





ARTIGO ORIGINAL

Recuperação do carbono orgânico total e das frações húmicas da matéria orgânica em diferentes usos do solo

Recovery of total organic carbon and humic fractions of the soil organic matter in different land uses

Arcângelo Loss¹ , Camilo Mendes Sepulveda¹ , Mariane Gonçalves Lintemani¹ ,
Alfredo Celso Fantini¹ 

¹Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, Brasil

Como citar: Loss, A., Sepulveda, C. M., Lintemani, M. G., & Fantini, A. C. (2020). Recuperação do carbono orgânico total e das frações húmicas da matéria orgânica em diferentes usos do solo. *Scientia Forestalis*, 48(126), e3289. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.04>

Resumo

O estudo teve por objetivo quantificar os teores de carbono orgânico total (COT) e C das frações húmicas (humina-CHUM; ácido húmico-CFAH e ácido fúlvico-CFAF) da matéria orgânica nas profundidades de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em diferentes usos do sistema roça de toco (roça de aipim com 2 e em pousio com 10 e 15 anos), no sistema agroflorestal (SAF), no cultivo de eucalipto e na floresta nativa. Os teores de COT foram menores na roça de 2 anos em relação à floresta nativa e maiores em relação à roça com 10 anos de pousio à 0-0,05 e 0,10-0,20 m. A queima da biomassa na roça de toco aumentou o CHUM em relação ao pousio 10 anos (0-0,10 m) e ao SAF (0,05-0,10 m). A queima também aumentou o CFAF e diminuiu o CFAH no solo da roça de 2 anos em relação à área em pousio (10 e 15 anos), ao SAF e ao eucalipto. O pousio do sistema roça de toco por períodos de 15 anos é capaz de restabelecer o COT, CHUM e CFAH do solo semelhantes ao de um solo de floresta nativa, SAF e eucalipto.

Palavras-chave: Agricultura de corte e queima; Humina; Ácido húmico; Ácido fúlvico.

Abstract

The objective of this study was to quantify the total organic carbon (COT) and the C content of humic fractions (humic-CHUM, humic acid-CFAH and fulvic acid-CFAF) of organic matter at depths of 0-0.05, 0.05 -0.10 and 0.10-0.20 m in different stages of an area under slash-and-burn agriculture (slash-and-burn 2 years old, 10 and 15 years old fallow), in the agroforestry system (AFS), in the eucalyptus plantation and in the native forest. TOC levels were lower in the slash-and-burn 2 years old than in the native forest, and higher in relation to the slash-and-burn with 10 years of fallow (0.0-0.05 and 0.10-0.20 m). The biomass burning in the slash-and-burn 2 years old increased the CHUM in relation to the 10 years old fallow (0.0-0.10 m) and the AFS (0.05-0.10 m). Burning also increased the CFAF and decreased CFAH in the slash-and-burn 2 years old in relation to fallow (10 and 15 years), SAF and eucalyptus. A fallow period as long as 15 years is long enough to restore the TOC, CHUM and CFAH of the soil to a condition similar to the soil under native forest, AFS and eucalyptus.

Keywords: Slash-and-burn agriculture; Humin; Humic acid; Fulvic acid.

Fonte de financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Conflito de interesse: Nada a declarar.

Autor correspondente: arcangelo.loss@ufsc.br

Recebido: 19 fevereiro 2019.

Aceito: 1 julho 2019.

Editor: Francides Gomes Silva Júnior.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

INTRODUÇÃO

O sistema de cultivo do solo denominado de roça de toco ou agricultura itinerante é utilizado há milhares de anos em diversas regiões do mundo, sendo mais utilizado nas áreas tropicais e principalmente por pequenos agricultores (Ribeiro Filho et al., 2013, 2018). Embora tenha declinado nas últimas décadas, este tipo de agricultura ainda ocupa cerca de 280 milhões de hectares de terras cultivadas (Heinimann et al., 2017).

As etapas que envolvem o uso do solo no sistema roça de toco consistem na desflorestação e queima da biomassa, seguido por um período de cultivo que pode variar de um a três anos. Após esse período, a produtividade das culturas diminui e por isso a área é abandonada e deixada em pousio por 10 a 15 anos na região do estudo (Siminski & Fantini, 2007), ou até 30 anos em outras regiões da Mata Atlântica (Klein, 1979). Durante esse período de pousio, a vegetação regenera-se através do processo de sucessão secundária. Em Santa Catarina, região do estudo, o sistema roça de toco tem a particularidade da produção de carvão vegetal, pela carbonização de parte da vegetação não queimada no processo de preparo da terra para o plantio (Fantini et al., 2010), com mais de 30% das famílias agricultoras da região têm no carvão a sua principal fonte de rendimento (Carrieri-Souza et al., 2014).

Alguns estudos relatam que após o cultivo do solo no sistema roça de toco pode ocorrer um decréscimo dos teores de nutrientes e matéria orgânica (Aboim et al., 2008; Ziegler et al., 2009). Porém, há também estudos que afirmam que se trata de um sistema com elevada capacidade de resiliência, pois o período de distúrbio pelo cultivo é compensado pelo longo período de pousio (Adams et al., 2013; Lintemani, 2016; Ribeiro Filho et al., 2018).

Mukul & Herbohn (2015) realizaram meta-análise sobre o sistema roça de toco e concluíram que ainda existem poucos estudos sobre as reais consequências ambientais, especialmente as que se referem aos atributos químicos do solo, além de alertarem que também existem poucas discussões sobre a dimensão do impacto ambiental quando comparada com os sistemas agrícolas “convencionais” como as monoculturas. Ribeiro Filho et al. (2013, 2018) reconhecem que o fogo pode ser prejudicial ao solo, porém defendem que o pousio, que é a etapa crucial da roça de toco, pode ser suficiente para recuperar os danos resultantes da queima.

Esse contexto sugere que a duração do período de pousio é determinante para reverter possíveis danos causados ao solo quando da instalação das “roças”. Dentre os atributos do solo que mereceram atenção destaca-se a matéria orgânica do solo (MOS) pois ela é indicadora dos efeitos provocados no solo devido aos sistemas de manejo (Vezzani & Mielniczuk, 2009). Além disso, dentre as frações da MOS, as frações húmicas em áreas de roça de toco com diferentes períodos de pousio pode ajudar a elucidar como estão distribuídos os teores de carbono dessas frações antes da desflorestação, durante o cultivo no sistema roça de toco e ao longo do período de pousio.

Avaliando as alterações ocorridas nos teores de carbono das frações húmica, ácidos húmicos e fúlvicos decorrentes da desflorestação e queima da biomassa e subsequente implantação de pastagem em um Vertissolo, Loss et al. (2014) observaram que os teores de carbono da fração húmica evidenciaram melhor as diferenças entre os sistemas de uso do solo. Os autores concluíram que a área de floresta nativa convertida em pastagem, mesmo após oito a 10 anos de uso, ainda não restabeleceu o equilíbrio entre as frações húmicas quando comparado com os teores verificados na floresta nativa.

O objetivo deste estudo foi avaliar diferentes períodos de pousio e usos do solo no restabelecimento de suas condições edáficas a partir dos teores de carbono orgânico total e carbono das frações húmicas da MOS.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido na localidade de Três Riachos, município de Biguaçu, região litorânea central de Santa Catarina, Brasil. O clima da região de acordo com a classificação Koppen-Geiger, é do tipo Cfa, mesotérmico úmido. A temperatura média anual é de 20°C e a

precipitação anual na região é de 1.390 mm. A vegetação original do local, segundo Veloso et al. (1991), é característica de Floresta Ombrófila Densa. O solo avaliado nos diferentes sistemas de uso foi classificado como Cambissolo Háptico (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2013), apresentando relevo que variava de ondulado a forte ondulado. Sua caracterização físico-química na camada de 0,0-0,10 m está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização físico-química* da camada de 0-0,10 m de diferentes sistemas de uso do solo.

Ds	Argila	Areia	Silte	pH	Al	Ca	Mg	Na	N	P	K
Mg m ⁻³		g kg ⁻¹		H ₂ O		cmol _c kg ⁻¹			g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹
Floresta com 100 anos											
1,08	379	452	169	4,0	2,43	4,93	1,76	0,0	1,78	2,30	16,24
Roça de toco de 2 anos											
1,03	377	432	191	3,94	3,33	3,31	1,84	0,0	1,73	2,06	13,69
Pousio com 10 anos											
1,10	383	437	180	4,10	2,53	2,78	2,09	0,0	1,55	0,59	10,25
Pousio com 15 anos											
1,04	402	434	164	3,82	2,81	4,61	2,27	0,0	1,98	1,09	14,05
Eucalipto											
1,04	406	470	124	3,81	4,03	0,65	1,71	0,0	1,31	1,01	7,29
SAF											
1,11	389	465	146	4,29	2,08	3,62	2,66	0,0	1,39	0,48	7,11

*Análises feitas no momento de coleta de solos para análises de C. As análises foram efetuadas segundo Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997). Ds=densidade do solo; SAF=sistema agroflorestal

Avaliaram-se os seguintes sistemas de uso:

- Floresta nativa (27°24'02,35"S 48°44'56,17"O): área de floresta primária (1,5 ha) com 100 anos. Apresenta alta diversidade de espécies e extrato arbóreo denso (Mata Atlântica), e perceptível presença de fauna. As principais espécies florestais são a palmeira jussara (*Euterpe edulis*), licurana (*Hyeronima alchorneoides*) e jacatirão (*Miconiacin namomifolia*), e esparsos indivíduos de bracatinga (*Mimosa escabrella*) e embaúva (*Cecropiapa chystachya*).
- Pousio com 15 anos (27°24'07,00"S e 48°44'58,29"O): área de 1,0 ha com floresta secundária, em pousio há cerca de 15 anos. Apresenta indivíduos arbóreos maduros com destaque para jacatirão (*Miconiacin namomifolia*), capororoca (*Rapanea ferruginea*), seca ligeiro (*Pera glabrata*) e vassourão (*Baccharis elaeagnoides*). Apenas uma roça foi efetuada anteriormente no local, com desflorestação, queima da vegetação e cultivo de aipim (*Manihot esculenta*) por dois anos. As práticas de manejo consistiram no controle de espécies espontâneas manualmente, sem correção da acidez do solo e sem adubação química ou orgânica.
- Pousio com 10 anos (27°24'03,05"S e 48°45'09,49"O): floresta secundária sendo 1,0 ha com 10 anos. A área apresenta indivíduos arbóreos maduros, com diversidade de espécies semelhante ao pousio de 15 anos. Também foi realizado, anteriormente, um cultivo de aipim no sistema roça de toco por dois anos, com práticas semelhantes à área de pousio de 15 anos.
- roça de toco com cultivo de aipim de 2 anos (27°24'16,13"S e 48°44'56,24"O): essa área (1,0 ha) representa o marco inicial da sequência cronológica da roça de toco, apresentando, no momento da coleta das amostras de solo, dois anos de cultivo com aipim. Anteriormente está área era uma floresta nativa com 80 anos de idade. A floresta foi derrubada, queimada e, posteriormente, instalada a roça de toco com plantio de aipim.

- e) Cultivo de eucalipto (27°24'12,66"S 48°45'11,68"O): área de 1,0 ha cultivada com eucalipto, com 7 anos. Anteriormente ao cultivo do eucalipto, a área era composta por floresta secundária. O sub-bosque encontrava-se recoberto por vegetação espontânea, com destaque para a família das gramíneas, tais como o colônio (*Panicum maximum*) e a grama batatais (*Paspalum notatum*).
- f) Sistema agroflorestal (27°24'08,04"S 48°45'08,80"O): área de 0,7 ha cultivada em sistema agroflorestal (SAF) de banana consorciada na floresta, com três anos. Anteriormente, a área era composta por floresta secundária. A vegetação que se desenvolveu consorciada com a bananeira possuía 1,5 m de altura e predominância de vassoura (*Baccharisdracunculifolia*) e orelha de onça (*Tibouchina heteromalla*). O solo encontrava-se recoberto por vegetação espontânea, com destaque para a família das gramíneas, principalmente o colônio (*Panicum maximum*) e a grama batatais (*Paspalum notatum*).

Coleta e análise do solo

Para a coleta das amostras de solo, que foi realizada em fevereiro de 2016, selecionou-se uma área de 500 m² em cada sistema de uso solo. Assim, a fim de evitar interferências das variáveis nos resultados, os pontos de coleta em cada sistema foram escolhidos cuidadosamente, observando-se a variação do relevo, de ondulado a forte ondulado, apesar da classe de solo ser a mesma (Cambissolo Háplico). Coletou-se amostras de solo nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, sendo três amostras simples em cada área para formar uma composta, com quatro repetições por sistema de uso do solo. Como não se trata de um experimento com planejamento experimental, a amostragem foi feita conforme os procedimentos estatísticos para planejamentos experimentais com restrições na casualização (Ferreira et al., 2012).

Após a coleta, as amostras foram identificadas e acondicionadas em sacos plásticos e, em seguida, foram secas à sombra, destorroadas e peneiradas em malha de 2,00 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Com a TFSA foram feitas as análises do carbono orgânico total (COT) segundo Yeomans & Bremner (1998). A fração húmica (C-HUM), ácido húmico (C-FAH) e ácido fúlvico (C-FAF) foram obtidas pelo fracionamento químico da MOS pelo método descrito por Swift (1996) com adaptações de Almeida et al. (2012) e os teores de C nessas frações foram obtidas segundo Yeomans & Bremner (1998).

Análise estatística

Os resultados foram avaliados quanto à normalidade e homogeneidade por meio dos testes de Lilliefors e Bartlett, respectivamente. Posteriormente, considerando o delineamento inteiramente casualizado, os resultados foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F e a média, quando significativas, foram comparadas entre si pelo teste Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade de erro, utilizando o software Sisvar 5.6.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teores de COT do solo

A floresta nativa apresentou os maiores teores de COT, enquanto a área de roça de 2 anos apresentou os menores, ambos em profundidade de 0,0-0,05 m. Na camada de 0,05-0,10 m, apenas as áreas de pousio 10 anos e SAF diferiram das demais, apresentando os menores teores de COT. Na profundidade de 0,10-0,20 m, apenas as áreas com floresta e pousio 10 e 15 anos diferiram das demais, apresentando os maiores teores de COT (Figura 1).

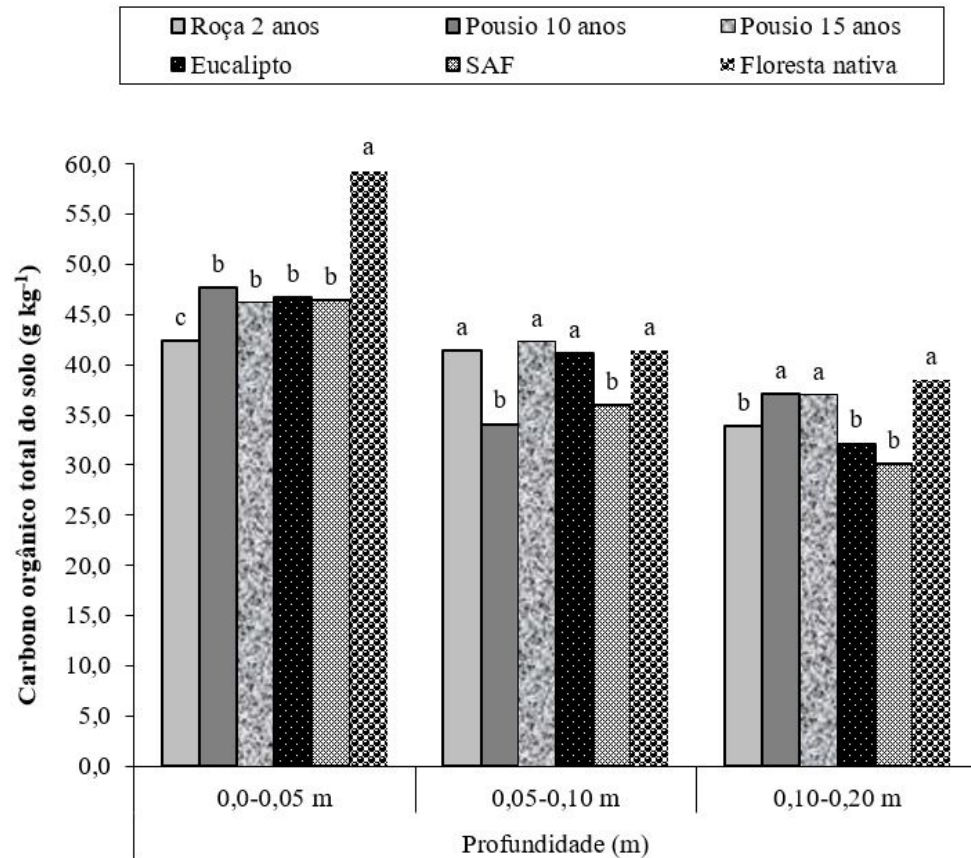


Figura 1 - Teores médios (g kg^{-1}) de carbono orgânico total (COT) em diferentes sistemas de uso do solo. Médias seguidas de mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV=coeficiente de variação. SAF=sistema agroflorestal

Os maiores teores de COT na floresta nativa (0,0-0,05 m) são provavelmente devidos ao aporte constante de serapilheira e também da ausência de influência antrópica. Esta área representa a condição original do solo. Padrão contrário foi verificado na área de roça de 2 anos. Os menores teores de COT nessa área são consequência da derrubada da floresta seguida da queima da biomassa para posterior cultivo do aipim. Além da perda de COT na forma de CO_2 através da queima da vegetação (González-Pérez et al., 2004), a prática de controle das espontâneas manualmente durante os dois anos de cultivo do aipim elimina toda a vegetação espontânea, deixando o solo descoberto. Essa prática diminui, portanto, o fornecimento de carbono via resíduos vegetais da vegetação espontânea, aumentando também as perdas de COT por processos erosivos, pois todas as áreas deste estudo encontram-se em relevo fortemente ondulado e sujeitos à precipitação bem distribuída durante todo o ano. Somado às perdas de carbono via processos erosivos e na forma de CO_2 após a derrubada e queima da vegetação, os menores teores de COT na área de roça 2 anos também são decorrentes da redução da atividade biológica, a qual é fortemente afetada devido a sua sensibilidade a altas temperaturas (Verma & Jayakumar, 2012). Com uma redução drástica da biomassa microbiana do solo tem-se menores teores disponíveis de carbono (Prieto-Fernandez et al., 1998; Poirier et al., 2014; Ando et al., 2014).

Alguns estudos demonstram que após um incêndio florestal, observa-se uma diminuição acentuada no teor COT do solo, sendo este efeito acelerado pelas modificações provocadas nas propriedades físico-químicas do solo (por exemplo, repelência da água) somada a remoção temporal da vegetação herbácea que recobre o solo, o que acarreta no aumento das perdas de matéria orgânica por processos erosivos (De Bano, 2000; Mataix-Solera et al., 2013). Avaliando os atributos químicos de um solo de textura franco-arenosa, em uma área de roça de toco com um ano de idade, sob plantio de milho, Lima et al. (2010) encontraram menores

valores de COT ($12,20 \text{ g kg}^{-1}$) quando comparados às áreas de SAF de 6 e 10 anos e à floresta nativa.

Os maiores valores de COT nas áreas de pousio de 10 e 15 anos, em comparação com a área de roça de 2 anos (0,0-0,05 e 0,10-0,20 m), indicam que períodos de 10 anos são suficientes para promover melhoria na condição do solo anteriormente cultivado no sistema roça de toco, através do aporte de carbono promovido pela deposição de serapilheira e sistema radicular. Resultados semelhantes são relatados por Johnson & Curtis (2001) em trabalho onde foram avaliados os teores de COT no solo florestal após 10 anos de ocorrência de um fogo (incêndio florestal). Os autores atribuíram o aumento dos teores de COT devido ao acúmulo de carvão e matéria orgânica hidrofóbica recalcitrante, acrescido do aporte de resíduos vegetais da vegetação que se restabeleceu após a queima, com ênfase para plantas fixadoras de nitrogênio.

Os teores de COT encontrados nas áreas de SAF e eucalipto (0,0-0,05 m) foram semelhantes aos encontrados na área em pousio de 10 e 15 anos. Isto indica que após 10 anos de pousio, as áreas já apresentam os mesmos teores de COT que as áreas com usos agrícolas, as quais nunca houve roça de toco e nem retirada da vegetação espontânea.

Na profundidade de 0,05-0,10 m, os teores de COT são semelhantes aos da floresta nativa somente após o pousio de 15 anos. Ou seja, um pousio por 10 anos é insuficiente para restabelecer os teores de COT da área referência. Entretanto, após os 15 anos de pousio, além do maior tempo para adição de carbono via deposição de serapilheira e sistema radicular, também pode ter favorecido o aumento da fauna do solo e da atividade biológica, os quais irão promover a adição de carbono em profundidade, tornando possível a obtenção de maiores teores de COT, semelhantes à condição original do solo representada pela floresta nativa.

Os teores de COT da área de roça de 2 anos foram iguais aos das áreas de eucalipto, pousio de 15 anos e floresta nativa para a profundidade de 0,05-0,10 m e também iguais as áreas de SAF e eucalipto em 0,10 - 0,20 m (Figura 1). Isto pode ser decorrente da adição de carvão oriundo da queima da vegetação (Johnson & Curtis, 2001), pois o carvão vegetal possui um elevado teor de carbono e baixo teor de nitrogênio, o que acarreta em uma alta relação C/N (Trompowsky et al., 2005) e, conseqüentemente, menor decomposição da matéria orgânica e maior acúmulo de COT (Almendros & González-Vila, 2012). Além disso, os efeitos do fogo são mais pronunciados nos primeiros centímetros do solo (Ando et al., 2014; Poirier et al., 2014). Avaliando o efeito do fogo em uma floresta de coníferas, Poirier et al. (2014) compararam os teores de COT na camada de 0,0-0,15 m e 0,15-0,40 m de uma área queimada a menos de 7 anos com uma área nunca queimada. O efeito do fogo foi maior nos primeiros centímetros do solo, com uma redução de 21% no COT da área queimada em comparação a área nunca queimada. Dessa forma, neste estudo, a camada de 0,05-0,20 m pode ter sido menos afetada pelo fogo e suas conseqüências negativas, tendo conservado os teores de COT acumulados durante os anos de permanência da cobertura de floresta nativa (80 anos) que precederam o corte e queima.

Na profundidade de 0,10-0,20 m o uso do solo tem um efeito mais pronunciado nos teores de COT. As áreas cultivadas (roça de 2 anos, SAF e eucalipto) mesmo há pouco tempo apresentam valores menores de COT em relação à floresta nativa que as precedeu. Entretanto, valores de COT semelhantes aos da floresta nativa são verificados nas áreas de pousio com 10 e 15 anos de idade, evidenciando, mais uma vez, a capacidade de recuperação desse atributo do solo (Figura 1). Em estudo sobre os impactos da roça de toco em regiões tropicais da Ásia, Bruun et al. (2009) também mostraram que estoques de COT do solo são reduzidos em cerca de 90% em pousios curtos (4 anos) e em 60% quando ocorre a conversão para monoculturas.

Teores de C das frações húmicas

Na profundidade de 0,0-0,05 m, a área de floresta nativa apresentou os maiores valores de C-HUM, enquanto as áreas de pousio 10 e 15 apresentaram os menores valores. Na camada de 0,05-0,10 m, a área de pousio 10 anos e o SAF apresentaram os menores valores em comparação às demais áreas. Já na camada de 0,10-0,20 m, os maiores teores de C-HUM

foram encontrados na floresta nativa, e os menores valores de C-HUM foram encontrados na área de roça 2 anos, SAF e eucalipto (Tabela 2).

Tabela 2 - Teores médios (g kg^{-1}) de carbono das frações húmicas (C-HUM, C-FAH e C-FAF) em diferentes sistemas de uso do solo.

Sistemas de uso da terra							
Prof. (cm)	Roça 2 anos	Pousio de 10 anos	Pousio de 15 anos	Eucalipto	SAF	Floresta nativa	CV (%)
C-HUM (g kg^{-1})							
0,0-0,05	35,90 b	33,46 c	30,00 c	37,80 b	37,02 b	42,34 a	5,7
0,05-0,10	35,55 a	30,83 b	32,25 a	33,22 a	27,87 b	34,40 a	6,7
0,10-0,20	26,30 c	30,74 b	30,50 b	25,42 c	24,72 c	33,67 a	5,8
C-FAH (g kg^{-1})							
0,0-0,05	1,57 d	8,04 b	11,73 a	5,11 c	4,70 c	10,54 a	10,6
0,05-0,10	1,49 d	1,34 d	5,41 a	4,44 b	5,46 a	3,19 c	9,6
0,10-0,20	0,83 d	1,87 c	1,99 c	2,53 b	4,00 a	0,70 d	13,4
C-FAF (g kg^{-1})							
0,0-0,05	4,72 b	4,28 b	3,04 c	1,97 d	1,78 d	5,40 a	11,7
0,05-0,10	2,90 b	2,15 c	2,99 b	1,60 d	0,62 e	3,45 a	9,0
0,10-0,20	5,46 a	1,61 d	1,63 d	2,67 c	0,50 e	3,41 b	8,7

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. CV=coeficiente de variação. Prof=profundidade, C-HUM=carbono da fração húmica, C-FAH=carbono da fração ácido húmico, C-FAF=carbono da fração ácido fúlvico, SAF=sistema agroflorestal

A humina é a fração mais estável da MOS, sendo fortemente estabilizada com a parte mineral do solo (Stevenson, 1994). Assim, os maiores valores encontrados na área de roça 2 anos em relação as áreas de pousio 10 e 15 anos podem ser produto da queima da biomassa que, segundo Tomasi et al. (2012), favorece a acumulação de MOS na forma de humina, principalmente na camada superficial do solo. Esse resultado pode, então, ser decorrente da concentração do carbono pirogênico formado durante a queima da vegetação nessa fração (Swift, 2001). Segundo alguns autores (Almendros & Leal, 1990; Efremova & Efremov, 2006; Vergnoux et al., 2011; Almendros & González-Vila, 2012; Sirotiak & Bartošová, 2016), durante a queima da vegetação, parte dos ácidos húmicos (AH) e fúlvicos (AF) podem ser transformados em humina, o que pode justificar os maiores teores de C-HUM na área de roça 2 anos na camada superficial. Isso ocorre devido a mudanças de solubilidade que ocorrem na composição elementar dos AH e AF, com alterações das relações H/C e O/C. Almendros & González-Vila (2012) e Sirotiak & Bartošová (2016) relataram que o aquecimento favorece a diminuição da razão H/C, com conseqüente aumento da fração aromática e a uma diminuição na relação O/C, indicando uma perda substancial de oxigênio funcional destes grupos. A possível desidratação e descarboxilação das frações mais solúveis (AH e AF) pode explicar o aumento progressivo da fração mais insolúvel (humina) na área de roça 2 anos.

Avaliando a distribuição do carbono das frações húmicas da MOS em Latossolo sob campo nativo (CN), campo nativo queimado (CNq), mata nativa (MN) e lavoura (LA), Tomasi et al. (2012) encontraram valores (g kg^{-1}) de C-HUM variando de 19,7 a 9,8 no CN, 31,2 a 17,3 no CNq, 4,7 a 4,2 na LA e 76,3 a 40,7 na MN, respectivamente, para as profundidades de 0,0-0,025 e 0,025-0,05 m. Esses resultados corroboram os encontrados neste estudo, indicando que a queima da biomassa da floresta derrubada aumentou o C-HUM, assim como o uso do solo para o cultivo agrícola diminuiu o C-HUM, ambos em relação ao CN.

O efeito da queima na roça 2 anos desfavorece o C-HUM na profundidade 0,10-0,20 m, pois ocorre menor aporte de carbono via sistema radicular já que a vegetação é derrubada e em seguida queimada. Após 2 anos de cultivo agrícola, o pousio regenera a vegetação, que adiciona serapilheira sobre o solo, favorecendo a atividade microbiana e fauna do solo. Dessa forma, assim como observado para os teores de COT (Figura 1), nessa profundidade (0,10-0,20 m) tem-se um efeito do

uso do solo mais pronunciado, pois as áreas de roça de 2 anos, SAF e eucalipto, que já foram floresta no passado, apresentam teores de C-HUM inferiores aos da floresta nativa. E as áreas de pousio já recuperaram parte do C-HUM, pois são maiores os valores encontrados, porém ainda são inferiores ao da floresta nativa (Tabela 2).

Para o C-FAH, os maiores valores foram encontrados na área de pousio 15 anos e floresta nativa (0,0-0,05 m), pousio 15 anos e SAF (0,05-0,10 m) e somente para o SAF (0,10-0,20 m). Já os menores valores de C-FAH foram encontrados na área de roça 2 anos em todas as camadas avaliadas, porém sem diferir do pousio 10 anos para 0,05-0,10 m, e em 0,10-0,20 m não diferiu da área de floresta nativa (Tabela 2).

Padrão contrário de resposta foi observado para o C-FAF, sendo verificados maiores teores de C-FAF na área de roça 2 anos em comparação à área de pousio 15 anos, SAF e eucalipto (0,0-0,05 m), assim como maiores valores que o pousio 10 anos, SAF e eucalipto (0,05-0,10 m). Para a camada de 0,10-0,20 m, à área de roça 2 anos apresentou os maiores teores de C-FAF em comparação às demais áreas avaliadas (Tabela 2).

Conforme relatado por González-Pérez et al. (2004), Almendros & González-Vila (2012) e Sirotiak & Bartošová (2016), os grupos funcionais contendo oxigênio de macromoléculas húmicas são altamente instáveis ao calor. Então, após a queima da vegetação, parte dos AH pode ser transformada em humina, o que justifica os menores teores de C-FAH na roça 2 anos e maiores teores nas áreas de pousio. Simultaneamente, parte dos AF também pode se transformar em macromoléculas, e a entrada adicional de material lignificado alcali-solúvel herdado da queima incompleta da biomassa da vegetação arbórea também poderá ter contribuído para a formação de AF, conforme os maiores valores de AF observados na roça de 2 anos em relação às demais áreas avaliadas.

Em estudo sobre a distribuição do C-FAF e C-FAH em Latossolo sob CN, CNq, MN e LA, Tomasi et al. (2012) também encontraram maiores valores de C-FAF e menores de C-FAH na área de CNq em comparação a todos os demais usos para todas as profundidades de 0,0-0,30 m. Os autores relataram que a queima da vegetação promoveu o enriquecimento de C-FAF às custas da depleção de C-FAH. E conforme apresentado por Dick et al. (2009), que o C-FAF é constituído por estruturas mais ricas em grupos carboxílicos em comparação ao C-FAH, os resultados encontrados neste estudo são corroborados pelos encontrados por Tomasi et al. (2012), que indicaram que a queima da vegetação promoveu a produção de substâncias húmicas alcali-solúveis mais oxidadas do que nas áreas com LA. O mesmo efeito ocorreu neste estudo, em que as áreas com SAF e eucalipto apresentaram os menores valores de C-FAF em comparação à roça 2 anos na três camadas avaliadas.

Em outro estudo sobre a compartimentalização do carbono das frações húmicas da MOS, Santana et al. (2011) também encontraram maiores teores de C-FAF e menores de C-FAH em área de pastagem queimada quando comparada com a pastagem sem queima. Esses autores relataram que esses resultados indicam uma dinâmica diferente de formação do C-FAH e de C-FAF; no ambiente alterado pelo fogo, a formação de C-FAF é favorecida em detrimento do C-FAH.

Os maiores teores de C-FAH no pousio 15 anos e no SAF, assim como os maiores teores de C-FAF para a Floresta nativa são devidos à deposição constante de serapilheira pela vegetação arbórea dessas áreas, o que favorece a atividade biológica e, conseqüentemente, maior aporte de carbono. Em ambientes naturais, a formação das substâncias húmicas é associada à atividade microbiana (Machado & Gerzabek, 1993), sendo a humificação, ao longo do tempo, o resultado final do processo microbiológico.

Comparando-se a cronossequência do sistema roça de toco e as áreas de SAF e eucalipto em relação às frações mais humificadas da MOS (HUM e FAH), pode-se observar que no pousio de 15 anos os teores de C-HUM são maiores que no pousio de 10 anos (0,05-0,10 m) e iguais à roça 2 anos em 0,05-0,10 m e maiores em 0,10-0,20 m. O pousio de 15 anos também apresenta teores de C-HUM iguais ou maiores que o SAF e eucalipto para 5-10 e 0,10-0,20 m. Para o C-FAH, o pousio 15 anos mostrou valores superiores a roça 2 anos e pousio 10 anos nas três camadas avaliadas, não diferindo de pousio 10 anos para 0,10-0,20 m. Também apresentou teores superiores ao SAF e eucalipto para 0-10 cm, não diferindo do SAF para 0,05-0,10 m. Esses resultados indicam que o pousio longo (pelo menos 15 anos), seguindo apenas um ciclo de cultivo na área, é capaz de

restabelecer os teores de carbono das frações mais humificadas da MOS (HUM e FAH) semelhantes aos de um solo de floresta nativa e a sistemas de uso do solo que nunca tiveram roça de toco (SAF e eucalipto).

CONCLUSÕES

O pousio do sistema roça de toco a partir dos 10 anos restabelece os teores de COT (0,0-0,05 e 0,10-0,20 m) semelhante aos valores encontrados na floresta nativa, SAF e eucalipto.

A queima no sistema roça de toco 2 anos aumenta o C-HUM em relação ao pousio 10 anos (0,0-0,10 m) e ao SAF (0,05-0,10 m), assim como aumenta o C-FAF e diminui o C-FAH em relação às áreas de pousio, SAF e eucalipto.

Pousios longos (15 anos ou mais) no sistema roça de toco com apenas um ciclo de cultivo por área, é capaz de restabelecer o COT, C-HUM e C-FAH do solo a valores semelhantes aos de um solo de floresta nativa e a sistemas de uso do solo que nunca tiveram roça de toco (SAF e eucalipto).

REFERÊNCIAS

- Aboim, M., Coutinho, H. L. C., Peixoto, R. S., Barbosa, J. C., & Rosado, A. S. (2008). Soil bacterial community structure and soil quality in a slash-and-burn cultivation system in Southeastern Brazil. *Applied Soil Ecology*, 38(2), 100-108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.09.004>.
- Adams, C., Chamlian Munari, L., Van Vliet, N., Sereni Murrieta, R. S., Piperata, B. A., Fudemma, C., Pedroso Junior, N. N., Santos Taqueda, C., Crevelaro, M. A., & Spressola-Prado, V. L. (2013). Diversifying incomes and losing landscape complexity in Quilombola shifting cultivation communities of the Atlantic Rainforest (Brazil). *Human Ecology*, 41(1), 119-137. <http://dx.doi.org/10.1007/s10745-012-9529-9>.
- Almeida, H. C., Dick, D. P., Bertotto, F. L., & Chitarra, G. S. (2012). Distribution of chemical compartments of soil organic matter and C stocks of a Cambisol from south Brazil as affected by pinus afforestation. *Química Nova*, 35(7), 1329-1335. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422012000700009>.
- Almendros, G., & González-Vila, F. J. (2012). Wildfires, soil carbon balance and resilient organic matter in Mediterranean ecosystems: a review. *Spanish Journal of Soil Science*, 2, 1-33.
- Almendros, G., & Leal, J. A. (1990). An evaluation of some methods for oxidative degradation of the humic substances applied to carbohydrate-derived humic-like polymers. *Journal of Soil Science*, 41(1), 51-59. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00044.x>.
- Ando, K., Shinjo, H., Noro, Y., Takenaka, S., Miura, R., Sokotela, S. B., & Funakawa, S. (2014). Short-term effects of fire intensity on soil organic matter and nutrient release after slash-and-burn in Eastern Province, Zambia. *Soil Science and Plant Nutrition*, 60(2), 173-182. <http://dx.doi.org/10.1080/00380768.2014.883487>.
- Bruun, T. B., Neergaard, A., Lawrence, D., & Ziegler, D. (2009). Environmental consequences of the demise in swidden cultivation in Southeast Asia: carbon storage and soil quality. *Human Ecology*, 37(3), 375-388. <http://dx.doi.org/10.1007/s10745-009-9257-y>.
- Carrieri-Souza, M., Fantini, A. C., Uller-Gómez, C., & Dorow, R. (2014). Cadeias produtivas do carvão vegetal na agricultura familiar no sul do Brasil. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 31, 97-110. <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v31i0.34084>.
- Debano, L. F. (2000). The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: a review. *Journal of Hydrology*, 231/232, 195-206. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00194-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00194-3).
- Dick, D. P., Novotny, E. H., Dieckow, J., & Bayer, C. (2009). Química da matéria orgânica do solo. In V. F. Melo & L. R. F. Alleoni (Eds.), *Química e mineralogia do solo*. Viçosa: SBCS.
- Efremova, T. T., & Efremov, S. P. (2006). Pyrogenic transformation of organic matter in soils of forest bogs. *Eurasian Soil Science*, 39(12), 1297-1305. <http://dx.doi.org/10.1134/S1064229306120039>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. (1997). *Manual de métodos de análise de solos* (2. ed.). Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. (2013). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (3. ed., 353 p.). Brasília: EMBRAPA.

- Fantini, A. F., Uller-Gomez, C., Gartner, C., Vicente, N. R., Schelindwein, S. L., Bauer, E., & Menezes, G. T. C. (2010). Produção de carvão e de saberes na agricultura familiar de SC. *Agropecuária Catarinense*, 23, 13-15.
- Ferreira, D. F., Cargnelutti Filho, A., Lúcio, A. D. (2012). Procedimentos estatísticos em planejamentos experimentais com restrições na casualização. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 1-35.
- González-Pérez, J. A., Gonzalez-Vila, F. J., Almendros, G., & Knicker, H. (2004). The effect of fire on soil organic matter: a review. *Environment International*, 30(6), 855-870. PMID:15120204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.003>.
- Heinimann, A., Mertz, O., Frolking, S., Egelund Christensen, A., Hurni, K., Sedano, F., Parsons Chini, L., Sahajpal, R., Hansen, M., & Hurtt, G. (2017). A global view of shifting cultivation: recent, current, and future extent. *PLoS One*, 12(9), e0184479. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0184479>.
- Johnson, D. W., & Curtis, P. S. (2001). Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management*, 140(2-3), 227-238. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00282-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00282-6).
- Klein, R. M. (1979). Ecologia da flora e vegetação do Vale do Itajai. *Sellowia*, 31, 11-164.
- Lima, S. S., Aquino, M. A., Leite, L. F. C., Velasquez, E., & Lavelle, P. (2010). Relação entre macrofauna edáfica e atributos físicos do solo em diferentes agroecossistemas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(3), 322-331. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2010000300013>.
- Lintemani, M. G. (2016). *Atributos do solo em uma cronossequência do sistema roça de toco* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Loss, A., Pereira, M. G., Bernini, T. A., Zatorre, N. P., & Wadt, P. G. S. (2014). Fertilidade do solo e matéria orgânica em Vertissolo e Argissolo sob cobertura florestal e pastagem. *Comunicata Scientiae*, 5(1), 1-10.
- Machado, P. A., & Gerzabek, M. H. (1993). Tillage and crop rotation interactions on humic substances of a Typic Haplorthox from southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 26(3), 227-236. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987\(93\)90046-R](http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987(93)90046-R).
- Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Tessler, N., Zornoza, R., Wittenberg, L., Martínez, C., Caselles, P., Pérez-Bejarano, A., Malkinson, D., & Jordán, M. M. (2013). Soil properties as key factors controlling water repellency in fire-affected areas: evidences from burned sites in Spain and Israel. *Catena*, 108, 6-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2011.12.006>.
- Mukul, S. A., & Herbohn, J. (2015). The impacts of shifting cultivation on secondary forests dynamics in tropics: A synthesis of the key findings and spatio temporal distribution of research. *Environmental Science & Policy*, 55(1), 167-177.
- Poirier, V., Paré, D., Boiffin, J., & Munson, A. D. (2014). Combined influence of fire and salvage logging on carbon and nitrogen storage in boreal forest soil profiles. *Forest Ecology and Management*, 326, 133-141. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.021>.
- Prieto-Fernandez, A., Acea, M. J., & Carballas, T. (1998). Soil microbial and extractable C and N after wildfire. *Biology and Fertility of Soils*, 27(2), 132-142. <http://dx.doi.org/10.1007/s003740050411>.
- Ribeiro Filho, A. A., Adams, C., & Murrieta, R. S. S. (2013). The impacts of shifting cultivation on tropical forest soil: a review. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi: Ciências Humanas*, 8(3), 693-727. <http://dx.doi.org/10.1590/S1981-81222013000300013>.
- Ribeiro Filho, A. A., Adams, C., Manfredini, S., Munari, L. C., Silva, J. A., Ianovali, D., Barbosa, J. M., Barreiros, A. M., & Neves, W. A. (2018). Dynamics of the soil fertility in quilombola shifting cultivation communities of the Atlantic Rainforest, Brazil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi: Ciências Naturais*, 13(1), 79-106.
- Santana, G., Dick, D. P., Jacques, A. V. Á., & Chitarra, G. S. (2011). Substâncias húmicas e suas interações com Fe e Al em Latossolo subtropical sob diferentes sistemas de manejo de pastagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35(2), 461-472. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000200015>.
- Siminski, A., & Fantini, A. C. (2007). Roça-de-toco: uso de recursos florestais e dinâmica da paisagem rural no litoral de Santa Catarina. *Ciência Rural*, 37(3), 690-696. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782007000300014>.
- Sirotiak, M., & Bartošová, A. (2016). Changes in structure and content humic substances in soil during the laboratory simulated fires. *Transactions of the VŠB Safety Engineering Series*, 1, 42-48.
- Stevenson, F. J. (1994). *Humus chemistry: genesis, composition, reactions* (496 p.). New York: John Wiley & Sons.

- Swift, R. (2001). Sequestration of carbon in soil. *Soil Science*, 166(11), 858-871. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-200111000-00010>.
- Swift, R. S. (1996). Organic matter characterization. In D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston & M. E. Sumner (Eds.), *Methods of soil analysis* (pp. 1011-1020). Madison: Soil Science Society American. <http://dx.doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c35>.
- Tomasi, C. A., Inda, A. V., & Dick, D. P. (2012). Substâncias húmicas em Latossolo subtropical de altitude sob usos e manejos distintos. *Ciência Rural*, 42(12), 2180-2184. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782012005000101>.
- Trompowsky, P., Benites, V. M., Madari, B. E., Pimenta, A. S., Hockaday, W. C., & Hatcher, P. G. (2005). Characterization of humic like substances obtained by chemical oxidation of eucalyptus charcoal. *Organic Geochemistry*, 36(11), 1480-1489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.orggeochem.2005.08.001>.
- Veloso, H. P., Rangel Filho, A. L. R. R., & Lima, J. C. A. (1991). *Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal* (124 p.). Rio de Janeiro: Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, IBGE.
- Vergnoux, A., Guiliano, M., Di Rocco, R., Domeizel, M., Théraulaz, F., & Doumenq, P. (2011). Quantitative and mid-infrared changes of humic substances from burned soils. *Environmental Research*, 111(2), 205-214. PMID:20362980. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2010.03.005>.
- Verma, S., & Jayakumar, S. (2012). Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: a review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 2(3), 168-176.
- Vezzani, F. M., & Mielniczuk, J. (2009). Uma visão sobre qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33(4), 743-755. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>.
- Yeomans, J. C., & Bremner, J. M. (1998). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19(13), 1467-1476. <http://dx.doi.org/10.1080/00103628809368027>.
- Ziegler, A. D., Bruun, T. B., Guardiola-Claramonte, M., Giambelluca, T. W. M., Lawrence, D., & Lam, N. T. (2009). Environmental consequences of the demise in swidden agriculture in Montane Mainland, SE Asia: hydrology and geomorphology. *Human Ecology*, 37(3), 361-373. <http://dx.doi.org/10.1007/s10745-009-9258-x>.

Contribuição dos autores: AL: investigação, supervisão, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição; CMS: metodologia, escrita – primeira redação; MGL: análise formal, metodologia, recursos; ACF: conceituação, administração do projeto, escrita – revisão e edição.