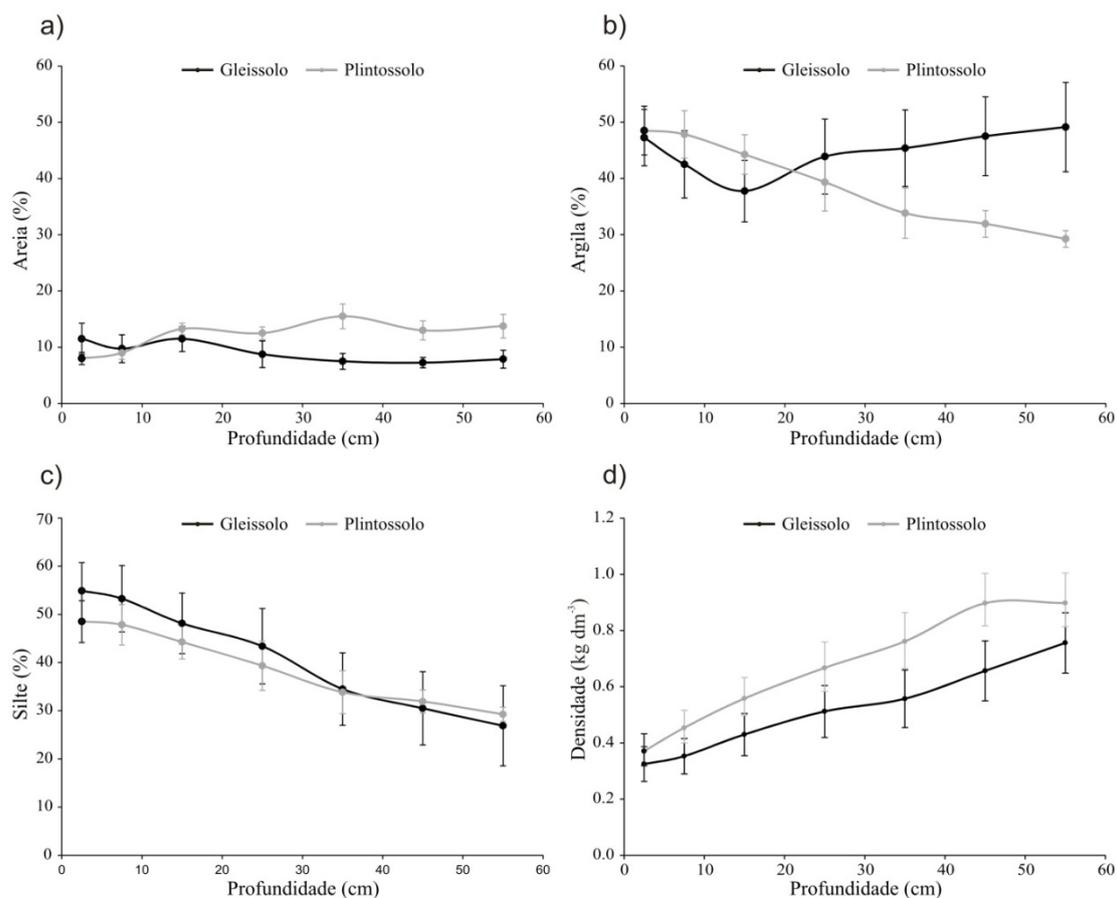
Fonte: elaboração dos autores.

Em relação à textura, a principal diferença observada entre os tipos de solos foi um maior percentual

de areia nas porções mais profundas do perfil (30-60 cm) em plintossolos e uma maior quantidade de argila em gleissolos nessa mesma porção (Figura 2). Não houve diferença relevante entre os solos em relação ao conteúdo de silte, sendo observado um decréscimo de seu conteúdo com a profundidade para

ambos os solos. A densidade do solo foi crescente ao longo do perfil (0-60 cm) e apresentou maiores valores observados para plintossolos. As maiores diferenças para a densidade também ocorreram para maiores profundidades (30-60 cm).

Figura2 – conteúdo de areia (a); argila (b); silte (c); e densidade aparente do solo (d) ao longo do perfil (0-60cm) em áreas de Campo Limpo Úmido sobre gleissolo e plintossolo.



Fonte: elaboração dos autores.

A concentração de COS foi decrescente com a profundidade, sendo que plintossolos apresentaram menores valores ao longo de todo o perfil quando comparados a gleissolos (Tabela 2). O estoque de

carbono também apresentou valores superiores em áreas de gleissolo (Tabela 2).

Tabela 2—Valores observados (Obs.) e estimados (Est.) pelas funções obtidas para a concentração de carbono orgânico no solo (COS) e estoque de carbono no solo em áreas de Campo Limpo Úmido (média ± erro padrão).

Solo / Profundidade		COS Obs. (g kg ⁻¹)	COS Est. (g kg ⁻¹)	Estoque Obs. (Mg C ha ⁻¹)	Estoque Est. (Mg C ha ⁻¹)
Gleissolo	60	84.16 ± 5.68	83.75 ± 5.35	258.84 ± 36.32	257.58 ± 35.21
0-10 cm	10	111.83 ± 9.44	113.83 ± 6.59	37.87 ± 7.99	38.55 ± 7.11
0-5 cm	5	116.14 ± 14.79	118.36 ± 9.30	18.85 ± 6.00	19.21 ± 5.18
5-10 cm	5	107.53 ± 12.58	109.29 ± 9.68	18.96 ± 5.60	19.28 ± 5.15
10-20 cm	10	95.06 ± 12.58	94.36 ± 10.22	40.85 ± 12.52	40.55 ± 11.46
20-30 cm	10	81.10 ± 13.01	81.06 ± 12.20	41.51 ± 14.13	41.49 ± 13.71
30-40 cm	10	76.66 ± 14.99	74.28 ± 13.78	42.71 ± 16.20	41.38 ± 15.28
40-50 cm	10	62.85 ± 13.76	60.75 ± 14.01	41.25 ± 15.73	39.87 ± 15.67
50-60 cm	10	49.78 ± 13.15	48.14 ± 14.29	37.62 ± 15.28	36.39 ± 15.97
Plintossolo	60	54.35 ± 4.80	52.40 ± 4.01	214.49 ± 31.05	206.80 ± 27.51
0-10 cm	10	86.76 ± 9.90	82.69 ± 5.36	35.74 ± 7.33	34.06 ± 5.31
0-5 cm	5	92.90 ± 16.31	88.42 ± 7.94	17.20 ± 5.41	16.37 ± 3.74
5-10 cm	5	80.61 ± 11.96	76.96 ± 7.13	18.28 ± 4.87	17.45 ± 3.68
10-20 cm	10	64.36 ± 9.88	62.57 ± 6.40	35.90 ± 9.38	34.90 ± 7.33
20-30 cm	10	50.55 ± 9.23	51.50 ± 8.93	33.71 ± 10.37	34.34 ± 10.25
30-40 cm	10	39.28 ± 7.76	38.18 ± 8.22	29.90 ± 9.69	29.07 ± 9.94
40-50 cm	10	29.21 ± 4.58	26.39 ± 5.23	26.20 ± 6.46	23.68 ± 6.81
50-60 cm	10	23.53 ± 2.57	22.77 ± 4.17	21.11 ± 4.28	20.44 ± 5.65
Campo Limpo Úmido	60	69.25 ± 3.96	68.07 ± 3.65	243.16 ± 25.18	239.02 ± 23.87

Fonte: elaboração dos autores.

O estoque de carbono médio observado para Campo Limpo Úmido foi de 243.16±25.17 Mg Cha⁻¹. Na porção do solo de 0-60 cm, nos 846,61 hectares ocupados por áreas de Campo Limpo Úmido no Distrito Federal, estimou-se um estoque total de 205.86±21.30 Gg C.

Observou-se uma maior relação na variação do COS com a densidade (R² = 0,75; p<0,00), o produto entre a densidade e o logaritmo natural da profundidade (R² = 0.66; p<0,00) e com o somatório entre areia e silte (R² = 0.37; p= 0,05). Respeitando a relação não-linear apresentada entre o conteúdo

de carbono no solo e as variáveis independentes (densidade, profundidade, areia e silte), os melhores ajustes na relação entre o COS medido e o COS estimado foram obtidos com a função polinomial:

$$C(\text{est}) = X_1 + X_2 * (\text{Dens.})^X_3 + X_4 * \ln(\text{Prof.}) * (\text{Dens.}) + X_5 * (\text{Areia})^X_6 + X_7 * (\text{Silte})^X_8$$

equação (2)

Onde:

C (est) – carbono orgânico estimado (g kg^{-1});
 Dens. – densidade do solo (kg dm^{-3});
 Prof. – profundidade - valores de entrada: 2,5 cm; 7,5 cm; 15 cm; 25 cm; 35 cm; 45 cm; 55 cm, referentes às classes de profundidade 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm e 50-60 cm;
 Areia – conteúdo de areia (%);
 Silte – conteúdo de silte (%);
 X_n – coeficientes;

Plintossolo: $X_1 = -1.2428$; $X_2 = 2.6539$; $X_3 = -0.6836$;
 $X_4 = -0.4019$; $X_5 = -44.4943$; $X_6 = -4.1142$; $X_7 = 0.0331$;
 $X_8 = 1.2513$;

O carbono estimado com o uso das funções (Tabela 2) apresentou um bom ajuste em relação àquele observado para todo o perfil (Figura 3-a e Figura 3-b). A função obtida para gleissolo apresentou um erro médio de $1,48 \text{ g kg}^{-1}$ em relação aos dados observados e de $1,49 \text{ g kg}^{-1}$ em relação aos dados de validação. A função para a estimação do COS em plintossolo apresentou erro médio ligeiramente superior: $1,57 \text{ g kg}^{-1}$ para dados observados e $1,62 \text{ g kg}^{-1}$ para dados de validação (Tabela 3).

Os coeficientes determinados para as funções foram:

Gleissolo: $X_1 = -3.2617$; $X_2 = 6.6697$; $X_3 = -0.4543$;
 $X_4 = -1.1727$; $X_5 = -17.8626$; $X_6 = 0.0102$; $X_7 = 18.7415$;
 $X_8 = 0.0412$;

Tabela 3 – Descritores estatísticos para o ajuste das funções, considerando dados observados e dados de validação.

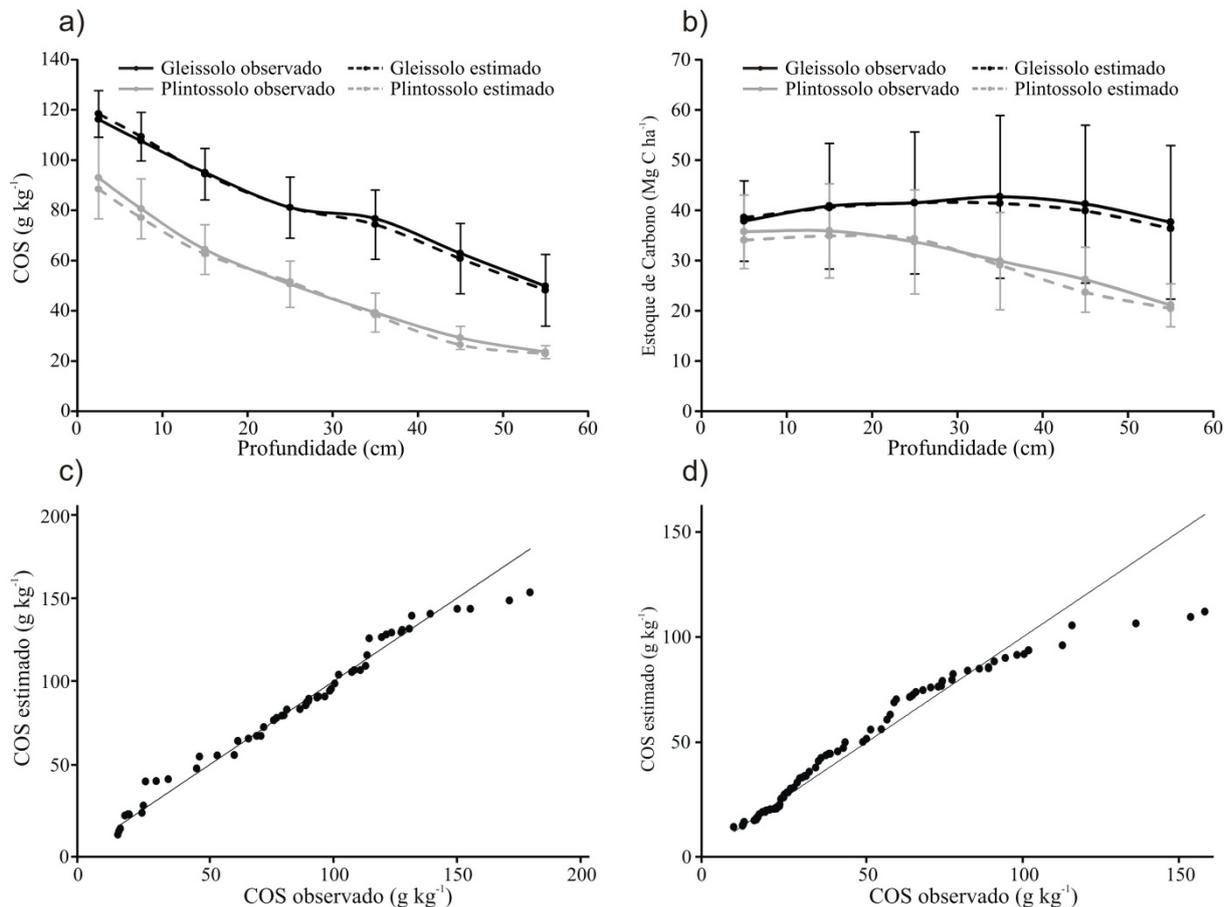
Estatísticas	Gleissolo		Plintossolo	
	Média	Desvio	Média	Desvio
Observados				
SSE	97.04	10.92	179.28	36.85
R ²	0.88	0.01	0.77	0.01
Adj R ²	0.88	0.02	0.77	0.01
RMSD	1.48	0.08	1.57	0.17
Validação				
SSE	25.20	19.65	30.15	22.32
RMSD	1.49	0.55	1.62	0.63

Fonte: elaboração dos autores.

Em relação ao intervalo de valores de concentração do COS, os piores ajustes ocorreram para maiores concentrações, superiores a 150 g kg^{-1} em gleissolo e a 100 g kg^{-1} em plintossolo, conforme Figura 3 (atentar para perfis 3c e 3d). A partir desses

valores de concentração, a função tendeu a subestimar o conteúdo de carbono no solo.

Figura 3 – conteúdo de carbono no solo (COS) observado e estimado (a); estoque de carbono estimado e observado (b); gráfico quantil-quantil para o COS observado e estimado em gleissolo (c); gráfico quantil-quantil para o COS observado e estimado em plintossolo (d).



Fonte: elaboração dos autores.

DISCUSSÃO

Áreas úmidas na região tropical são reconhecidamente importantes estocadoras de carbono (BERNAL; MITSCH, 2008; BIANCHI et al., 2013; DE LA CRUZ, 1986; NEUE et al., 1997). Apesar de ainda pouco exploradas no Bioma Cerrado, os resultados obtidos neste artigo confirmam o papel desempenhado por essa fitofisionomia para a manutenção do carbono orgânico no solo.

A densidade do COS em áreas de Campo Limpo Úmido apresentou valor superior àquele observado para outras fitofisionomias típicas de áreas bem drenadas do Cerrado (Tabela 4). Em áreas de savana (cerrado e cerrado *sensu stricto*) o COS

foi estimado entre 45 Mg C ha^{-1} e 73 Mg C ha^{-1} para profundidade de até 60 cm (Tabela 4), valor até 5 vezes menor do que a densidade do estoque obtida para as áreas úmidas analisadas. Em regiões com formações campestres, com ocorrência em regiões bem drenadas (com solos de tipo Ferrasols), a densidade do estoque de carbono também foi bastante inferior àquelas obtidas para áreas de Campo Limpo Úmido (Tabela 4). Apesar da semelhança fitofisionômica entre essas regiões, campos limpos tiveram o estoque do solo estimado em 100 Mg C ha^{-1} para a profundidade de até 100 cm (SILVA et al., 2004), mais de duas vezes inferior àquele observado em áreas de Campo Limpo Úmido.

Tabela 4–Estimativas da densidade dos estoques de carbono do solo em diferentes fitofisionomias do Bioma Cerrado.

Fitofisionomia	Tipo de solo (FAO)	Estoque (Mg C ha ⁻¹)			Referências
		0-60 cm	0-100 cm	0-200 cm	
Cerradão	Ferralsols	-	148	230	ChapuisLardy et al. (2002)
Cerrado	Ferralsols	-	143	231	ChapuisLardy et al. (2002)
Cerrado	Ferralsols	-	133	-	Corazza et al. (1999)
Cerrado	Ferralsols	45	-	-	Resck et al. (2008)
Cerrado	Cambisols	-	200	-	Silva et al. (2008)
Cerrado sensu stricto	Ferralsols	-	-	271	Paiva e Faria (2007)
Cerrado sensu stricto	Regosols	50	-	-	Zinn et al. (2002)
Cerrado sensu stricto	Ferralsols	74	-	-	Zinn et al. (2002)
Campo Sujo	Ferralsols	-	209	297	ChapuisLardy et al. (2002)
Campo Limpo	Ferralsols	-	198	281	ChapuisLardy et al. (2002)
Campo Limpo	Ferralsols	-	100	-	Silva et al. (2004)
Campo Limpo Úmido	Histosols	241	-	-	Meirelles et al. (2006)

Fonte: Adaptado de Batlle-bayer, Batjes, & Bindraban (2010).

De forma semelhante a outros tipos fitofisionômicos, áreas de Campo Limpo Úmido apresentaram relação entre características do solo (tipo de solo, textura, densidade) e o conteúdo de carbono orgânico nele presentes. No caso observado, as amostras obtidas em gleissolo, em geral, apresentaram conteúdo de carbono superior àquelas de plintossolo. O tratamento independente entre amostras pertencentes a solos com características físicas distintas, parece ser uma estratégia adequada para a análise de amostras obtidas em Campo Limpo Úmido.

Como observado em outros estudos que modelaram o COS em regiões do Bioma Cerrado (FRANÇA, 2011; REIN; DUXBURY, 2008; ZINN et al., 2012), foi possível um ajuste adequado de uma função de estimação a partir de informações menos onerosas de mais fácil obtenção (ex: densidade e textura). Esse tipo de abordagem contribui para uma maior agilidade e menor dispêndio de recursos em

trabalhos que envolvam a avaliação dos estoques existentes na região de estudo.

Considerando que Campos Limpos Úmidos são áreas que se caracterizam como importantes estocadores de carbono no solo, os quais potencialmente podem ser liberados para a atmosfera em caso do manejo inadequado ou alterações ambientais que afetem o ciclo hidrológico natural, é recomendável a realização de estudos específicos que investiguem variações no COS decorrentes da mudança de uso e manejo em regiões de Campo Limpo Úmido, bem como a realização de pesquisas que abranjam toda a área do Bioma Cerrado.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostraram que Campos Limpos Úmidos, uma das fitofisionomias presentes no Bioma Cerrado, possuem elevado potencial para estocar carbono no solo, com uma estimativa de

243.16 Mg C ha⁻¹ até a profundidade 60 cm. O estoque total estimado para essas áreas no Distrito Federal foi de 205.86Gg C, presentes em 846.61 ha de Campo Limpo Úmido. Os resultados obtidos indicaram uma diferença entre áreas sobre gleissolo e plintossolo. Em gleissolos, o estoque médio de 258.84Mg C ha⁻¹, enquanto áreas de plintossolos apresentaram em média 214.49Mg C ha⁻¹. Foram obtidas equações capazes de estimar o conteúdo de carbono orgânico no solo (COS) a partir de informações de mais fácil acesso (densidade e textura). Os valores estimados pela função apresentaram boa adequação aos dados observados em campo. A função para gleissolo apresentou um erro médio de 1,48 g kg⁻¹ em relação aos dados observados e de 1,49 g kg⁻¹ em relação aos dados de validação. A função para a estimativa do COS em plintossolo apresentou erro médio ligeiramente superior: 1,57 g kg⁻¹ para dados observados e 1,62 g kg⁻¹ para dados de teste. Considerando a grande pressão antrópica a que estão submetidas as regiões naturais no Bioma Cerrado, é recomendável a realização de estudos específicos que investiguem variações no COS decorrentes da mudança de uso e manejo em regiões de Campo Limpo Úmido ou em função de alterações ambientais. Sugere-se, ainda, que novos estudos, com área de estudo que abranja toda a área do Bioma Cerrado, sejam realizados para esse tipo de fitofisionomia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq-Brasil pelo auxílio concedido para a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

BATTLE-BAYER, L.; BATJES, N. H.; BINDRABAN, P. S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.137, n.1-2, p.47–58, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2010.02.003>

BERNAL, B.; MITSCH, W. J. A comparison of soil carbon pools and profiles in wetlands in Costa Rica and Ohio. *Ecological Engineering*, v.4, p.311–323, 2008.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.09.005>

BIANCHI, T. S. et al. Estuarine, Coastal and Shelf Science Historical reconstruction of mangrove expansion in the Gulf of Mexico : Linking climate change with carbon sequestration in coastal wetlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v.119, p.7–16, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2012.12.007>

COLETTI, J. Z. et al. Hydrological controls on carbon metabolism in wetlands. *Ecological Modelling*, v. 249, p. 3–18, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.07.010>

DE LA CRUZ, A. A. Tropical wetlands as a carbon source. *Aquatic Botany*, v.25, p.109–115, 1986. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3770\(86\)90048-3](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3770(86)90048-3)

EITEN, G. The Cerrado Vegetation of Brazil. *The Botanical Review*, v.38, n.2, p.201–327, 1972.

EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro: Embrapa-SPI, 2006. p.306pp

FAO. *World reference base for soil resources 2006: a framework for international classification, correlation and communication*. Rome: FAO, 2006. p.1–145

FERREIRA, E. A. B. et al. Influência de variações ambientais sobre o fluxo de CO₂ em solos sob Campo Limpo Úmido no Cerrado. *II Simpósio internacional de Savanas Tropicais*, v.3, p.7pp, 2008.

FRANÇA, A. M. DA S.; SANO, E. E. Influência de variações ambientais sobre o fluxo de CO₂ em solos sob Campo Limpo Úmido no Cerrado. *Sociedade e Natureza*, v.2, p.197–209, 2011.

FRANÇA, A. M. DA S. *Função de pedotransferência para estimativa de estoques de carbono em solo de áreas de Campo Limpo Úmido do Distrito Federal*. 2011. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Depto de Geologia, Universidade de Brasília, Brasília. 2011.

- GRACE, J. et al. Productivity and carbon fluxes of tropical savannas. *Journal of Biogeography*, v.33, n.3, p.387–400, mar. 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01448.x>
- IBAMA. Projeto de monitoramento do desmatamento dos biomas brasileiros por satélite - PMDBBS. Disponível em: <siscom.ibama.gov.br/monitorabiomas/cerrado/index.htm>. Acesso em: 1 maio de 2014.
- LAL, R.; FOLLETT, R. F. (EDS.). *Soil carbon sequestration and the greenhouse effect*. Madison WI: Soil Science Society of America, 2009. p. 410pp
- LEPSCH, I. F. *Formação e Conservação Dos Solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178p.
- LEVENBERG, K. A Method for the Solution of Certain Non-Linear Problems in Least Squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, v.2, p.164–168, 1944.
- MARQUARDT, D. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, v.11, n.2, p.431–441, 1963.
- MATLAB, The MathWorks Inc. *MATLAB R2013a*. Natick, Massachusetts, United States. 2013. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/>>
- MEIRELLES, M. L.; FERREIRA, E. A. B.; FRANCO, A. C. Dinâmica Sazonal do Carbono em Campo Úmido do Cerrado. *Documentos/Embrapa Cerrados*, v.164, p.32p, 2006.
- MUNHOZ, C. B. R.; FELFILI, J. M. Fitossociologia do estrato herbáceo-subarbustivo em campo limpo úmido no Brasil Central 1. *Acta Botanica Brasilica*, v.22, n.4, p.905–913, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-33062008000400002>
- NEUE, H. U. et al. Carbon in tropical wetlands. *Geoderma*, v.1, p.163–185, 1997. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00041-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00041-4)
- OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. *Classes Gerais de Solos do Brasil*. Guia Auxiliar para seu Reconhecimento. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201p.
- REATTO, A. et al. Solos de ocorrência em duas áreas sob matas de galeria no Distrito Federal: aspectos pedológicos, uma abordagem química e físico-hídrica. In: RIBEIRO, J. F.; FONSECA, C. E. L.; SOUSA-SILVA, J. CARLOS (Eds.). *Cerrado: caracterização e recuperação de matas de galeria*. Brasília: Embrapa Cerrados, 1998. p.115–140.
- REIN, T. A.; DUXBURY, J. M. Modeling the soil organic carbon, texture and mineralogy relations in the profile of oxisols from the Brazilian. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE SAVANAS TROPICAIS, 2., 2008, Brasília – DF. *Anais do II Simpósio internacional de Savanas Tropicais*, Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008.
- SCURLOCK, J. M. O.; HALL, D. O. The global carbon sink : a grassland perspective. *Global Change Biology*, n.4, p.229–233, 1998. DOI: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.1998.00151.x>
- SILVA, J. E. et al. Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the Cerrado region, Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v.103, p.357–363, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.007>
- SILVA, J. F. et al. Spatial heterogeneity , land use and conservation in the cerrado region of Brazil. *Journal of Biogeography*, p.536–548, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01422.x>
- TIESSEN, H.; MOIR, J. O. Total and organic carbon. In: CARTER, M. E. (Ed.). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Ann Arbor, Michigan: Ed. Lewis Publishers, 1993. p.187–211.
- WALTER, B. M. T.; CARVALHO, A. M. DE; RIBEIRO, J. F. O Conceito de Savana e de seu Componente Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. DE; RIBEIRO, J. F. (Eds.). *Cerrado: Ecologia e*

Flora. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p.19–45.

ZINN, Y. L. et al. Edaphic Controls on Soil Organic Carbon Retention in the Brazilian Cerrado: Soil Structure. *Soil Science Society of America Journal*, v.71, n.4, p.1204, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2006.0015>

ZINN, Y. L. et al. Perfis de carbono orgânico do solo nas regiões sul e Serra do Espinhaço meridional, Minas Gerais: Modelagem em profundidade. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v.36, n.5, p.1395–1406, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000500003>