

INTER-RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS E
MICROBIOLÓGICOS NO SISTEMA SERAPILHEIRA-SOLO NO
BIOMA MATA ATLÂNTICA

RENATO VALADARES DE SOUSA MOREIRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MARÇO – 2017

**INTER-RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS E
MICROBIOLÓGICOS NO SISTEMA SERAPILHEIRA-SOLO NO
BIOMA MATA ATLÂNTICA**

RENATO VALADARES DE SOUSA MOREIRA

Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Produção Vegetal.

Orientadora: Prof^a. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MARÇO – 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCH / UENF**

049/2017

M838 Moreira, Renato Valadares de Sousa.

Inter-relações entre atributos químicos e microbiológicos no sistema serapilheira-solo no bioma Mata Atlântica / Renato Valadares de Sousa Moreira. – Campos dos Goytacazes, RJ, 2017.

x, 63 f.

Inclui Bibliografia.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2017.

Orientadora: Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues.

1. Modelagem de Equações Estruturais. 2. Biomassa Microbiana. 3. Carbono Orgânico do Solo. 4. Agregados do solo. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD – 631.46

INTER-RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS E
MICROBIOLÓGICOS NO SISTEMA SERAPILHEIRA-SOLO NO
BIOMA MATA ATLÂNTICA

RENATO VALADARES DE SOUSA MOREIRA

Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutor em Produção Vegetal.

Aprovada em 29 de março de 2017

Comissão Examinadora

Antonio Carlos da Gama-Rodrigues

Prof. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues (D.Sc., Ciência do Solo) - UENF

Priscila Henriques Gomes Oliveira

Prof^a. Priscila Henriques Gomes Oliveira (D.Sc., Produção Vegetal) - SEEDUC

Marco A. Martins

Prof. Marco Antonio Martins (Ph.D., Microbiologia do Solo) - UENF

Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues

Prof^a. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues (Ph.D., Ciência do Solo) - UENF
(Orientadora)

A Deus;

Aos meus avós Manoel Dias de Sousa (*in memorian*) e Senhorinha Valadares de Sousa (*in memorian*), pelo grande exemplo de companheirismo e sabedoria.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e por me guiar pelo caminho do bem;

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e ao Laboratório de Solos, pela oportunidade de realização deste curso e contribuir para meu desenvolvimento como cidadão;

Aos meus pais Denilza Valadares de Sousa Moreira e José Moreira da Conceição, pela minha educação e por tudo que fizeram e fazem por mim;

Ao meu irmão Rafael Valadares de Sousa Moreira, pelo seu companheirismo e amizade;

Ao meu tio e padrinho Dyckson Dias de Sousa, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida, pelos seus ensinamentos e por acreditar em mim;

À minha namorada Tarciana pela compreensão, carinho e por estar sempre ao meu lado;

Aos meus amigos Emerson, Cândido, Marcus Vinício, Francy, Evandro e Rodrigo, pela amizade e apoio;

À minha orientadora Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues pelos seus ensinamentos que foram essenciais e por estar sempre solícita a me ajudar. E também pelos incentivos, por acreditar em mim e conceder a oportunidade para realização desse trabalho;

Ao meu coorientador Antonio Carlos da Gama-Rodrigues pelo auxílio e contribuições na condução do trabalho;

Ao professor Marcus Vinicius da Silva Sales por todo apoio e colaborações para o trabalho e, por está sempre solícito a ajudar;

Ao professor Claudio Roberto Marciano pelos incentivos, ensinamentos e pelas colaborações prestadas;

Aos amigos de laboratório Lucas, Laís, Fabricio, Gerbeli, Paulo e Seldon pelo apoio e por compartilharem seus conhecimentos;

Aos laboratoristas Kátia, Vanilda e Ederaldo, por todo apoio na condução do trabalho;

A CAPES, pela concessão da bolsa.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Bioma Mata Atlântica	3
2.2 Uso do solo e sequestro de C	4
2.3 Serapilheira	5
2.4 Microrganismos do solo	5
2.5 Estoque de C e agregados do solo	7
2.6 Modelagem de equações estruturais (MEE)	9
3. TRABALHOS	12
3.1 CONVERSÃO DE FLORESTA EM PASTAGEM NO BIOMA MATA ATLÂNTICA: INTER-RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS E MICROBIANOS EM AGREGADOS DO SOLO	12
RESUMO	12
ABSTRACT.....	13
INTRODUÇÃO	14
MATERIAL E MÉTODOS	17
RESULTADOS	21
DISCUSSÃO	27
CONCLUSÕES	30

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
3.2 INTER-RELAÇÕES ENTRE A QUALIDADE DA SERAPILHEIRA, BIOMASSA MICROBIANA E ACÚMULO DE C EM SOLOS SOB COBERTURAS FLORESTAIS NO BIOMA MATA ATLÂNTICA	36
RESUMO	36
ABSTRACT	37
INTRODUÇÃO	38
MATERIAL E MÉTODOS	40
RESULTADOS	44
DISCUSSÃO	49
CONCLUSÕES	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
4. RESUMO E CONCLUSÕES	54
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

RESUMO

MOREIRA, Renato Valadares de Sousa, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Março de 2017. **Inter-relações entre atributos químicos e microbiológicos no sistema serapilheira-solo no bioma Mata Atlântica**. Orientadora: Prof^a. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues; Coorientador: Prof. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues.

O solo possui papel fundamental no ciclo global do C, pois, constitui um importante reservatório deste elemento. Os microrganismos do solo têm grande importância nos processos que conduzem ao armazenamento ou perda do carbono orgânico do solo (COS), através de uma rede complexa de inter-relações, que podem ser analisadas com o auxílio da modelagem de equações estruturais (MEE). O presente estudo foi dividido em dois artigos: o primeiro teve como objetivo analisar o efeito da conversão de floresta em pastagem sobre os atributos químicos e microbiológicos do solo e, verificar as relações entre tais atributos, buscando entender como estas relações influenciam o C acumulado nos macro (>0,250 mm) e nos microagregados (<0,250 mm) do solo. O estudo foi realizado a partir de um banco de dados proveniente da dissertação de Alves (2004) de avaliações de atributos químicos e microbiológicos realizadas em sete classes de agregados de solos sob duas florestas secundárias e duas pastagens adjacentes às mesmas. Foram testados modelos hipotéticos de inter-relações através da MEE com um banco de dados de informações advindas de macroagregados e outro dos microagregados do solo. A partir da MEE foram modificados e/ou retirados alguns caminhos do modelo e também retiradas

algumas variáveis para conseguir ajuste satisfatório dos modelos de inter-relações. Com os modelos ajustados foi verificado que a conversão de floresta em pastagem promoveu redução no conteúdo de C tanto nos macro quanto nos microagregados do solo. No modelo de macroagregados a biomassa microbiana e a atividade microbiana contribuíram diretamente para o C dos macroagregados, enquanto nos microagregados apenas a biomassa microbiana controlou de forma positiva o C dos microagregados. Conclui-se que com a conversão de floresta para pastagem ocorre redução do C tanto nos macro quanto nos microagregados do solo, sendo que os caminhos que levam a esta redução diferem com o tamanho dos agregados. O segundo artigo, teve como objetivo analisar o efeito da qualidade da serapilheira sobre a biomassa microbiana da serapilheira e do solo e, verificar como estas relações influenciam no C acumulado no solo em sistemas florestais. O estudo foi realizado a partir de dados provenientes da dissertação de Monteiro (2001) de avaliações da qualidade da serapilheira, biomassa microbiana da serapilheira e do solo e, do COS. Foram testados dois modelos hipotéticos de inter-relações, sendo que o Modelo 1 avaliou o efeito da Biomassa microbiana da serapilheira e do solo sobre o C acumulado no solo. O Modelo 2 avaliou a influência da Qualidade da serapilheira sobre a Biomassa microbiana da serapilheira e do solo e, o C acumulado no solo. Com os modelos ajustados, observa-se que no Modelo 1 tanto a biomassa microbiana da serapilheira quanto a biomassa microbiana do solo contribuíram para o C acumulado no solo. Neste modelo, o C acumulado no solo foi explicado por 86 % das variações. No Modelo 2 foi inserido um construto a mais (Qualidade da serapilheira) e foi observado que a Biomassa microbiana da serapilheira passou a agir como um dreno do C acumulado no solo. Neste modelo, o C acumulado no solo foi explicado por 69 % das variações. Com isso, pode-se concluir que os modelos foram adequados para explicar as relações entre a Qualidade da serapilheira, a Biomassa microbiana da serapilheira e do solo e, como estas agem sobre o C acumulado no solo.

Palavras-chave: Modelagem de equações estruturais, Biomassa microbiana, Carbono orgânico do solo, Agregados do solo.

ABSTRACT

MOREIRA, Renato Valadares de Sousa, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. March, 2017. Interrelations between chemical and microbiological attributes in the litter-soil system in the Atlantic Forest biome. Advisor: Prof^a. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues. Co-advisor: Prof. Antonio Carlos da Gama-Rodrigues.

Soil plays a fundamental role in the global C cycle, since it constitutes an important reservoir of this element. Soil microorganisms have great importance in the processes that lead to the storage or loss of soil organic carbon (SOC) through a complex network of interrelationships, which can be analyzed with the aid of structural equation modeling (SEM). The present study was divided into two articles: the first one had as aim to analyze the effect of forest conversion on pasture on the chemical and microbiological attributes of the soil and to verify the relationships between these attributes, trying to understand how these relations influence C accumulated in the macro (> 0.250 mm) and in the microaggregates (<0,250 mm) of the soil. The study was carried out from a database from the Master's Thesis Alves (2004) of assessments of chemical and microbiological attributes performed in seven classes of soil aggregates under two secondary forests and two pastures adjacent to them. Hypothetical models of interrelations were tested through the SEM with a data base of information from macroaggregates and another from soil microaggregates. From SEM paths were

modified and / or removed, and some variables were also removed to obtain a satisfactory adjust of the interrelationship models. With the adjusted models it was verified that the conversion of forest to pasture promoted a reduction in C content in both the macro and the microaggregates of the soil. In the model of macroaggregates the microbial biomass and the microbial activity contributed directly to the C of the macroaggregates, whereas in the microaggregates only the microbial biomass positively controlled the C of the microaggregates. It is concluded that with the conversion of forest to pasture there is a reduction of C in both the macro and microaggregates of the soil, and the paths that lead to this reduction differ with the size of the aggregates. The second article had as aim to analyze the effect of litter quality on litter and soil microbial biomass and to verify how these relationships influence soil accumulated C in forest systems. The study was based on data from the Master's Thesis Monteiro (2001) of litter quality, litter and soil microbial biomass and SOC. Two hypothetical models of interrelationships were tested, and Model 1 evaluated the effect of litter and soil microbial biomass on the C accumulated in the soil. Model 2 evaluated the influence of litter quality on litter and soil microbial biomass and soil C accumulated in the soil. With the adjusted models, it can be observed that in Model 1 both the microbial biomass of the litter and the microbial biomass of the soil contributed directly to the C accumulated in the soil. In this model, the C accumulated in the soil was explained by 86% of the variations. In Model 2 an additional construct was inserted (litter quality) and it was observed that the microbial biomass of the litter started to act as a drain of C accumulated in the soil. In this model, the C accumulated in the soil was explained by 69% of the variations. Thus, it can be concluded that the models were adequate to explain the relationship between litter quality, litter and soil microbial biomass, and how they act on soil C accumulated.

Keywords: Modeling of structural equations, Microbial biomass, Soil organic carbon, soil aggregates.

1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas terrestres podem acumular grande parte do C, através da biomassa vegetal e do solo. As florestas desempenham um importante papel no ciclo global do C. Nestes sistemas, a dinâmica do C se caracteriza por longos períodos de acumulação gradual de biomassa (dreno), alternado com períodos curtos de perda maciça de biomassa (fonte). Assim, atuam como reservatórios de C quando as plantas absorvem C pelo processo fotossintético, retendo-o na biomassa. E também, podem funcionar como fonte de C atmosférico pela ação antrópica e natural, por meio da carbonização da biomassa, respiração ou decomposição de seus resíduos (Maciel, 2012).

O solo possui papel fundamental no ciclo global do carbono, pois, funciona como um reservatório com cerca de duas vezes a quantidade de carbono da atmosfera e da biomassa vegetal (Swift, 2001). O C pode ser sequestrado no solo diretamente, através da conversão de CO₂ em compostos inorgânicos de C do solo, como carbonatos de cálcio e de magnésio, e também pode ser sequestrado indiretamente, com a fixação do CO₂ na biomassa vegetal através da fotossíntese, em que parte desta é indiretamente sequestrada como carbono orgânico do solo durante os processos de decomposição (Nair et al., 2009a).

A estabilização em longo prazo do C nos solos temperados e tropicais é mediada pela biota do solo (por exemplo, fungos, bactérias, raízes e minhocas), pela estrutura do solo (por exemplo, a agregação) e suas interações e, também é

influenciada pelo tipo de manejo agrícola (Six et al., 2002). Desta forma, percebe-se que tais variáveis estão inter-relacionadas e que o uso adequado do solo é importante para que a biota do solo tenha efeito positivo sobre os processos que conduzem ao C acumulado no solo (Zhang et al., 2013).

A interpretação destas interações pode ser observada através da construção de modelos hipotéticos que são gerados e validados pelo uso de ferramentas da estatística multivariada como, a modelagem de equações estruturais (MEE). Em que, por meio de um diagrama de caminhos pode-se visualizar as inter-relações entre as variáveis mensuradas e variáveis latentes (não mensuradas). Segundo Grace (2006), a MEE permite o desenvolvimento e a avaliação de hipóteses sobre relações complexas (multivariada). A MEE fornece tanto uma quantificação dos relacionamentos quanto uma avaliação da estrutura do modelo, indicando, por exemplo, se existem caminhos em falta ou se alguns caminhos não são necessários para explicar o modelo (Cherry et al., 2009).

Deste modo, os objetivos deste estudo foram analisar, com o auxílio MEE: Trabalho 1 - o efeito da conversão de floresta em pastagem sobre os atributos químicos e microbiológicos do solo e, verificar as relações entre tais atributos, buscando entender como estas relações influenciam o C acumulado nos macro (>0,250 mm) e nos microagregados (<0,250 mm) do solo; Trabalho 2 - analisar o efeito da qualidade da serapilheira sobre a biomassa microbiana da serapilheira e do solo e, verificar como estas relações influenciam no C acumulado no solo em sistemas florestais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Bioma Mata Atlântica

A Mata Atlântica, um dos biomas mais ricos em biodiversidade do planeta, ocupava uma área equivalente a 15% do território nacional (Dossiê Mata Atlântica, 2001). É constituída por um conjunto de ecossistemas, tendo uma grande variedade de habitats e conseqüentemente uma elevada biodiversidade. Abriga um importante número de espécies endêmicas, sendo considerada uma área prioritária para conservação (Schäffer e Prochnow, 2002). No entanto, sua cobertura foi reduzida drasticamente, ocupando atualmente 12,4% da área original (Fundação SOS Mata Atlântica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2015).

Segundo Ribeiro et al. (2009), a maior parte da cobertura de Mata Atlântica é representada por fragmentos menores que 50 ha, assim estando mais vulnerável à degradação, por conta da fragilidade de fragmentos pequenos. Atualmente este bioma é formado por fragmentos de mata descontínuos com diferentes tamanhos e isolados de outros remanescentes, em maior ou menor grau (Vidal, 2007), formando um mosaico.

No Rio de Janeiro, as regiões Norte e Noroeste são as que possuem os menores percentuais de remanescentes florestais de Mata Atlântica (Gomes et al., 2009), em decorrência do longo período de atividades agropecuárias, em que atualmente o uso predominante do solo é de pastagens em estado variado de

degradação (Burla et al., 2012). Com esta mudança no uso do solo de floresta para pastagem ocorrem modificações no solo, como elevação de temperatura, redução da umidade e aumento das emissões de CO₂ (Carmo et al., 2012).

2.2 Uso do solo e sequestro de C

O aquecimento global, o aumento da temperatura do ar próximo à superfície da Terra e dos oceanos nas últimas décadas é considerado ser causado, principalmente pelo aumento da concentração atmosférica dos chamados gases de efeito estufa (GEE), sendo o dióxido de carbono (CO₂) um dos principais (Nair et al., 2009b; Jose e Bardhan, 2012). No Brasil estima-se que 75% das emissões de CO₂, 94% das emissões de N₂O e 91% das emissões de CH₄ sejam provenientes da agricultura (Bayer et al., 2011). No entanto, algumas medidas têm sido tomadas, com o objetivo de reduzir as emissões dos GEE, assim como, otimizar o armazenamento de C. Neste sentido, alguns tipos de usos da terra, têm sido reconhecidos como aliados na mitigação dos GEE.

Segundo Lal (2007), o uso perene do solo, que causa menor distúrbio e adiciona maiores montantes de biomassa, aumenta mais o estoque de C do que cultivos sazonais. Ainda segundo o mesmo autor, ecossistemas com maior produtividade primária líquida, contínua cobertura do solo e menor revolvimento do solo têm maiores reservatórios de C. Assim, as florestas são consideradas aliadas ao sequestro de C, pois um dos efeitos positivos das árvores sobre o solo é o aumento e a manutenção da matéria orgânica (Young, 1997), pela deposição contínua de serapilheira, raízes finas e pelos radiculares (Gama-Rodrigues et al., 2011).

Da mesma forma, as pastagens também têm o potencial para elevar o estoque de C no solo (Costa et al., 2009; Araújo et al., 2011). Entretanto, quando se trata de pastagens degradadas a realidade é outra, pois reduzem os níveis de carbono orgânico do solo (COS) (Carvalho et al., 2010). No primeiro momento, o conteúdo de COS nas pastagens aumenta, mas com o manejo inadequado este tende a reduzir em longo prazo (Braz et al., 2013).

2.3 Serapilheira

A serapilheira é composta por material vegetal da parte aérea das plantas como folhas, frutos, sementes, flores, galhos e cascas, sendo que a fração folha representa a maior parte (Espig et al., 2009). O acúmulo de material orgânico varia de acordo com origem, espécie, cobertura florestal, estágio sucessional, idade, época de coleta, tipo de floresta, local, condições edafoclimáticas e regime hídrico (Caldeira et al., 2008; Gomes et al., 2010).

O acúmulo da serapilheira sobre o solo é controlado pela quantidade de material que cai na superfície e por sua taxa de decomposição (Correia e Andrade, 2008). O processo de decomposição é regulado por três fatores: a comunidade decompositora (os macro e microrganismos); as características do material aportado, que determinam sua degradabilidade (a qualidade do material) e as condições físico-químicas do ambiente (Swift et al., 1979). Resíduos orgânicos com elevados teores de lignina, polifenóis e celulose têm baixa taxa de decomposição, assim com menor liberação de nutrientes (Swift et al., 1979).

Assim, a qualidade da serapilheira influencia diretamente a biomassa e a atividade microbiana da serapilheira e do solo (Barreto et al., 2008; Ndaw et al., 2009). Gama-Rodrigues et al. (2008) verificaram no seu estudo que a biomassa microbiana da serapilheira apresentou uma reserva de C e N maior do que a biomassa do solo na profundidade de 0-10 cm, representando um importante compartimento destes nutrientes.

2.4 Microrganismos do solo

Os organismos do solo vivem dentro ou entre agregados do solo de acordo com seu hábito alimentar, tamanho e acesso aos recursos (Briar et al., 2011). Os agregados apresentam micro-habitats para os microrganismos, onde estes encontram nutrientes e ficam protegidos contra a predação e dessecação (Mendes et al., 2003). Estes microrganismos contribuem com uma ampla gama de serviços essenciais para a sustentabilidade de todos os ecossistemas: como agentes na ciclagem de nutrientes, reguladores da dinâmica da matéria orgânica e sequestro de C no solo, modificando a estrutura física do solo e o regime de água e aumentando a eficiência de aquisição de nutrientes pela vegetação (Singh

et al., 2011).

A biomassa microbiana do solo constitui a maior parte da fração ativa da matéria orgânica do solo (Gama-Rodrigues e Gama-Rodrigues, 2008), representa em média de 2 a 5% do C orgânico do solo, sendo composta por bactérias, actinomicetos, fungos, protozoários, algas e microfauna, e excluindo raízes de plantas e animais maiores do que $5.10^3 \mu\text{m}^3$ (Jenkinson e Ladd, 1981). Proporcionalmente é a menor parte do C orgânico do solo e compõem uma fração significativa e potencialmente mineralizável do N disponível aos vegetais (Gama-Rodrigues et al., 2005). Esta é responsável pela mineralização dos resíduos orgânicos no solo, utilizando estes como fontes de nutrientes e energia para seu desenvolvimento, assim como para síntese de substâncias orgânicas (Gama-Rodrigues e Gama-Rodrigues, 2008).

O carbono da biomassa microbiana (CBM) é um dos mais importantes indicadores da qualidade do solo, uma vez que responde prontamente a mudanças ambientais (Kaschuk et al., 2010). Apresenta intensa ciclagem e resposta a flutuações sazonais de umidade e temperatura, ao cultivo e ao manejo de resíduos (Gama-Rodrigues et al., 2005).

Os processos de sequestro de C são regulados primeiramente pela biota do solo (Zhang et al., 2013), pois a biomassa microbiana pode ser considerada como um indicador primário do sequestro do C no solo (Sundermeier et al., 2011; Zhang et al., 2013). Como concluído no estudo de Zhang et al., (2013), alguns grupos da microbiota do solo, tais como fungos micorrízicos arbusculares, bactérias gram-positivas e nematoides parasitas de plantas podem conservar mais o carbono na biomassa microbiana, aumentando o estoque de carbono no solo. Também foi observado que, em todos os sistemas de cultivo avaliados, neste mesmo estudo, a diversidade e a abundância de nematoides dos quatro grupos tróficos (bacteriófagos, micófagos, onívoros-predadores e fitoparasitas) reduzem com a diminuição do tamanho do agregado.

Zhang et al. (2013) também verificaram aumento da biomassa microbiana em agregados < 1 mm e de biomassa de fungos micorrízicos arbusculares em agregados > 1 mm. Foi possível notar que a diversidade microbiana aumentou com a redução do tamanho dos agregados e a relação fungo/bactéria foi mais alta em grandes macroagregados do que nas outras classes. O estudo de Hurisso et al. (2013) também apresentou resultado semelhante na relação fungo/bactéria em

que grandes e pequenos macroagregados tiveram maior relação do que os microagregados. Segundo Jastrow e Miller (1998), conforme aumenta o tamanho dos macroagregados, reduz a importância dos polissacarídeos na estabilidade dos agregados e aumenta a importância de raízes finas e hifas de fungos.

Zhang et al. (2013) observaram que o impacto das comunidades do solo para o sequestro de C em agregados > 1 mm era diferente daqueles para agregados < 1 mm, em resposta aos diferentes sistemas de manejo. Nos agregados > 1 mm, bactéria e fungos contribuem para o sequestro de C, enquanto que em agregados < 1 mm, somente as bactérias têm contribuição relevante. No estudo de Hurisso et al. (2013) foi verificada correlação positiva de carbono da biomassa microbiana (CBM) ($r=0,81$, $p=0,002$) e nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) ($r=0,78$, $p=0,003$) com grandes macroagregados (> 2 mm). No entanto, os microagregados (< 0,250 mm) correlacionaram-se negativamente com CBM ($r=-0,78$, $p=0,003$) e NBM ($r=-0,84$, $p=0,001$). Estes resultados evidenciam que a biomassa microbiana desempenha papel relevante na formação de grandes macroagregados.

A interação de fragmentos vegetais e colônias bacterianas formam macroagregados, através da relação de polissacarídeos extracelulares formados, microagregados e partículas simples. Todavia, com a diminuição da disponibilidade de C orgânico para a atividade microbiana, ocorre a redução das colônias bacterianas e assim esses macroagregados rompem-se em microagregados (Golchin et al., 1998). Portanto, o aporte contínuo de resíduos vegetais tem grande importância para biota e macroagregação, assim como para o sequestro de C no solo.

2.5 Estoque de C e agregados do solo

O solo possui papel fundamental no ciclo global do carbono, pois, funciona como um reservatório com cerca de duas vezes a quantidade de carbono da atmosfera e da biomassa vegetal (Swift, 2001). O C pode ser sequestrado no solo diretamente, através da conversão de CO_2 em compostos inorgânicos de C do solo, como carbonatos de cálcio e de magnésio, e também pode ser sequestrado indiretamente, com a fixação do CO_2 na biomassa vegetal através da fotossíntese, em que parte desta é indiretamente sequestrada como

carbono orgânico do solo durante os processos de decomposição (Nair et al., 2009a).

No estudo de Bernoux et al. (2001), foi estimado o estoque de C nos solos brasileiros sob vegetação nativa, com base em um mapa de diferentes associações de solo-vegetação, combinados com uma base de dados de perfil de solo, onde estimaram que os solos brasileiros apresentaram $36,378 \pm 3,414$ Pg de C entre 0 e 30 cm. A quantidade de C no solo é dependente de um equilíbrio entre o aporte de serapilheira, rizodeposição e a liberação de C devido à decomposição e mineralização (Jose e Bardhan, 2012).

Quanto maior o aporte de material vegetal, maior é o estoque de matéria orgânica (Salton et al., 2011), o que contribui para a estabilização dos agregados do solo (Vezzani e Mielniczuk, 2011). Os agregados consistem da união das partículas de areia, silte e argila, que formam agregados de diferentes tamanhos (Tisdall, 1994), sendo considerado microagregado $<0,250$ mm e macroagregado $>0,250$ mm (Edwards e Bremner, 1967). Tisdall e Oades (1982) evidenciaram que a matéria orgânica influencia a formação e estabilização dos agregados pelas ligações de polímeros orgânicos com a superfície inorgânica por meio de cátions polivalentes. Segundo Wohlenberg et al. (2004), a ação da matéria orgânica sobre a agregação é um processo dinâmico, assim é necessário o aporte contínuo de material orgânico ao solo.

A formação e a estabilização dos agregados ocorrem pela interação de processos físicos, químicos e biológicos, que atuam com mecanismos próprios, através dos agentes da agregação envolvidos (Six et al., 2004). Segundo a teoria de formação dos agregados de Six et al., (2000), no início os macroagregados (0,250-2,00 mm) são formados no entorno de resíduos vegetais frescos, que se transforma em C orgânico particulado (COP) grosseiro intra-agregados. Os resíduos frescos estimulam a formação de macroagregados, pois é fonte de C para atividade microbiana e produção de agentes cimentantes (Six et al., 1999). O COP fino é formado com a decomposição do COP grosseiro, assim espera-se que a concentração de COP fino nos macroagregados aumente com o tempo de residência no solo. Com a formação de COP fino, partículas de argila e produtos microbianos vão aderindo à sua superfície, formando os microagregados oclusos em macroagregados (Six et al., 1999). Eventualmente, os agentes cimentantes nos macroagregados são degradados resultando em perda de estabilidade e

liberação de microagregados, que serão unidades estruturais do próximo ciclo de formação de macroagregados (Tisdall e Oades, 1982).

Este modelo de formação de agregados do Six et al. (2000) também mostra que o aumento da quebra de macroagregados provocado pelo preparo do solo reduz a formação de novos microagregados sob plantio convencional em comparação com o plantio direto, que é verificado pelo menor acúmulo de C ocluso em microagregados sob plantio convencional do que em plantio direto (Six et al. 1999). O C particulado ocluso não está totalmente protegido da decomposição microbiana, no entanto, há uma elevada redução na taxa de decomposição (Baldock e Skjemstad, 2000; Zinn et al., 2007). Com isso, usos do solo que apresentam aportes consideráveis de matéria orgânica e o não revolvimento do mesmo são aliados ao sequestro de C, tanto pelo aporte de C quanto pela formação de agregados estáveis que elevam a proteção do C no solo.

2.6 Modelagem de equações estruturais (MEE)

O uso de ferramentas de análise multivariada tem crescido bastante nas diversas áreas de conhecimento, por permitir avaliar múltiplos atributos ao mesmo tempo (Baretta et al., 2011). Desta forma, todos os métodos estatísticos que simultaneamente analisam mais do que duas variáveis, podem ser considerados multivariados (Hair et al., 2009; Moço, 2010).

A ferramenta multivariada de modelagem de equações estruturais (MEE) pode ser vista como a combinação única de técnicas de análise multivariada de dependência e independência, pois tem por base a combinação de análise fatorial e regressão múltipla para testar e estimar relações causais (Hair et al., 2009). Segundo os mesmos autores, a MEE analisa a estrutura de inter-relações em uma série de equações, similar a uma série de equações de regressão múltipla. Contudo, alguns usuários desta ferramenta acabam se afastando, pela limitação de requerer grandes bancos de dados, segundo Iacobucci et al. (2010) é necessário um banco de dados com pelo menos 50 observações.

O uso da MEE vem crescendo nos últimos anos nas áreas de ecologia e solos, no entanto, a maior parte se limita em avaliações de efeitos diretos e indiretos de variáveis mensuradas (Allison et al., 2007; Cherry et al., 2009),

distinguindo da análise de trilha pela inclusão das variáveis de erro de medição e pela possibilidade de existir mais de uma variável dependente no modelo (Sales, 2015). Entretanto, outros trabalhos vêm utilizando a MEE incluindo variáveis latentes ou construtos (Barto et al., 2010; Gama-Rodrigues et al., 2014; Sales, 2015; Oliveira, 2016; Viana 2016).

Segundo Gama-Rodrigues et al. (2014), uma característica essencial da MEE é a capacidade de incluir variáveis latentes (não medidas) em conjunto com as variáveis mensuráveis em modelos hipotéticos. Tais variáveis latentes são os construtos, representados por múltiplas variáveis (como variáveis representando um fator em análise fatorial) (Hair et al., 2009). Segundo Sales et al. (2015), as variáveis latentes são variáveis conceituais que formam e explicam, através de uma forte base teórica, um conjunto de variáveis observadas e são incorporadas nos modelos para torná-los mais consistentes teoricamente, reduzindo erros de mensuração.

Um modelo convencional de MEE consiste em dois modelos, o de mensuração, representando como variáveis medidas se unem para representar construtos e o modelo estrutural, que mostra como os construtos são associados entre si (Hair et al., 2009). Nas relações entre os construtos, existem os construtos exógenos, que não recebem relação causal de nenhuma outra variável do modelo, exceto quando é covariação que só ocorrem entre estas variáveis e os construtos endógenos, que são previstos por construtos exógenos (Iacobucci, 2009; Sales, 2015).

A MEE fornece tanto uma quantificação dos relacionamentos quanto uma avaliação da estrutura do modelo, indicando, por exemplo, se existem caminhos em falta ou se alguns caminhos não são necessários para explicar o modelo (Cherry et al., 2009). O modelo avaliado apresenta um ajuste satisfatório com base no valor de χ^2 e o valor de p associado ao mesmo, um modelo adequado é indicado por um valor de $p \geq 0,05$, porque o objetivo da MEE é avaliar o quanto o modelo está teoricamente especificado (Cherry et al., 2009), entretanto, segundo Schermelleh-Engel et al. (2003), com valores de p entre 0,01 e 0,05 pode-se dizer que o ajuste é aceitável.

Em resumo, a MEE estima uma série de equações múltiplas separadas, mas interdependentes, simultaneamente, pela especificação do modelo estrutural usado no programa estatístico (Hair et al., 2009). Para Grace (2006) a MEE pode

ser definida em termos simples como o uso de duas ou mais equações estruturais para modelar relações multivariadas, que são aquelas que envolvem influências e respostas simultâneas.

3. TRABALHOS

3.1 CONVERSÃO DE FLORESTA EM PASTAGEM NO BIOMA MATA ATLÂNTICA: INTER-RELAÇÕES ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS E MICROBIANOS EM AGREGADOS DO SOLO

RESUMO

A conversão de floresta em pastagem provoca alterações em atributos do solo, que através de uma rede complexa de relações podem conduzir a redução no conteúdo de carbono orgânico do solo (COS). Este estudo tem como objetivo analisar, com o auxílio da modelagem de equações estruturais (MEE), o efeito da conversão de floresta em pastagem sobre os atributos químicos e microbiológicos do solo e, verificar as relações entre tais atributos, buscando entender como estas relações influenciam o C acumulado nos macro (>0,250 mm) e nos microagregados (<0,250 mm) do solo. O estudo foi realizado a partir de um banco de dados proveniente da dissertação de Alves (2004) de avaliações de atributos químicos e microbiológicos realizadas em sete classes de agregados de solos sob duas florestas secundárias e duas pastagens adjacentes às mesmas. Foram testados modelos hipotéticos de inter-relações através da MEE com um banco de dados de informações advindas de macroagregados e outro dos microagregados

do solo. A partir da MEE foram modificados e/ou retirados alguns caminhos do modelo e também retiradas algumas variáveis para conseguir ajuste satisfatório dos modelos de inter-relações. Com os modelos ajustados foi verificado que a conversão de floresta em pastagem promoveu redução no conteúdo de C tanto nos macro quanto nos microagregados do solo. No modelo de macroagregados a biomassa microbiana e a atividade microbiana contribuíram diretamente para o C acumulado nos macroagregados, enquanto nos microagregados apenas a biomassa microbiana controlou de forma positiva o C dos microagregados. Conclui-se que com a conversão de floresta para pastagem ocorre redução do C tanto nos macro quanto nos microagregados do solo, sendo que os caminhos que levam a esta redução diferem com o tamanho dos agregados.

Palavras-chave: Modelagem de equações estruturais, Biomassa microbiana, Atividade microbiana, Carbono orgânico do solo.

ABSTRACT

Conversion of forest to pasture causes changes in soil attributes, which through a complex network of relationships can lead to a reduction in soil organic carbon (SOC) content. The aim of this study was to analyze the effect of forest conversion on pasture on the chemical and microbiological attributes of the soil with the help of structural equations modeling (SEM) and to verify the relationships between these attributes, trying to understand how these relations influence C accumulated in the macro (>0.250 mm) and in the microaggregates (<0.250 mm) of the soil. The study was carried out from a database from the Master's Thesis Alves (2004) of assessments of chemical and microbiological attributes performed in seven classes of soil aggregates under two secondary forests and two pastures adjacent to them. Hypothetical models of interrelations were tested through the SEM with a database of information from macroaggregates and another from soil microaggregates. From SEM paths were modified and / or removed, and some variables were also removed to obtain a satisfactory adjust of the interrelationship models. With the adjusted models it was verified that the conversion of forest to

pasture promoted a reduction in C content in both the macro and the microaggregates of the soil. In the model of macroaggregates the microbial biomass and the microbial activity contributed directly to the C of the macroaggregates, whereas in the microaggregates only the microbial biomass positively controlled the C of the microaggregates. It is concluded that with the conversion of forest to pasture there is a reduction of C in both the macro and microaggregates of the soil, and the paths that lead to this reduction differ with the size of the aggregates.

Keywords: Structural equations modeling; Microbial biomass; Microbial activity; Soil organic carbon.

INTRODUÇÃO

A cobertura vegetal da Mata Atlântica foi reduzida drasticamente, ocupando 12,4% da área original (Fundação SOS Mata Atlântica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2016). No Rio de Janeiro, as regiões Norte e Noroeste são as que possuem os menores percentuais de remanescentes florestais (Gomes et al., 2009), em decorrência do longo período de atividades agropecuárias, em que o uso predominante do solo é de pastagens em estado variado de degradação (Burla et al., 2012). Com a conversão de floresta em pastagem ocorrem modificações no solo, como elevação de temperatura, redução da umidade e aumento das emissões de CO₂ (Carmo et al., 2012).

As perdas de C para atmosfera podem ocorrer tanto com a queima ou decomposição da biomassa vegetal, como também pelo uso do solo com uma cobertura que não proporciona o acúmulo de C, como as pastagens degradadas, que reduzem os níveis de carbono orgânico do solo (COS) (Carvalho et al., 2010). No primeiro momento, o conteúdo de COS nas pastagens aumenta, mas com o manejo inapropriado este tende a reduzir em longo prazo (Braz et al., 2013).

Os níveis de COS são regulados primeiramente pela biota edáfica e dependem do equilíbrio entre as entradas da matéria orgânica do solo (MOS), principalmente através de resíduos de plantas, raízes e exsudatos de raiz, e as

perdas de MOS pela erosão, lixiviação e decomposição (Six et al., 2006; Zhang et al., 2013). Nesta última, parte dos resíduos orgânicos é transformada no solo pela microbiota, que retorna a atmosfera na forma de CO₂ pela respiração microbiana e outra parte é transformada biologicamente em matéria orgânica estável (Six et al., 2006). A eficiência no uso do substrato orgânico e a conversão destes resíduos em COS podem ser aumentadas através da elevação da disponibilidade de nutrientes para a microbiota (Manzoni et al., 2012; Zhang et al., 2015) enquanto, por outro lado, em solos com baixa disponibilidade de nutrientes podem levar a perda de COS.

A estabilização do C no solo ocorre através de três principais mecanismos: recalcitrância bioquímica, estabilização química e proteção física (Jastrow e Miller, 1998). A recalcitrância bioquímica está relacionada à composição do resíduo orgânico, sendo intrínseca do mesmo. A estabilização química se destaca em solos oxídicos, pela interação da fração mineral com a fração orgânica (organomineral) (Six et al., 2004). A proteção física é conferida através da estruturação das partículas individuais do solo, que formam os agregados, esta exerce controle significativo sobre os processos de decomposição biológica, limitando os micro-organismos decompositores de acessar o C orgânico no interior dos agregados (Baldock e Nelson, 2000).

Assim, o COS pode estar localizado entre ou dentro dos agregados, neste último o COS encontra-se em maior proteção contra perdas, constituindo assim, um importante compartimento de reserva de COS (Six et al., 2000; Baldock e Nelson, 2000). Neste compartimento de COS, há uma elevada redução na taxa de decomposição (Baldock e Skjemstad, 2000; Zinn et al., 2007). Os agregados também apresentam micro-habitats para os microrganismos, onde estes encontram nutrientes e ficam protegidos contra a predação e dessecação (Gupta e Germida, 1988; Mendes et al., 2003). A distribuição destes microrganismos varia entre os diferentes tamanhos de agregados, que podem levar a diferenças na dinâmica do COS (Gupta e Germida, 1988; Zhang et al., 2013; Linlin et al., 2016).

A decomposição do C no interior dos agregados pode ser estimulada através da quebra dos macroagregados, por exemplo, através do cultivo do solo que eleva a perda de C para atmosfera e reduz a formação dos microagregados dentro dos macroagregados (Six et al., 2000). Além disso, a biomassa microbiana

dos macroagregados é a mais afetada neste processo (Gupta e Germida, 1988), o que causa impacto ainda maior sobre a estabilização dos agregados, uma vez que, esta desenvolve um importante papel neste processo, pois produzem metabólicos que são agentes cimentantes (Tisdall e Oades, 1982; Gupta e Germida, 1988).

Como pode ser observado armazenamento e estabilização do C no solo em longo prazo é resultante de uma rede complexa de inter-relações, entre o teor de nutriente (O'Brien et al., 2015), microrganismos (Zhang et al., 2013), microclima, teor e tipo de argila, distribuição dos diferentes tamanhos de poros, pela dinâmica de agregação e tipo de manejo agrícola (Six et al., 2002; Six et al., 2006).

Estas inter-relações podem ser observadas através da construção de modelos hipotéticos. Estes modelos são elaborados e validados através da modelagem de equações estruturais (MEE), que é um método avançado e robusto da estatística multivariada (Zhang et al., 2013), que permite testar hipóteses complexas de redes de relações de caminhos (Grace et al., 2007). Por meio de um diagrama de caminhos, a MEE permite visualizar as inter-relações entre variáveis mensuradas e variáveis latentes ou construtos (não mensuradas). Segundo Sales et al. (2015), estas últimas são variáveis conceituais que formam e explicam, através de uma forte base teórica, um conjunto de variáveis observadas e são incorporadas nos modelos para torná-los mais consistentes teoricamente, reduzindo erros de mensuração.

A MEE fornece tanto uma quantificação dos relacionamentos quanto uma avaliação da estrutura do modelo, indicando, por exemplo, se existem caminhos em falta ou se alguns caminhos não são necessários para explicar o modelo (Cherry et al., 2009). Com isso, a MEE pode auxiliar na confirmação de modelos teóricos de acúmulo de C em agregados e melhorar o entendimento das inter-relações que controlam tal processo.

Contudo, existem poucos estudos na área de solos utilizando a MEE. Desta forma, este estudo tem como objetivo analisar, com o auxílio da MEE, o efeito da conversão de floresta em pastagem sobre os atributos químicos e microbiológicos do solo e, verificar as relações entre tais atributos, buscando entender como estas relações influenciam o C acumulado nos macro (>0,250 mm) e nos microagregados (<0,250 mm) do solo. As hipóteses testadas, foram:

(1) a conversão de floresta em pastagem afeta negativamente os atributos químicos e a biomassa microbiana, e positivamente a atividade microbiana, reduzindo o C dos macro e dos microagregados do solo; (2) as inter-relações entre os atributos químicos, a biomassa microbiana e a atividade microbiana do solo e as suas contribuições para o acúmulo de C variam entre as classes de agregados.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área

O presente trabalho foi desenvolvido a partir de dados obtidos da dissertação de Alves (2004), realizado em dois sítios: cada um deles formado por uma floresta secundária e uma pastagem adjacente, em condições similares de clima, solo e relevo, no Município de Santa Maria Madalena, RJ (21° 37'S e 42° 05'W). De acordo com a classificação de Köppen, o clima de Santa Maria Madalena é do tipo Cwa, e a precipitação média anual é de 1440 mm (Cunha, 2002).

As florestas foram classificadas como Floresta Ombrófila Densa Montana, caracterizada por apresentar estrato dominante com altura em torno de 25 m (Brasil, 1983). Os sítios estão localizados na vertente atlântica, sendo um situado no entorno do Parque Estadual do Desengano (PED), e o outro a 7 km do PED.

Um dos sítios está situado a aproximadamente 850 m e o outro a 600 m de altitude. A floresta situada a 850 m de altitude representa uma floresta secundária regenerada principalmente por jacatirão (*Miconia cinnamomifolia*) e quaresmeira (*Tibouchina mutabilis*) há aproximadamente 40 anos, após o cultivo de café. A floresta situada a 600 m de altitude é um fragmento de Mata Atlântica de aproximadamente 10 ha, que teve as principais árvores de grande porte retiradas. As pastagens, de ambos os sítios, foram áreas de florestas convertidas, formadas por *Brachiaria decumbens*, e presença de outras gramíneas, não manejadas tecnicamente, apresentando falhas na cobertura vegetal do solo. A capacidade de suporte destas pastagens é relativamente baixa, sendo frequentemente observados sinais de erosão laminar. Os solos dos sítios a 850 m

foram classificados como Argissolo Vermelho-Amarelo e os situados a 600 m como Cambissolo Háptico (Embrapa, 2013).

Banco de dados

Os dados utilizados no presente trabalho são provenientes de análises realizadas em sete classes de agregados de solos coletados na profundidade de 0-10 cm. As amostras de solo foram inicialmente passadas por peneira de malha de 8,00 mm de diâmetro e, posteriormente, foi realizado o tamisamento a seco, em que se obtiveram as seguintes classes de agregados: 8,00-4,00 mm; 4,00-2,00 mm; 2,00-1,00 mm; 1,00-0,50 mm; 0,50-0,25 mm; 0,25-0,15 mm e <0,15 mm. As variáveis utilizadas de cada uma das classes de agregados foram: carbono da biomassa microbiana (CBM); nitrogênio da biomassa microbiana (NBM); respiração basal acumulada (RAS); quociente metabólico do solo (qCO_2); fósforo do solo (P); alumínio do solo (Al); pH, em água; carbono orgânico do solo (COS); nitrogênio total do solo (N); e soma de bases do solo (SB) (Alves, 2004).

Análise estatística

Para testar os modelos hipotéticos de inter-relações entre as variáveis, que assumem ser diferentes em função do tamanho dos agregados, foram utilizados dois bancos de dados, sendo um constituído por informações provenientes dos macroagregados (diâmetro $>0,250$ mm - cinco classes, com $N=60$) e outro dos microagregados (diâmetro $<0,25$ mm - duas classes, com $N=24$).

Para cada banco de dados os subconjuntos referentes às florestas e às pastagens foram submetidos à análise de normalidade univariada e multivariada através do programa AMOS versão 21 (IBM – SPSS Inc., Chicago, IL, USA), e análise estatística descritiva (média, desvio padrão, valor máximo e mínimo) (Microsoft Excel, 2010). Também foram realizadas análises de correlação de Pearson, entre as variáveis que compunham cada banco de dados, através do programa R 3.3.2 (R Core Team, 2016) e o pacote Hmisc (Frank e Harrell, 2013). Estas correlações foram utilizadas para auxiliar no entendimento da estrutura das relações estabelecidas nos modelos entre as variáveis e para verificação de colinearidade entre as variáveis independentes, identificadas quando são altamente correlacionadas, com valores $\geq 0,90$ (Hair et al., 2009).

A MEE foi utilizada para verificar se as relações entre a mudança no uso do solo (conversão de floresta à pastagem), atributos químicos, biomassa microbiana e atividade microbiana exercem influência sobre o C dos macro e dos microagregados do solo. Iniciou-se a modelagem especificando o modelo hipotético (Figura 1), representando as relações de interesse na análise. No modelo foram utilizados quatro construtos, isto é, variáveis que não podem ser mensuradas diretamente, mas podem ser mensuradas indiretamente através de variáveis indicadoras. Os quatro construtos são: Química do solo – representando o nível de fertilidade, teor de Al e acidez dos agregados do solo; Biomassa microbiana – imobilização de C e N pelos microrganismos nos agregados do solo; Atividade microbiana – mineralização de C pelos microrganismos; C dos agregados – reserva de carbono orgânico nos macroagregados e microagregados do solo. Também foi utilizada no modelo uma variável observada categórica, chamada de Uso do solo, que representa a conversão de floresta em pastagem. Neste modelo foram avaliados os efeitos diretos e indiretos da variável Uso do solo e suas inter-relações com os construtos Química do solo, Biomassa microbiana e Atividade microbiana sobre o C dos macro e dos microagregados do solo.

Para a execução da MEE foi necessário a fixação de alguns parâmetros com o objetivo de tornar um modelo não-identificado em um modelo identificado, assim tornando possível estimar os parâmetros livres (Grace, 2006). Para fixação foram utilizados critérios sugeridos por Sales et al. (2015), fixando variáveis de erro e de cargas fatoriais nos modelos hipotéticos. Em ambos os modelos a variância de erro da variável observada COS foi fixada como 0, assumindo que não ocorreram erros de medição, assim sua carga fatorial foi fixada com o valor 1. As variâncias de erro dos construtos Biomassa microbiana, Química do solo e Atividade microbiana do solo foram fixadas com o valor de 0,1. As variáveis de erros aleatórios associadas às variáveis observadas NBM e RAS para o modelo de macroagregados e qCO_2 para microagregados também tiveram seus valores fixados com o valor de 0,1, pois em uma análise prévia estavam resultando em valores negativos, o que não deve ocorrer.

Para estimação dos parâmetros dos modelos foi utilizado o método de mínimos quadrados generalizados e o ajuste geral do modelo foi avaliado com base no valor de qui-quadrado (X^2), nível de probabilidade (p) e grau de liberdade

(*df*). Com o teste de χ^2 e um valor de $p > 0,05$ tem-se um modelo hipotético com ajuste satisfatório, no entanto, segundo Schermelleh-Engel et al. (2003), com valores de p entre 0,01 e 0,05 pode-se dizer que o ajuste é aceitável, pois o objetivo da MEE é avaliar se os modelos estão teoricamente especificados, ou seja, a hipótese de nulidade deve ser aceita. Como o χ^2 é influenciado pelo tamanho amostral, também foram utilizados outros índices para a avaliação do ajuste do modelo, que são índice de qualidade de ajuste (GFI), índice de ajuste comparativo (CFI), índice de raiz do erro quadrático médio de aproximação (RMSEA) e a razão χ^2/df . Valores do GFI $\geq 0,95$, CFI $\geq 0,90$ e RMSEA $\leq 0,10$ (Hair et al., 2009) e a razão $\chi^2/df < 3$ (Iacobucci, 2010) sugerem um ajuste apropriado para o modelo. Os modelos foram analisados através do programa AMOS versão 21 (IBM – SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

Como o modelo de macroagregados não apresentou ajuste satisfatório foi realizada transformação nas variáveis que não apresentaram normalidade (NBM, P e pH), utilizando a função $\log(x+1)$. Foi utilizado o critério de informação de Akyke (AIC), que compara modelos distintos para verificação se houve melhoria do ajuste do modelo, onde quanto menor o AIC mais bem ajustado é o modelo.

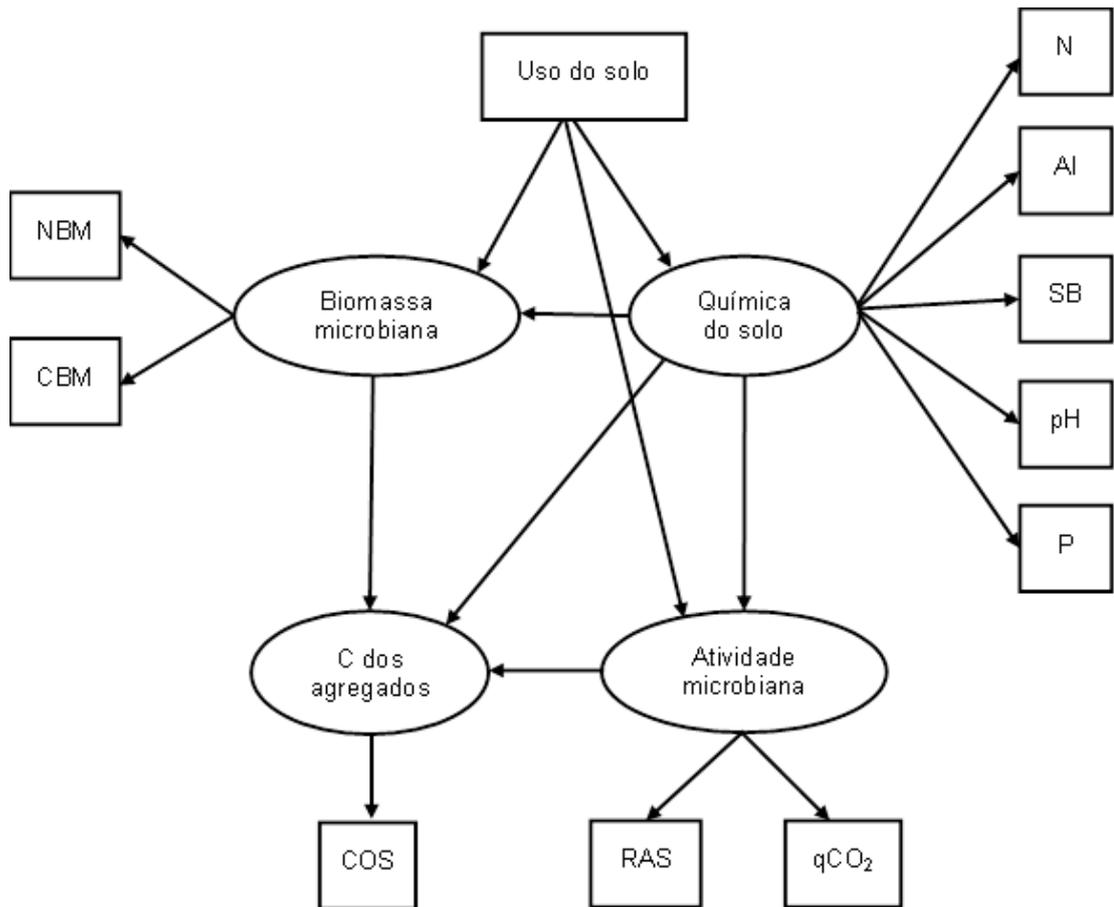


Figura 1. Modelo hipotético para o C dos agregados (COS: carbono orgânico do solo) em macroagregados (>0,250 mm) e microagregados (<0,250 mm) do solo através dos efeitos diretos e indiretos dos construtos Química do solo (N: nitrogênio; Al: alumínio; SB: soma de bases; pH; P: fósforo), Biomassa microbiana (CBM: carbono da biomassa microbiana; NBM: nitrogênio da biomassa microbiana), Atividade microbiana (RAS: respiração basal acumulada; qCO₂: quociente metabólico) e da variável observada Uso do solo.

RESULTADOS

Em geral, os agregados dos solos das florestas e das pastagens apresentaram pH ácido, alto teor de alumínio e nível de fertilidade baixo. Os atributos microbianos apresentaram uma ampla variação, sem tendência definida, entre as classes de agregados (Tabela 1).

Tabela 1. Estatística descritiva dos dados utilizados nos modelos de macroagregados e microagregados do solo sob floresta e pastagem.

Variáveis	Pastagem				Floresta			
	Macroagregados (N=30)				Macroagregados (N=30)			
	Mín.	Média	Máx	δ	Mín.	Média	Máx.	δ
pH	3,87	4,48	5,28	0,47	4,00	4,41	4,68	0,21
P (mg dm ⁻³)	2,88	4,54	13,26	2,21	2,30	3,40	5,24	0,80
AI (cmolc dm ⁻³)	0,30	1,14	2,30	0,60	1,00	1,93	3,30	0,63
SB (cmolc dm ⁻³)	0,19	1,40	2,91	1,02	0,43	0,69	1,03	0,21
COS (g kg ⁻¹)	2,92	3,82	4,37	0,38	3,53	5,09	6,46	1,00
N (g kg ⁻¹)	0,11	0,25	0,36	0,06	0,15	0,33	0,56	0,10
CBM (µg g ⁻¹)	108,92	344,01	566,00	135,19	346,50	585,61	752,25	113,10
NBM (µg g ⁻¹)	23,65	182,18	356,25	107,13	19,35	132,68	211,49	56,06
RAS (µg g ⁻¹)	5,56	112,75	269,46	86,96	17,86	79,79	130,91	26,19
qCO₂ (µg Kg ⁻¹ dia ⁻¹)	90,25	1923,65	5126,51	1347,84	149,42	842,50	1590,16	326,41
	Microagregados (N=12)				Microagregados (N=12)			
pH	3,99	4,56	5,16	0,57	4,13	4,29	4,46	0,13
P (mg dm ⁻³)	2,54	3,25	5,04	0,78	2,22	3,18	4,00	0,66
AI (cmolc dm ⁻³)	0,70	1,42	2,20	0,60	1,30	2,20	2,90	0,48
SB (cmolc dm ⁻³)	0,45	1,43	2,46	0,98	0,58	1,02	1,47	0,31
COS (g kg ⁻¹)	2,45	3,12	3,87	0,43	3,21	4,16	4,78	0,62
N (g kg ⁻¹)	0,24	0,32	0,45	0,07	0,28	0,48	0,67	0,13
CBM (µg g ⁻¹)	228,85	391,07	556,12	119,70	105,21	381,66	594,91	160,16
NBM (µg g ⁻¹)	100,38	127,29	199,38	28,95	22,33	120,15	218,34	80,32
RAS (µg g ⁻¹)	8,46	116,33	250,10	92,41	16,93	108,11	156,99	34,09
qCO₂ (µg Kg ⁻¹ dia ⁻¹)	220,17	1563,11	3190,85	1030,24	186,74	2366,68	6922,61	1959,43

δ – desvio padrão; Min. e Max. (valores mínimos e máximos, respectivamente). Fonte: Alves (2004).

A análise de correlação mostrou que o pH, P e SB apresentaram correlações significativas e positivas e o AI negativa com as variáveis relacionadas à atividade microbiana (RAS e qCO₂) e o NBM nos macroagregados (Tabela 2). Nos microagregados observa-se o mesmo resultado para as variáveis relacionadas à atividade microbiana, com exceção do pH que não apresentou correlação significativa com o qCO₂ (Tabela 3). Os teores de COS e N apresentaram correlação positiva com o CBM tanto nos macroagregados (Tabela 2) quanto nos microagregados (Tabela 3).

Tabela 2. Coeficiente de correlação de Pearson com os dados de macroagregados sob florestas e pastagens. (N=60).

	pH	P	AI	SB	COS	N	CBM	NBM	RAS
P	0,37**								
AI	-0,66***	-0,31*							
SB	0,68***	0,64***	-0,52***						
COS	-0,06	-0,25	0,41**	-0,12					
N	-0,06	-0,14	0,45***	-0,04	0,67***				
CBM	0,29*	0,03	0,17	0,06	0,57***	0,38**			
NBM	0,57***	0,53***	-0,38**	0,85***	0,25	0,15	0,23		
RAS	0,68***	0,44***	-0,50***	0,79***	0,07	0,12	0,11	0,69***	
qCO ₂	0,48***	0,30*	-0,55***	0,56***	-0,20	-0,09	-0,37**	0,38**	0,80***

*, ** e *** significativos com $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$, respectivamente.

Tabela 3. Coeficiente de correlação de Pearson com os dados de microagregados sob florestas e pastagens. (N=24).

	pH	P	AI	SB	COS	N	CBM	NBM	RAS
P	-0,57**								
AI	-0,81***	0,57**							
SB	0,99***	-0,62**	-0,81***						
COS	-0,08	0,08	0,52**	-0,10					
N	-0,07	0,10	0,51*	-0,06	0,82***				
CBM	0,44*	-0,05	-0,02	0,36	0,45*	0,45*			
NBM	-0,03	0,20	0,15	-0,12	0,50*	0,33	0,48*		
RAS	0,84***	-0,49*	-0,56**	0,84***	0,13	0,08	0,41*	0,02	
qCO ₂	0,36	-0,52**	-0,42*	0,45**	-0,08	-0,11	-0,43*	-0,44*	0,50*

*, ** e *** significativos com $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$, respectivamente.

Para a análise dos modelos hipotéticos, a única correlação que excedeu o valor ($\geq 0,90$) e que poderia causar problema de colinearidade, foi entre SB e pH nos microagregados (Tabela 3). Entretanto, assumiu-se covariação entre as variáveis de erro aleatório das respectivas variáveis no modelo, possibilitando a confirmação do mesmo, uma vez que, o ajuste foi satisfatório (Figura 4).

Para execução da modelagem foi necessário a retirada da variável N do construto Química do solo em todos os modelos, no macroagregado por piorar o ajuste do modelo e no microagregado porque a matriz de covariância foi não positiva definida, impedindo que fosse calculada uma solução única para cada um dos parâmetros livres do modelo.

Na figura 2 apresenta-se o Modelo 1, com dados referentes aos macroagregados, os índices de ajuste deste modelo ($\chi^2 = 54,974$; $df = 28$; $p = 0,002$) ainda não foram satisfatórios, o que significa que o modelo não foi ajustado e necessitou ser reespecificado.

Com a reespecificação do modelo 1 (Modelo 2, Figura 3), pode-se observar uma redução no valor do qui-quadrado e aumento do valor de p , com índices de ajuste aceitáveis $X^2=35,834$, $df=21$ e $p=0,023$ (Figura 3), o índice de Akyke (AIC), utilizado na comparação de modelos distintos foi menor ($AIC_{(1)} = 107,352$ e $AIC_{(2)} = 83,834$), confirmando a melhoria no ajuste do modelo.

Com a estimação dos parâmetros neste Modelo 2, observou-se que a conversão de floresta em pastagem apresentou efeito negativo e altamente significativo sobre a SB e o pH, com a SB apresentando efeito positivo e altamente significativo sobre o NBM, CBM, RAS e P. O AI apenas apresentou relação com o pH, tendo efeito negativo e altamente significativo. O pH apresentou efeito positivo sobre CBM e RAS. As variáveis que controlaram diretamente o C nos macroagregados foram o NBM e RAS com efeito positivo e o P negativo (Figura 3).

Quando calculado o efeito global (somatório dos caminhos) das variáveis sobre o C nos macroagregados, observa-se que a conversão da floresta em pastagem apresentou efeito negativo, com $\beta = -0,28$, a variável SB apresentou efeito positivo, com $\beta = 0,53$ e pH apresentou um baixo efeito global negativo $\beta = -0,0038$. O C nos macroagregados foi explicado por 71% das variações (Figura 3).

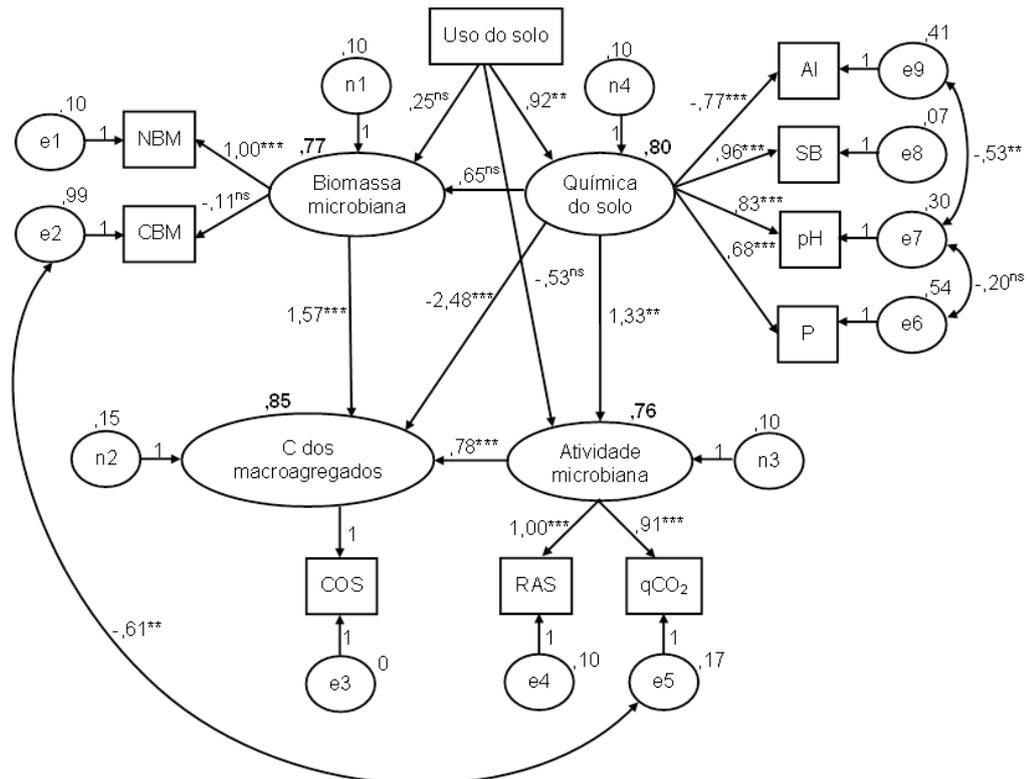


Figura 2. Modelo 1 para o C dos macroagregados (>0,250 mm) (COS: carbono orgânico do solo) através dos efeitos diretos e indiretos dos construtos Química do solo (Al: alumínio; SB: soma de bases; pH; P: fósforo), Biomassa microbiana (CBM: carbono da biomassa microbiana; NBM: nitrogênio da biomassa microbiana), Atividade microbiana (RAS: respiração basal acumulada; qCO₂: quociente metabólico) e da variável observada categórica Uso do solo. Retângulos representam variáveis observadas e elipses construtos; os números correspondem a parâmetros estimados padronizados (* p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; ns não significativo) e valor de R² (em negrito). As variáveis de erro (e1-e9 e n1-n4) são valores padronizados. $\chi^2 = 54,974$; $df = 28$; $p = 0,002$; $\chi^2/df = 1,89$; GFI = 0,814; CFI = 0,703; RMSEA = 0,128; AIC = 108,974.

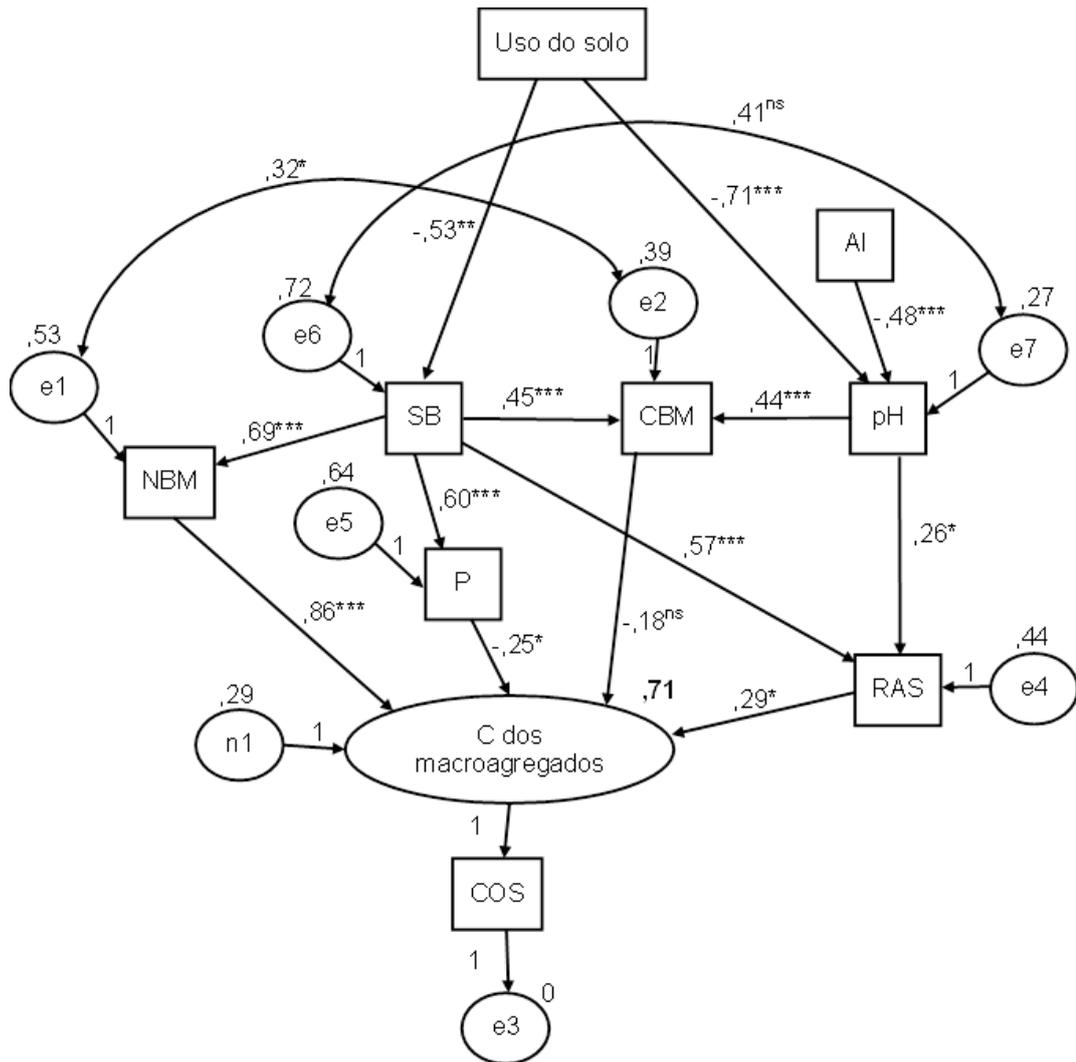


Figura 3. Modelo 2 para o C dos macroagregados (>0,250 mm) (COS: carbono orgânico do solo) através dos efeitos diretos e indiretos das variáveis observadas Al: alumínio; SB: soma de bases; pH; P: fósforo; CBM: carbono da biomassa microbiana; NBM: nitrogênio da biomassa microbiana; RAS: respiração basal acumulada e da variável observada categórica Uso do solo.

Retângulos representam variáveis observadas e elipses construídas; os números correspondem a parâmetros estimados padronizados (* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns não significativo) e valor de R^2 (em negrito). As variáveis de erro (e1-e9 e n1-n4) são valores padronizados. $\chi^2 = 35,834$; $df=21$; $p = 0,023$; $\chi^2/df = 1,70$; GFI= 0,865; CFI= 0,795; RMSEA= 0,109; AIC= 83,834.

O modelo de acumulação de C nos microagregados (Figura 4) não se ajustou ao modelo hipotético, onde foi necessária a retirada de duas relações (caminhos), sendo do Uso do solo com a Biomassa microbiana e do Uso do solo com a Atividade microbiana. Desta forma, o modelo apresentou o ajuste satisfatório ($\chi^2 = 31,57$; $df = 30$; $p = 0,388$), com alguns índices que não atingiram valores aceitáveis (GFI= 0,726; CFI= 0,897), pois deveriam ser maiores ou iguais a 0,95 e 0,90, respectivamente para GFI e CFI. A conversão da floresta em pastagem somente apresentou relação positiva e significativa com o construto Química do solo (Figura 4). Com o cálculo do efeito global observa-se que a

conversão da floresta em pastagem também apresentou efeito negativo sobre a acumulação de C nos microagregados, com $\beta = -0,78$.

O construto Química do solo apresentou relação significativa com todas as variáveis, exceto com o P. A variável erro do P apresentou covariação positiva com a variável erro do pH (Figura 4). O efeito global do construto Química do solo sobre o C dos microagregados foi negativo, com $\beta = -0,80$. No construto Biomassa microbiana apenas o NBM apresentou relação significativa positiva. As variáveis observadas no construto Atividade microbiana apresentaram relação positiva e altamente significativa. Neste modelo, os construtos que controlaram significativamente o C dos microagregados foram Química do solo e Biomassa microbiana, o primeiro por meio de relação negativa e o segundo positiva (Figura 4).

Quanto ao R^2 , observa-se que o C dos microagregados foi explicado por 95% das variações e os construtos Química do solo, Biomassa microbiana e Atividade microbiana apresentaram explicação de 93%, 5% e 63%, respectivamente (Figura 4).

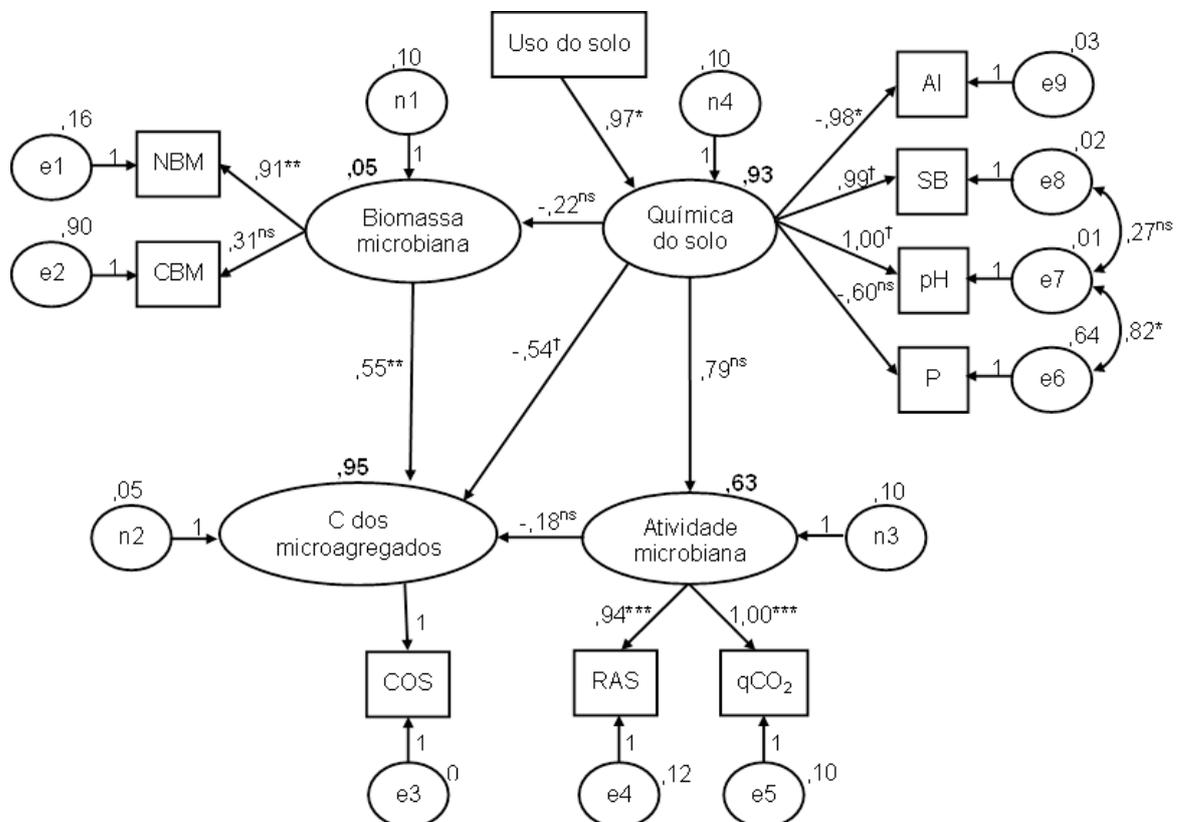


Figura 4. Modelo de C dos microagregados (<0,250 mm) (COS: carbono orgânico do solo) através dos efeitos diretos e indiretos dos construtos Química do solo (Al: alumínio; SB: soma de bases; pH; P: fósforo), Biomassa microbiana (CBM: carbono da biomassa microbiana; NBM: nitrogênio da

biomassa microbiana), Atividade microbiana (RAS: respiração basal acumulada; qCO_2 : quociente metabólico) e da variável observada categórica Uso do solo.

Retângulos representam variáveis observadas e elipses construídos; os números correspondem a parâmetros estimados padronizados † $p \leq 0,1$; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns não significativo) e valor de R^2 (em negrito). $\chi^2 = 31,57$; $df = 30$; $p = 0,388$; $\chi^2/df = 1,05$; $GFI = 0,726$; $CFI = 0,897$; $RMSEA = 0,048$; $AIC = 81,566$.

DISCUSSÃO

Efeito do Uso do Solo na acumulação de C nos macroagregados

Os modelos apresentados no presente trabalho confirmam o efeito negativo da conversão da floresta em pastagem na acumulação de C nos agregados do solo. Os resultados enfatizam que este efeito negativo está relacionado às inter-relações entre a biomassa e a atividade microbiana com a qualidade química do solo que exercem um papel importante na dinâmica do COS. Além disso, os modelos demonstram que estas inter-relações apresentam particularidades quando se trata de macro e microagregados.

Quando florestas são convertidas em pastagens há um aumento transitório na disponibilidade de nutrientes e, também, da queima da matéria orgânica que libera óxidos e carbonatos e reduz a acidez do solo (Moraes et al., 1996). No entanto, após alguns anos com o manejo inapropriado e o baixo *input* de fertilizantes nestas pastagens, há um declínio na fertilidade do solo, toxidez por Al e deficiência de P. Este novo cenário aliado à propagação das plantas daninhas contribui para a manutenção e aumento da degradação destas pastagens (Müller et al., 2004). Adicionalmente, é sabido que com esta conversão há tanto uma redução na produção de biomassa vegetal e, conseqüentemente, uma redução na quantidade de matéria orgânica produzida, como também, alteração na qualidade da matéria orgânica adicionada ao solo. Este somatório de novos fatores decorrentes desta conversão irá, portanto, afetar os processos microbianos do solo que incluem a transformação da matéria orgânica e estabilização dos agregados do solo, com efeito direto sobre o estoque de C no solo (Desjardins et al., 2004).

Os resultados claramente sugerem que a biomassa microbiana do solo regula a acumulação de COS nos agregados do solo. No caso dos macroagregados, a biomassa microbiana tem um papel relevante como

precursora do C orgânico do solo, uma vez que bactérias e fungos produzem polissacarídeos extracelulares (substratos de C) que atuam como agentes de ligação das frações granulométricas do solo (Six et al., 2000) e, portanto, protegem fisicamente este C da decomposição.

Em condições de estresse, como do presente trabalho, os microrganismos não conseguem impulsionar o mecanismo de formação de agregado e, conseqüentemente de síntese de esqueletos de C, o que reduz a disponibilidade de C lábil para sustentar a biomassa microbiana (Sundermeier et al., 2011). Assim, o C que estava protegido no macroagregado passa a ser mineralizado a fim de criar um ambiente favorável para estes microrganismos nestas condições de escassez, o que leva a redução no estoque de C do solo.

Com a conversão da floresta em pastagem a estabilidade da estrutura dos macroagregados é reduzida, com concomitante redução no C orgânico nesta classe de agregado. De acordo com Elliott (1986), Cambardella e Elliott (1993) e Six e Paustian (2014), a perda na estabilidade estrutural dos macroagregados está atrelada a perdas de C na fração particulada da matéria orgânica do solo. Esta fração, responsável pela ligação entre os microagregados individuais para formar os macroagregados do solo, é a primeira a ser perdida com resultado do manejo inadequado do solo (Tisdall e Oades, 1982; Cambardella e Elliot, 1992; Six et al., 2004). Ou seja, a perturbação do solo causada pela conversão promove aumento na taxa de decomposição, uma vez que com a destruição dos macroagregados há exposição da matéria orgânica que estava protegida, o que leva ao aumento da taxa de mineralização e, perda de COS (Lal e Kimble, 1997; Sundermeier et al., 2011).

Efeito do Uso do Solo na acumulação de C nos microagregados

Com a manutenção dos macroagregados, a matéria orgânica grosseira, que ainda sofreu poucas transformações, vai se transformando em matéria orgânica fina, que se liga a fração argila e compostos microbianos, formando microagregados dentro dos macroagregados do solo, que apresentam o C estabilizado quimicamente no interior dos microagregados (Six et al., 2000), proporcionando recalcitrância da MOS através do aumento da interação organomineral (Denef et al., 2004). Assim, os microagregados apresentam uma MOS mais estabilizada do que a encontrada nos macroagregados. O *turnover* de

formação dos macroagregados constitui um importante processo para formação de microagregados, sendo um mecanismo chave para o sequestro de C nos agregados do solo (Six et al., 2000).

O processo de estabilização do C nos microagregados ocorre através das transformações da MOS durante a formação dos macroagregados (Six et al., 2000), conferida pela biomassa microbiana, onde parte dos resíduos orgânicos é transformada no solo pela microbiota, que retorna a atmosfera na forma de CO₂ pela respiração microbiana e outra parte é transformada biologicamente em matéria orgânica estável (Six et al., 2006). Assim, o C dos microagregados apresenta um nível de proteção maior quando comparado com os macroagregados. Portanto, como observado no modelo, a atividade microbiana não apresentou efeito significativo sobre o C dos microagregados (Figura 4), uma vez que, o C presente nestas classes de agregados tem maior recalcitrância.

Assim, os modelos de inter-relações propostos neste estudo puderam avaliar e confirmar algumas vias que controlam o C dos macro e dos microagregados, além de verificar o efeito da conversão de floresta em pastagem sobre a fertilidade, a biomassa microbiana e o C dos agregados do solo.

CONCLUSÕES

Com os modelos ajustados conclui-se que: (i) com a conversão de floresta para pastagem ocorre redução do C tanto dos macro quanto dos microagregados do solo, sendo que os caminhos que levam a esta redução diferem com o tamanho dos agregados; (ii) com os baixos níveis de fertilidade destes solos, a redução no C dos agregados ocorreu através do P nos macroagregados e do construto Química do solo nos microagregados; (iii) tanto a biomassa microbiana quanto a atividade microbiana contribuíram positivamente para o C dos macroagregados, enquanto nos microagregados apenas a biomassa microbiana apresentou contribuição positiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, E.C. Biomassa e atividade microbiana em diferentes classes de agregados de solos sob florestais e pastagens no norte fluminense. 2004. 62 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ, 2004.
- Baldock, J.A., Skjemstad, J.O. (2000) Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Org. Geochem.*, 31:697-710.
- Baldock, J.A., Nelson, P.N. Soil organic matter, 2000. In: Sumner, M.E., ed. *Handbook of soil science*. Boca Raton, CRC Press, p. 25-84.
- Brasil (1983) Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. PROJETO RADAMBRASIL. Folhas SF. 23/24. Rio de Janeiro/Vitória. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 780p. (Levantamento de Recursos Naturais).
- Braz, A.M.S., Fernandes, A.R., Alleoni, L.R.F., 2013. Soil attributes after the conversion from forest to pasture in Amazon. *Land Degradation e Development*, 24, 33-38.
- Burla, R.S., Silva Neto, R., Werneck, L.G., Maciel, C.P., Silva, R.A., Pessanha, H.M., Oliveira, V.P.S. (2012) Análise das condicionantes socioeconômicas e ambientais para a implantação da silvicultura nas regiões Norte e Noroeste Fluminense. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, 6(1), 85-113.
- Cambardella, C.A., Elliott, E.T. (1993) Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. *Geoderma*, 56, 449-457.
- Cambardella, C.A., Elliott, E.T. (1992) Participate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 777-783.

- Carmo, J.B., Sousa Neto, E.R., Duarte-neto, P.J. Ometto, J.P.H.B., Martinelli, L.A. (2012) Conversion of the coastal Atlantic forest to pasture: Consequences for the nitrogen cycle and soil greenhouse gas emissions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 148, 37-43.
- Carvalho, J.L.N., Raucci, G.S., Cerri, C.E.P., Bernoux, M., Feigl, B.J., Wruck, F.J., Cerri, C.C. (2010) Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil e Tillage Research*, 110, 175-186.
- Cherry, J.A., Mckee, K.L., Grace, J.B. (2009) Elevated CO₂ enhances biological contributions to elevation change in coastal wetlands by offsetting stressors associated with sea-level rise. *Journal of Ecology*, 97, 67-77.
- Cunha, G.M. Ciclagem de nutrientes em florestas montanas e em *Eucalyptuscitriodora* na Região Norte Fluminense. 2002. 122 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ, 2002.
- Denef, K., Six, J., Merckx, R., Paustian, K. (2004) Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 1935-1944.
- Desjardins, T., Barros, E., Sarrazin, M., Girardin, C., Mariotti, A. (2004) Effects of forest conversion to pasture on soil carbono content and dynamics in Brazilian Amazonia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103, 365–373.
- Elliott, E.T. (1986) Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 50: 627-633.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.
- Frank e Harrell Jr., with contributions from CHARLES DUPONT and many others. (2013). Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 3.12-2.

<http://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>.

Fundação SOS Mata Atlântica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atlas dos remanescentes florestais a Mata Atlântica período 2014-2015. Relatório técnico. São Paulo, 2016.

Gomes, L.M., Reis, R.B., Cruz, C.B.M. Análise da cobertura florestal da Mata Atlântica por município no Estado do Rio de Janeiro. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 20-25 de abril de 2009, INPE, 3849-3857.

Grace, J.B. (2006) Structural equation modeling and natural systems, 1ed. Cambridge University Press, New York.

Grace, J.B., Anderson, T.M., Smith, M.D., Seabloom, E., Andelman, S.J., Meche, G., Weiher, E., Allain, L.K., Jutila H., Sankaran, M., Knops, J., Ritchie, M., Willig, M.R. (2007) Does species diversity limit productivity in natural grassland communities? Ecology Letters, 10, 680-689.

Gupta, V.V.S.R.; Germida, J.J. (1988) Distribution of microbial activity in different soil classes as affected by biomass and its aggregate size cultivation. Soil Biology and Biochemistry, 20(6), 777-786.

Hair, J.R., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E., Tatham, R.L. Análise Multivariada de Dados. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688p.

Iacobucci, D. (2010) Structural equations modeling: Fit indices, sample size, and advanced topics. Journal of Consumer Psychology, 20, 90-98.

Jastrow, J.D., Miller, R.M. Soil aggregate stabilization and carbon sequestration: Feedbacks through organomineral associations. In: Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F, Stewart, B.A., eds. Soil processes and the carbon cycle. Boca Raton, CRC Press, 1998. p. 207-223.

Lal, R., Kimble, J.M. (1997) Conservation tillage for carbon sequestration. Nutrient Cycling in Agroecosystems 49, 243–253.

Linlin, G., Taku, N., Hiromi, I., Zhigang, S. Carbon Mineralization Associated with

- Soil Aggregates as Affected by Short-term Tillage. *Journal of Resources and Ecology*. 7(2) 101-106.
- Manzoni, S., Taylor, P., Richter, A., Porporato, A., Agren, G.I. (2012) Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytologist*, 196, 79-91.
- Mendes, I.C., Souza, L.V., Resck, D.V.S., Gomes, A.C. (2003) Propriedades biológicas em agregados de um latossolo vermelho-escuro sob plantio convencional e direto no cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27(1), 435-443.
- Moraes, J.F.L., Volkoff, B., Cerri, C.C., Bemoux, M. (1996) Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma*, 70, 63-81.
- Müller, M.M.L., Guimarães, M.F., Desjardins, T., Mitja, D. (2004) The relationship between pasture degradation and soil properties in the Brazilian amazon: a case study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103, 279–288.
- O'Brien, S.L., Jastrow, Julie D., Grimley, D.A., Gonzalez-Meler, M.A. (2015) Edaphic controls on soil organic carbon stocks in restored grasslands. *Geoderma*. 251-252, 117-123.
- R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Sales, M.V.S., Gama-Rodrigues, A.C., Comerford, N.B., Cropper, W.P., Gama-Rodrigues, E.F., Oliveira, P.H.G. (2015) Respecification of structural equation models for the P cycle in tropical soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 102, 1-16.
- Schermelleh-Engel, K., Moosbrugger, H., Müller, H. (2003) Evaluating the Fit of Structural Equation Models: Tests of Significance and Descriptive Goodness-of-Fit Measures. *Methods of Psychological Research Online*, 8(2), 23-74.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Deneff, K. (2004) A history of research on the link

- between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Research*, 79, 7-31.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., (2000) Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 2099-2103.
- Six, J., Feller, C., Deneff, K., Ogle, S., Sa, J.C.M. (2002) Alain Albrecht Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755-775.
- Six, J., Frey, S.D., Thiet, R.K., Batten, K.M. (2006) Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 70, 555-569.
- Six, J., Paustian, K. (2014) Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology & Biochemistry*, 68, A4-A9.
- Sundermeier, A.P., Islam, K.R., Raut, Y., Reeder, R.C., Dick, W.A., (2011) Continuous no-till impacts on soil biophysical carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 75, 1779-1788.
- Tisdall, J.M.; Oades, J.M. (1982) Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163.
- Zhang, S., LI, Q., Lü, Y., Zhang, X., Liang, W. (2013) Contributions of soil biota to C sequestration varied with aggregate fractions under different tillage systems. *Soil Biology e Biochemistry*, 62, 147-156.
- Zhang, Z., Li, H., Hu, J., Li, X., He, Q., Tian, G., Wang, H., Wang, W., Wang, B., (2015) Do microorganism stoichiometric alterations affect carbon sequestration in paddy soil subjected to phosphorus input? *Ecological Applications*, 25(3), 866-879.
- Zinn, Y.L., LAL, R., Bigham, J.M., Resck, D.V. (2007) Edaphic controls on soil organic carbon retention in the brazilian cerrado: Soil structure. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 1215-1224.

3.2. INTER-RELAÇÕES ENTRE A QUALIDADE DA SERAPILHEIRA, BIOMASSA MICROBIANA E ACÚMULO DE C EM SOLOS SOB COBERTURAS FLORESTAIS NO BIOMA MATA ATLÂNTICA

RESUMO

Os sistemas florestais aportam grandes quantidades de material orgânico para o solo, através da serapilheira. Esta, por sua vez, influencia diretamente a microbiota do solo. Assim, este estudo teve como objetivo analisar, com o auxílio da modelagem de equações estruturais (MEE), o efeito da qualidade da serapilheira sobre a biomassa microbiana da serapilheira e do solo e, verificar como estas relações influenciam no C acumulado no solo em sistemas florestais. O estudo foi realizado a partir de dados provenientes da dissertação de Monteiro (2001) de avaliações da qualidade da serapilheira, biomassa microbiana da serapilheira e do solo e, do carbono orgânico do solo (COS). Foram testados dois modelos hipotéticos de inter-relações, sendo que o Modelo 1 avaliou o efeito da Biomassa microbiana da serapilheira e do solo sobre o C acumulado no solo. O Modelo 2 avaliou a influência da Qualidade da serapilheira sobre a Biomassa microbiana da serapilheira e do solo e, o C acumulado no solo. Com os modelos ajustados, observa-se que no Modelo 1 tanto a biomassa microbiana da serapilheira quanto a biomassa microbiana do solo contribuíram para o C acumulado no solo. Neste modelo, o C acumulado no solo foi explicado por 86 % das variações. No Modelo 2 foi inserido um construto a mais (Qualidade da

serapilheira) e foi observado que a Biomassa microbiana da serapilheira passou a agir como um dreno do C acumulado no solo. Neste modelo, o C acumulado no solo foi explicado por 69 % das variações. Com isso, pode-se concluir que os modelos foram adequados para explicar as relações entre a Qualidade da serapilheira, a Biomassa microbiana da serapilheira e do solo e, como estas agem sobre o C acumulado no solo.

Palavras-chave: Modelagem de equações estruturais; carbono orgânico do solo; microbiota do solo.

INTER-RELATIONS BETWEEN THE LITTER QUALITY, MICROBIAN BIOMASS AND C ACCUMULUS IN SOILS UNDER FOREST COVERS AT THE ATLANTIC FOREST BIOMA

ABSTRACT

Forest systems provide large amounts of organic material to the soil through litter. This, on the other hand, directly influences the soil microbiota. The aim of this study was to analyze, with the help of structural equation modeling (SEM), the effect of litter quality on litter and soil microbial biomass, and to verify how these relationships influence soil C accumulation in Forest systems. The study was based on data from the Master's Thesis Monteiro (2001) evaluation of litter quality, litter and soil microbial biomass and soil organic carbon (SOC). Two hypothetical interrelations models were tested, the Model 1 evaluated the effect of litter and soil microbial biomass on soil C accumulation. Model 2 evaluated the influence of litter quality on litter and soil microbial biomass and soil C accumulation. With the adjusted models, it can be observed that in Model 1, both litter microbial biomass and soil microbial biomass contributed directly to the soil C accumulation. In this model, the accumulation of soil C was explained by 86% of the variations. In Model 2 an additional construct was inserted (litter quality) and it was observed that the litter microbial biomass started to act as a drain of the soil C accumulation.

In this model, the accumulation of soil C was explained by 69% of the variations. Thus, it can be concluded that the models were adequate to explain the relationship between litter quality, litter and soil microbial biomass, and how they act on soil C accumulation.

Keywords: Structural equations modeling; Soil organic carbon; Microbial biomass.

INTRODUÇÃO

Os sistemas florestais aportam grandes quantidades de material orgânico para o solo, através da serapilheira. Constituindo uma das principais formas de ciclagem de nutrientes nestes ecossistemas, podendo suprir as plantas e a biota do solo. Contudo, a liberação dos nutrientes depende tanto da biota como da composição da serapilheira. Resíduos orgânicos com elevados teores de lignina, polifenóis e celulose têm baixa taxa de decomposição, assim como menor liberação de nutrientes (Swift et al., 1979).

Com isso, a serapilheira aportada ao solo tem influência direta sobre a microbiota (Barreto et al., 2008, Ndaw et al., 2009). Os microrganismos do solo contribuem com uma ampla gama de serviços essenciais para a sustentabilidade de todos os ecossistemas: como agentes na ciclagem de nutrientes, reguladores da dinâmica da matéria orgânica e sequestro de C no solo, modificando a estrutura física do solo e regime de água e aumentando a eficiência de aquisição de nutrientes pela vegetação (Singh et al., 2011).

Os processos de sequestro de C são regulados primeiramente pela biota do solo (Zhang et al., 2013). Onde esta é responsável pela decomposição e mineralização dos resíduos orgânicos no solo, utilizando estes como fonte de nutrientes e energia para seu desenvolvimento, assim como para síntese de substâncias orgânicas (Gama-Rodrigues e Gama-Rodrigues, 2008).

No processo de decomposição e mineralização da serapilheira parte do resíduo orgânico é transformada no solo pela microbiota, que retorna a atmosfera na forma de CO₂ pela respiração microbiana e outra parte é transformada biologicamente em matéria orgânica estável (Six et al., 2006). A eficiência no uso

do substrato orgânico e a conversão destes resíduos em carbono orgânico do solo (COS) podem ser aumentadas através da elevação da disponibilidade de nutrientes para a microbiota (Manzoni et al., 2012; Zhang et al., 2015). A eficiência da biomassa microbiana na utilização do C e N da serapilheira está diretamente relacionada com a qualidade da matéria orgânica aportada ao solo (Monteiro e Gama-Rodrigues, 2004).

Desta forma, observa-se que existe uma rede complexa de inter-relações entre a qualidade da serapilheira aportada, a biomassa microbiana e o C acumulado no solo. Analisar estas inter-relações entre estes atributos é uma forma mais adequada do que a análise de valores isolados e absolutos para o entendimento do funcionamento do sistema solo-serapilheira (Monteiro e Gama-Rodrigues, 2004).

Estas inter-relações podem ser observadas através da construção de modelos hipotéticos, que são elaborados e validados pelo uso de ferramentas da estatística multivariada, como a modelagem de equações estruturais (MEE), que é um método avançado e robusto da estatística multivariada (Zhang et al., 2013), que permite testar hipóteses complexas de redes de relações de caminhos (Grace et al., 2007). Por meio de um diagrama de caminhos, a MEE permite visualizar as inter-relações entre variáveis mensuradas e variáveis latentes ou construtos (não mensuradas). Segundo Sales et al. (2015), estas últimas são variáveis conceituais que formam e explicam, através de uma forte base teórica, um conjunto de variáveis observadas e são incorporadas nos modelos para torná-los mais consistentes teoricamente, reduzindo erros de mensuração.

Desta forma, este estudo teve como objetivo analisar, com o auxílio da MEE, o efeito da qualidade da serapilheira sobre a biomassa microbiana da serapilheira e do solo e, verificar como estas influenciam o C acumulado no solo em sistemas florestais. As hipóteses testadas foram: (1) A biomassa da serapilheira e do solo tem efeito positivo sobre o C acumulado no solo?; (2) De que forma a biomassa da serapilheira e do solo agem sobre o C acumulado no solo quando a qualidade da serapilheira é avaliada em conjunto no modelo de inter-relações?

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área

O estudo foi realizado a partir dos dados obtidos da dissertação de Monteiro (2001), referente a avaliações da qualidade da serapilheira, atributos microbianos e COS em quatro coberturas florestais e uma pastagem em início de regeneração no Parque Estadual do Desengano, situado entre os municípios de Santa Maria Madalena, São Fidélis e Campos dos Goytacazes.

As florestas foram classificadas como Floresta Ombrófila Densa Montana, caracterizada por apresentar estrato dominante com altura em torno de 25 m (Brasil, 1983). Segundo Monteiro (2001), os cinco sítios foram definidos de acordo com um gradiente de sucessão ecológico: Mata preservada, situada a aproximadamente 1100 m de altitude, com vertente atlântica e solo classificado como Cambissolo Hístico; Mata não-preserveda, com intervenção antrópica (extrativismo), situada a aproximadamente 980 m de altitude, vertente atlântica e solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo; Capoeira, regenerada por jacatirão (*Miconia cinnamomifolia*) e quaresmeira (*Tibouchina mutabilis*) há aproximadamente 40 anos, após o cultivo de café, situada a aproximadamente 850 m de altitude e vertente atlântica e solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo; Floresta plantada de *Eucalyptus citriodora*, com aproximadamente 18 anos de idade, situada a aproximadamente 300 m de altitude, com vertente continental e solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo; Pastagem formada por *Brachiaria decumbens*, com 5 anos de idade, em início de regeneração, com a presença de algumas espécies florestais como a quaresmeira, não utilizada para pastejo, situada a aproximadamente 850 m de altitude, com vertente atlântica e solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo.

Banco de dados

Os dados utilizados no presente estudo foram originados de análises realizadas em amostras de solo coletadas na profundidade de 0-10 cm. As amostras de serapilheira foram coletadas com o auxílio de um quadro gabarito

(0,25 m²), sendo coletado todo material vegetal sobre a superfície, totalizando um número de observações igual a 20 (Monteiro, 2001).

As variáveis utilizadas foram: da Qualidade da serapilheira (lignina, polifenol, celulose, Nser: nitrogênio da serapilheira, Cser: carbono da serapilheira); da Biomassa microbiana da serapilheira (CBMser e NBMser: respectivamente, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana da serapilheira) e da Biomassa microbiana do solo (CBMsol e NBMsol: respectivamente, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo) e; C acumulado no solo (COS: carbono orgânico do solo).

Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de normalidade univariada e multivariada. Posteriormente, foi realizada a análise descritiva (média, desvio padrão, valor máximo e mínimo) (Microsoft Excel, 2010). Também foi realizada análise de correlação de Pearson, através do programa R 3.3.2 (R Core Team, 2016) e pacote Hmisc (Frank e Harrell, 2013). Estas foram utilizadas para auxiliar no entendimento da estrutura das relações estabelecidas nos modelos entre as variáveis e para verificação de colinearidade entre as variáveis independentes, identificadas quando são altamente correlacionadas com valores $\geq 0,90$ (Hair et al., 2009).

A MEE foi utilizada para testar os modelos hipotéticos de inter-relações entre quatro construtos. Representados por: Qualidade da serapilheira – representando o nível de qualidade orgânica e nutricional da serapilheira; Biomassa microbiana da serapilheira - imobilização de C e N pelos microrganismos na serapilheira; Biomassa microbiana do solo - imobilização de C e N pelos microrganismos no solo; C acumulado no solo - reserva de carbono orgânico no solo. Iniciou-se a modelagem especificando o Modelo hipotético 1 (Figura 1), para verificar apenas o efeito da biomassa microbiana da serapilheira e do solo sobre o C acumulado no solo. Posteriormente, foi especificado o Modelo hipotético 2 (Figura 2), com a inserção do construto qualidade da serapilheira, com interesse em analisar o efeito deste construtos sobre os demais e também avaliar se as relações da biomassa microbiana da serapilheira e do solo se mantêm as mesmas com o C acumulado no solo.

Para a execução da MEE foi necessário a fixação de alguns parâmetros com o objetivo de tornar um modelo não-identificado em um modelo identificado, assim tornando possível estimar os parâmetros livres (Grace, 2006). Para fixação foram utilizados critérios sugeridos por Sales et al. (2015), fixando variáveis de erro e de cargas fatoriais nos modelos hipotéticos. Em ambos os modelos a variância de erro da variável observada COS foi fixada como 0, assumindo que não ocorreram erros de medição, assim sua carga fatorial foi fixada com o valor 1. No Modelo 2 as variâncias de erro dos construtos Biomassa microbiana da serapilheira e Biomassa microbiana do solo foram fixadas com o valor de 0,1. As variáveis de erros aleatórios associadas às variáveis observadas CBMser para o modelo 1 e Nser, NBMsol e NBMser para o Modelo 2 também tiveram seus valores fixados com o valor de 0,1, pois em uma análise prévia estavam resultando em valores negativos, o que não deve ocorrer.

Para estimação dos parâmetros dos modelos foi utilizado o método de mínimos quadrados generalizados, o ajuste geral do modelo foi avaliado com base no valor de qui-quadrado (X^2), nível de probabilidade (p) e grau de liberdade (df). Com o teste de X^2 e um valor de $p > 0,05$ indicam que o modelo hipotético apresentou ajuste satisfatório, no entanto, segundo Schermelleh-Engel et al. (2003), com valores de p entre 0,01 e 0,05 pode-se dizer que o ajuste é aceitável, pois o objetivo da MEE é avaliar se os modelos estão teoricamente especificados, ou seja, a hipótese de nulidade deve ser aceita. Como o X^2 é influenciado pelo tamanho amostral, também foram utilizados outros índices para a avaliação do ajuste do modelo, que são índice de qualidade de ajuste (GFI), índice de ajuste comparativo (CFI), índice de raiz do erro quadrático médio de aproximação (RMSEA) e a razão X^2/df . Valores do GFI $\geq 0,95$, CFI $\geq 0,90$ e RMSEA $\leq 0,10$ (Hair et al., 2009) e a razão $X^2/df < 3$ (Iacobucci, 2010) sugerem um ajuste apropriado para o modelo. Os modelos foram analisados através do programa AMOS versão 21 (IBM – SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

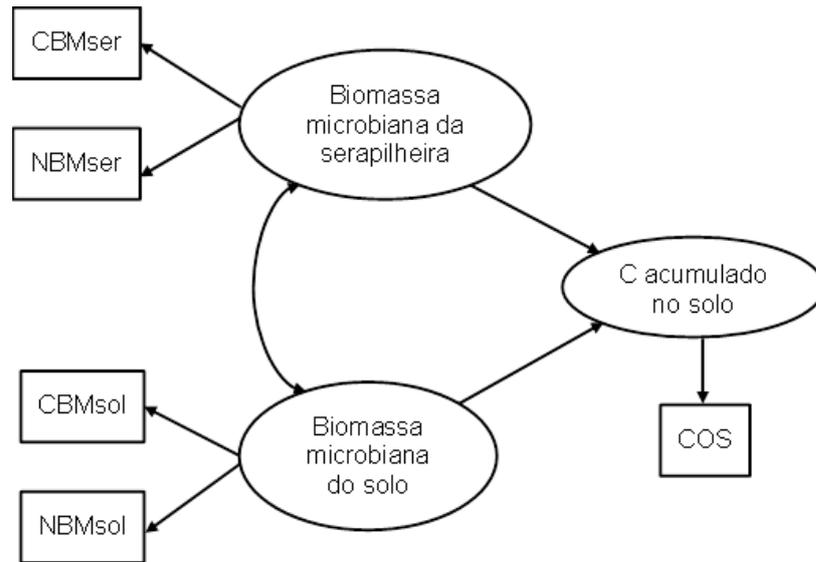


Figura 1. Modelo hipotético para o C acumulado no solo (COS: carbono orgânico do solo) através dos efeitos diretos da Biomassa microbiana da serapilheira (CBMser e NBMser: respectivamente, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana da serapilheira) e da Biomassa microbiana do solo (CBMsol e NBMsol: respectivamente, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo).

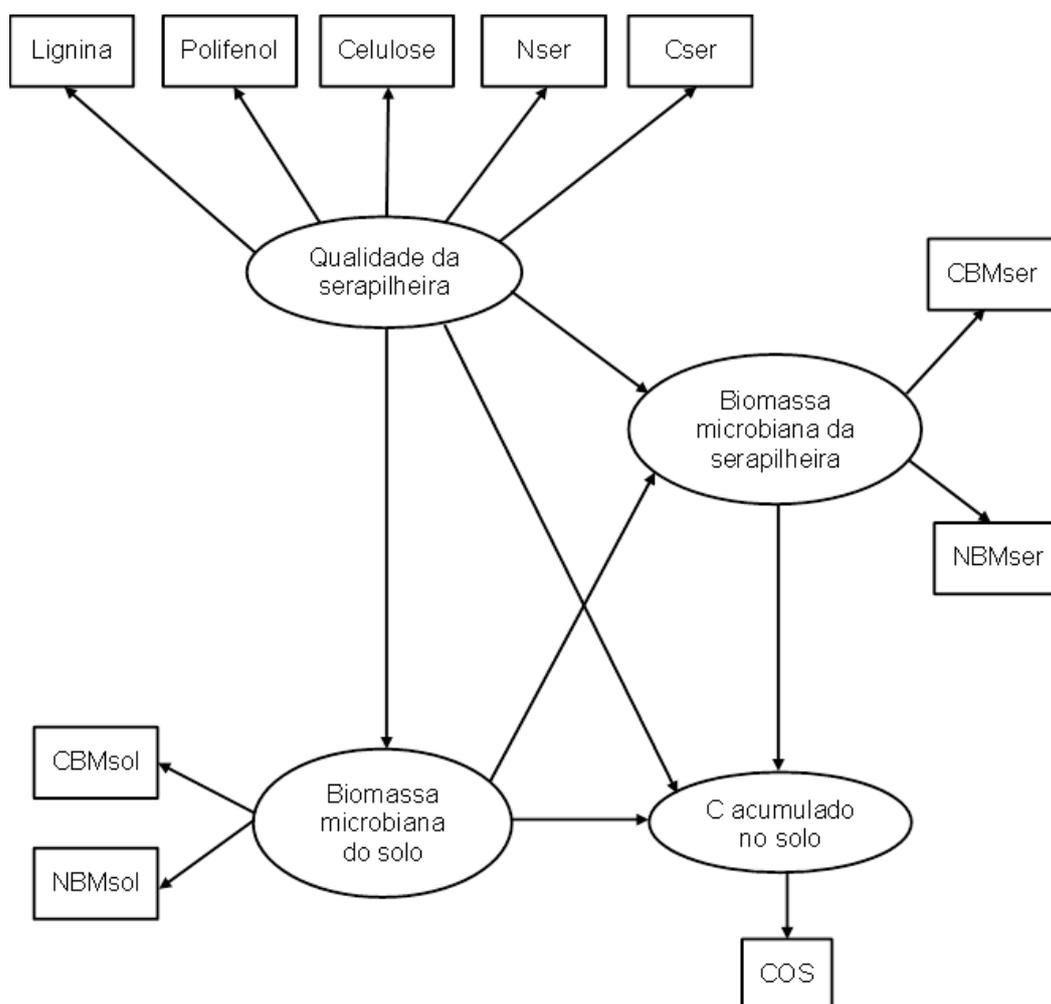


Figura 2. Modelo hipotético para o C acumulado no solo (COS: carbono orgânico do solo) através dos efeitos diretos e indiretos da Qualidade da serapilheira (Lignina; Polifenol; Celulose; Nser: nitrogênio total da serapilheira; Cser: carbono orgânico da serapilheira), da Biomassa microbiana da serapilheira (CBMser e NBMser: respectivamente, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana da serapilheira) e da Biomassa microbiana do solo (CBMsol e NBMsol: respectivamente, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo).

RESULTADOS

A análise descritiva dos dados está apresentada na Tabela 1. Como pode ser observado, houve uma ampla variação dos dados, tanto referente aos atributos do solo como da serapilheira. De forma geral, observa-se um padrão de tendência de maiores valores nos atributos microbianos da serapilheira quando comparados aos atributos microbianos do solo.

Tabela 1. Estatística descritiva dos dados utilizados nos modelos de C acumulado no solo sob coberturas florestais no Norte Fluminense (N=20).

Variáveis	Mín.	Média	Máx.	δ
Serapilheira				
C (g kg ⁻¹)	308,00	382,10	418,10	31,32
N (g kg ⁻¹)	4,28	10,88	18,26	5,09
C/N	71,96	35,12	22,90	6,16
CBM (µg g ⁻¹)	6998,00	11889,00	20277,00	4076,16
NBM (µg g ⁻¹)	532,50	1534,20	2993,30	659,29
Lignina (g kg ⁻¹)	144,50	311,50	427,30	78,57
Polifenol (g kg ⁻¹)	5,39	13,80	37,04	9,92
Celulose (g kg ⁻¹)	137,30	207,90	328,80	56,50
Solo				
C (g kg ⁻¹)	10,15	21,96	35,35	7,72
CBM (µg g ⁻¹)	391,30	757,40	1317,60	257,30
NBM (µg g ⁻¹)	34,76	131,03	243,44	67,67

δ – desvio padrão; Mín. e Máx. (valores mínimos e máximos, respectivamente). C: carbono orgânico; N: nitrogênio total; C/N: relação entre C e N da serapilheira; CBM: carbono da biomassa microbiana; NBM: nitrogênio da biomassa microbiana. Fonte: Monteiro (2001).

A análise de correlação de Pearson mostrou que o COS está correlacionado positivamente com os atributos microbianos do solo, e com o CBMser e Nser. A única correlação negativa com o COS foi com o polifenol. Sendo este, a variável relacionada à qualidade da serapilheira que mais apresentou correlação com os atributos microbianos da serapilheira e do solo, com todas as correlações negativas. Foi observado também correlação positiva entre o NBMser e o NBMsol (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficiente de correlação de Pearson com os dados utilizados nos modelos de C acumulado no solo em solos sob coberturas florestais no Norte Fluminense (N=20).

	COS	CBMsol	NBMsol	Cser	Nser	CBMser	NBMser	Lignina	Polifenol
CBMsol	0,73***								
NBMsol	0,67**	0,84***							
Cser	-0,40	-0,37	-0,28						
Nser	0,60**	0,55*	0,29	-0,79***					
CBMser	0,64**	0,28	0,24	-0,24	0,24				
NBMser	0,15	0,34	0,62**	0,01	-0,21	0,15			
Lignina	-0,06	0,10	-0,18	-0,40	0,62**	-0,29	-0,52*		
Polifenol	-0,54*	-0,45*	-0,62**	0,46**	-0,40	-0,48*	-0,60**	0,15	
Celulose	-0,13	-0,16	0,02	0,70***	-0,81***	0,16	0,39	-0,82***	0,16

*, ** e *** significativos com $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$, respectivamente. Nser: nitrogênio total da serapilheira, Cser: carbono orgânico da serapilheira; CBMser e NBMser: respectivamente, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana da serapilheira; CBMsol e NBMsol: respectivamente, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo; COS: carbono orgânico do solo.

Foi construído um modelo para explicar o efeito da Biomassa microbiana da serapilheira e do solo sobre o C acumulado no solo (Figura 1). Este modelo apresentou um ajuste satisfatório ($X^2= 2,746$; $df= 3$; $p= 0,433$; $X^2/df=0,92$) (Figura 3). No construto Biomassa microbiana da serapilheira apenas a CBMser apresentou relação significativa positiva. No construto Biomassa microbiana do solo, ambas as variáveis apresentaram relação significativa. Neste modelo, as variáveis de erro aleatório do NBMser e do NBMsol apresentaram covariação significativa positiva, e assim como na análise de correlação foi observada correlação significativa positiva entre as variáveis observadas relacionadas a estes erros aleatórios (Tabela 2). Os construtos Biomassa microbiana da serapilheira e Biomassa microbiana do solo apresentaram covariação positiva, no entanto, não foi significativa (Figura 3).

Tanto a Biomassa microbiana da serapilheira quanto a Biomassa microbiana do solo contribuíram para o C acumulado no solo, sendo que a Biomassa microbiana do solo apresentou um efeito maior (0,72). O C acumulado no solo foi explicado por 86 % das variações (Figura 3).

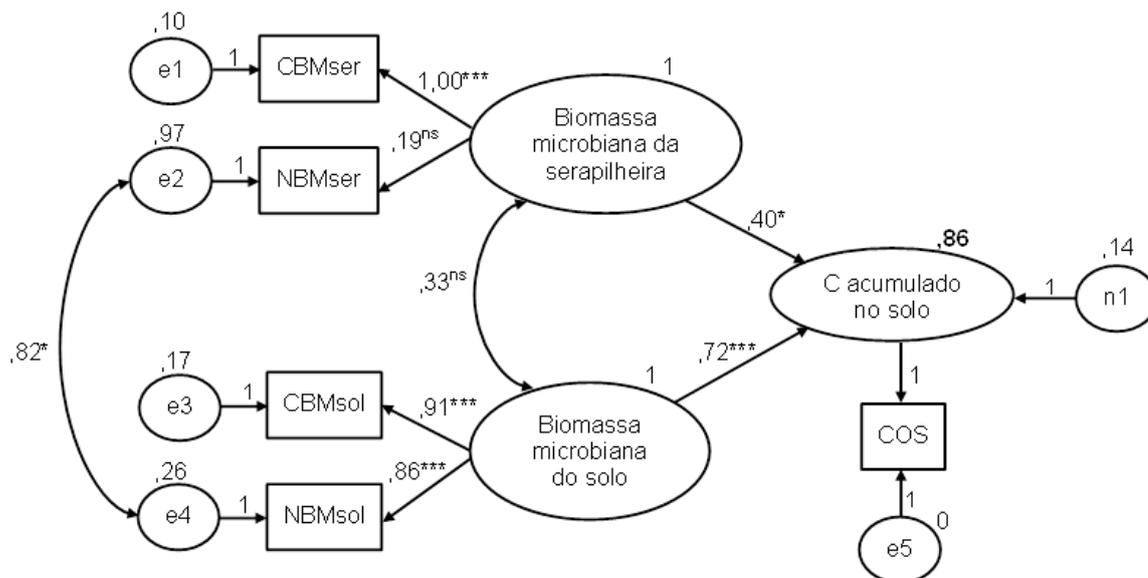


Figura 3. Modelo 1 para o C acumulado no solo (COS: carbono orgânico do solo) através dos efeitos diretos da Biomassa microbiana da serapilheira (CBMser e NBMser: respectivamente, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana da serapilheira) e da Biomassa microbiana do solo (CBMsol e NBMsol: respectivamente, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo). Retângulos representam variáveis observadas e elipses construtos; os números correspondem a parâmetros estimados padronizados (* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ^{ns} não significativo) e valor de R^2 (em negrito). As variáveis de erro (e1-e5 e n1) são valores padronizados. $\chi^2 = 2,746$; $df = 3$; $p = 0,433$; $\chi^2/df = 0,92$; GFI = 0,942; CFI = 1,000; RMSEA = 0,000; AIC = 26,746.

No Modelo 2 foi inserido o construto Qualidade da serapilheira. Este modelo apresentou ajuste satisfatório ($\chi^2 = 28,064$; $df = 33$; $p = 0,711$; $\chi^2/df = 0,85$) (Figura 4). O construto Qualidade da serapilheira apresentou relação significativa com todas as variáveis observadas, sendo positiva com a lignina e o Nser e, negativa com o polifenol, celulose e Cser. A Qualidade da serapilheira não apresentou relação significativa com nenhum dos construtos do modelo, mas apresentou efeito global (somatório dos efeitos diretos e indiretos) positivo sobre o C acumulado no solo ($\beta = 0,48$) (Figura 4).

No construto Biomassa microbiana da serapilheira as variáveis observadas apresentaram relação significativa, sendo negativa com o CBMser e positiva com o NBMser. No construto Biomassa microbiana do solo, ambas as variáveis apresentaram relação significativa e positiva. A Biomassa microbiana do solo apresentou efeito direto positivo sobre a Biomassa microbiana da serapilheira e o C acumulado no solo. Assim como um efeito global também positivo ($\beta = 0,47$). Já a Biomassa microbiana da serapilheira agiu como um dreno do C acumulado no solo (Figura 4).

Quanto ao R^2 , observa-se que o C acumulado no solo foi explicado por 69% das variações e os construtos Biomassa microbiana da serapilheira e

Biomassa microbiana do solo apresentaram explicação de 32% e 8%, respectivamente (Figura 4).

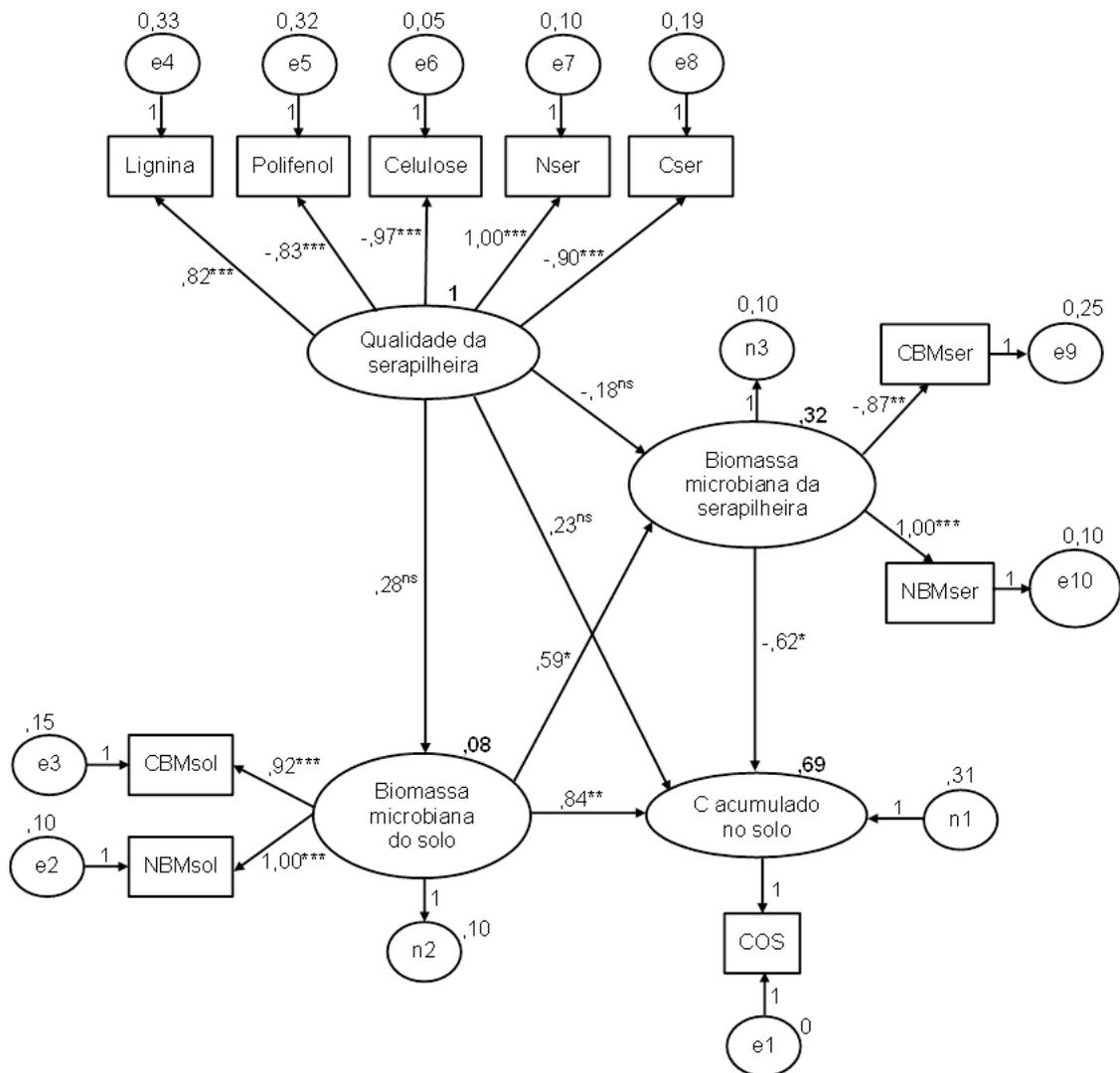


Figura 4. Modelo 2 para o C acumulado no solo (COS: carbono orgânico do solo) através dos efeitos diretos e indiretos da Qualidade da serapilheira (Lignina; Polifenol; Celulose; Nser: nitrogênio total da serapilheira; Cser: carbono orgânico da serapilheira), da Biomassa microbiana da serapilheira (CBMser e NBMser: respectivamente, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana da serapilheira) e da Biomassa microbiana do solo (CBMsol e NBMsol: respectivamente, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo).

Retângulos representam variáveis observadas e elipses construídas; os números correspondem a parâmetros estimados padronizados (* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; ns não significativo) e valor de R^2 (em negrito). As variáveis de erro (e1-e10 e n1-n3) são valores padronizados. $\chi^2 = 28,064$; $df = 33$; $p = 0,711$; $\chi^2/df = 0,85$; GFI = 0,705; CFI = 1,000; RMSEA = 0,000; AIC = 72,064.

DISCUSSÃO

Os modelos construídos se ajustaram aos dados do estudo, confirmando as teorias sobre o C acumulado no solo, através da biomassa microbiana da serapilheira e do solo. No Modelo 1, pode-se observar que tanto a biomassa microbiana da serapilheira como a do solo contribuíram positivamente para o C acumulado no solo (Figura 3). A biomassa microbiana pode ser considerada um precursor do sequestro de carbono no solo, portanto, sendo um indicador primário deste processo (Sundermeier et al., 2011; Zhang et al., 2013).

Os microrganismos são responsáveis pela decomposição e mineralização dos resíduos orgânicos no solo, utilizando estes como fontes de nutrientes e energia para seu desenvolvimento, assim como para síntese de substâncias orgânicas (Gama-Rodrigues e Gama-Rodrigues, 2008). Neste processo, parte dos resíduos orgânicos retorna a atmosfera na forma de CO₂ pela respiração microbiana e outra parte é transformada biologicamente em matéria orgânica estável (Six et al., 2006).

A transformação química da matéria orgânica no solo e a síntese de novos compostos podem ser influenciadas por diversos fatores, como a qualidade nutricional e orgânica da serapilheira, que está diretamente relacionada com a eficiência que a biomassa microbiana utiliza o C e N acumulados (Monteiro e Gama-Rodrigues, 2004; Ndaw et al., 2009).

No modelo 2 observa-se que com a inserção do construto Qualidade da serapilheira o modelo apresentou ajuste satisfatório, indicando que a estrutura do modelo foi adequada aos dados e que este construto faz parte desta estrutura. No entanto, o mesmo não apresentou relação significativa com os demais construtos, porém foi observado efeito global positivo, ressaltando a importância da serapilheira para o C acumulado no solo (Figura 4).

Neste modelo, percebe-se que a biomassa microbiana da serapilheira passa a ter um efeito negativo sobre o C acumulado no solo, indicando que a mesma está agindo como dreno de C do solo (Figura 4). Como pode ser observado na Tabela 1 a serapilheira apresenta uma alta relação C/N (35,12), que pode estar contribuindo para a biomassa microbiana da serapilheira agir como dreno de C. Além disso, o construto Qualidade da serapilheira é composto por

variáveis como lignina, celulose e polifenóis, que aumentam o nível de recalcitrância da matéria orgânica e em teores elevados podem reduzir a taxa de decomposição, assim, apresentando menor liberação de nutrientes (Swift et al., 1979). Isto pode ser observado também na análise de correlação, onde variáveis de qualidade da serapilheira relacionadas com a maior recalcitrância e os atributos microbianos do solo apresentaram correlações negativas entre elas (Tabela 2).

A serapilheira representa uma das principais formas de ciclagem de nutrientes em sistemas florestais. Desta forma, tem grande relevância no *status* nutricional destes solos. Com um material mais rico em nutrientes, pode-se elevar a eficiência de uso do substrato e aumentar a conversão de resíduos de plantas em COS (Manzoni et al., 2012; Zhang et al., 2015). Enquanto, por outro lado, com material orgânico com baixa qualidade nutricional, os microrganismos ficam sobre estresse, o que leva a menor eficiência no uso do C orgânico e aumento das perdas de C para atmosfera na forma de CO₂ (Anderson, 2003; Barreto et al., 2008; Gama-Rodrigues et al., 2008). Contudo, a biomassa microbiana da serapilheira representa uma reserva maior de C do que a biomassa microbiana do solo na profundidade de 0-10 cm, assim constitui um importante compartimento de C (Barreto et al., 2008; Gama-Rodrigues et al., 2008; Ndaw et al., 2009).

Assim, as inter-relações analisadas através da MEE foram adequadas para compreender as relações entre a qualidade da serapilheira e as biomassas microbianas da serapilheira e do solo e, entender melhor o processo de acúmulo de C no solo, através destas relações.

CONCLUSÕES

Os modelos foram adequados para explicar as relações entre a qualidade da serapilheira, a biomassa microbiana da serapilheira e do solo e, como estas agem sobre o C acumulado no solo.

A biomassa microbiana da serapilheira age como dreno de C do solo e a biomassa microbiana do solo age como um precursor do C acumulado no solo quando avaliado em conjunto com a qualidade da serapilheira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, T.H. (2003) Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 98, 285–293.
- Barreto, P.A.B., Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C., Barros, N.F.; Fonseca, S. (2008) Atividade microbiana, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em sequência de idades. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 611-619.
- Brasil (1983) Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. PROJETO RADAMBRASIL. Folhas SF. 23/24. Rio de Janeiro/Vitória. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, 780p. (Levantamento de Recursos Naturais).
- Frank e Harrell Jr., with contributions from CHARLES DUPONT and many others. (2013). Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 3.12-2. <http://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>.
- Gama-rodrigues, E.F., Barros, N.F., Viana, A.P., Santos, G.A. (2008) Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1489-1499.
- Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A. C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: Santos, G.A., Silva, L.S.; Canellas, L.P., CAMARGO, F.A.O. (Eds.) *Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008. p. 159-170.
- Grace, J.B., Anderson, T.M., Smith, M.D., Seabloom, E., Andelman, S.J., Meche, G. Weiher, E., Allain, L.K., Jutila, H., Sankaran, M., Knops, J., Ritchie, M., Willig, M.R. (2007) Does species diversity limit productivity in natural grassland communities? *Ecology Letters* 10, 680–689

- Grace, J.B. (2006) Structural equation modeling and natural systems, 1ed. Cambridge University Press, New York.
- Hair, J.R., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E., Tatham, R.L. Análise Multivariada de Dados. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688p.
- Iacobucci, D. (2010) Structural equations modeling: Fit Indices, sample size, and advanced topics. *Journal of Consumer Psychology*, 20, 90-98.
- Manzoni, S., Taylor, P., Richter, A., Porporato, A., Agren, G.I. (2012) Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytologist*, 196, 79-91.
- Monteiro, M.T. Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana: indicadores da qualidade do solo e da serapilheira em sítios florestais do Norte Fluminense. 2001. 75 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ, 2001.
- Monteiro, M.T., Gama-Rodrigues, E.F. (2004) Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana em diferentes estruturas de serapilheira de uma floresta natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28, 819-826.
- Ndaw, S.M.; Gama-Rodrigues, A.C.; Gama-Rodrigues, E.F.; Sales, K.R.N.; Rosado, A.S. (2009) Relationships between bacterial diversity, microbial biomass, and litter quality in soils under different plant covers in northern Rio de Janeiro State, Brazil. *Canadian Journal of Microbiology*, 55, 1-7.
- R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Sales, M.V.S., Gama-Rodrigues, A.C., Comerford, N.B., Cropper, W.P., Gama-Rodrigues, E.F., Oliveira, P.H.G. (2015) Respecification of structural equation models for the P cycle in tropical soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 102, 1-16.
- Schermelleh-Engel, K., Moosbrugger, H., Müller, H. (2003) Evaluating the Fit of

Structural Equation Models: Tests of Significance and Descriptive Goodness-of-Fit Measures. *Methods of Psychological Research Online*, 8(2), 23-74.

- Singh, J.S.; Pandey, V.C., Singh, D.P. (2011) Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 40, 339-353.
- Six, J., Frey, S.D., Thiet, R.K., Batten, K.M. (2006) Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 70, 555-569.
- Sundermeier, A.P., Islam, K.R., Raut, Y., Reeder, R.C., Dick, W.A. (2011) Continuous no-till impacts on soil biophysical carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 75, 1779-1788.
- Swift, M.J., Heal, O.W., Anderson, J.M., eds. The influence of resource quality on decomposition processes. In: *Decomposition in terrestrial ecosystems*. Berkeley, University of California Press, 1979. p.118-166.
- Zhang, S., LI, Q., Lü, Y., Zhang, X., Liang, W. (2013) Contributions of soil biota to C sequestration varied with aggregate fractions under different tillage systems. *Soil Biology e Biochemistry*, 62, 147-156.
- Zhang, Z., Li, H., Hu, J., Li, X., He, Q., Tian, G., Wang, H., Wang, W., Wang, B. (2015) Do microorganism stoichiometric alterations affect carbon sequestration in paddy soil subjected to phosphorus input? *Ecological Applications*, 25(3), 866-879.

4. RESUMO E CONCLUSÕES

Com o auxílio da modelagem de equações estruturais (MEE) foram construídos e validados modelos de inter-relações com construtos (variáveis latentes) e variáveis observadas para analisar: o efeito da conversão de floresta em pastagem sobre o C acumulado nos macro e microagregados do solo, através de uma rede complexa de inter-relações entre a biomassa microbiana, química do solo e atividade microbiana; o efeito da qualidade da serapilheira sobre as biomassas microbianas da serapilheira e do solo e, verificar como estas relações influenciam no acúmulo de C no solo em sistemas florestais.

Para avaliar o efeito da conversão de floresta em pastagem foi utilizada uma variável categórica nos modelos (Uso do solo) que pode mostrar que a conversão de floresta para pastagem causa perda de C tanto nos macro quanto nos microagregados do solo, no entanto, as vias que levam a tal perda diferem com o tamanho dos agregados.

Os resultados apontaram que a biomassa microbiana da serapilheira age como dreno enquanto a biomassa microbiana do solo age como fonte de C do solo quando analisado em conjunto com a qualidade da serapilheira.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allison, V.J., Yermakov, Z., Miller, R.M., Jastrow, J.D., Matamala, R. (2007) Using landscape and depth gradients to decouple the impact of correlated environmental variables on soil microbial community composition. *Soil Biology & Biochemistry*, 39, 505–516
- Araújo, E.A.; Ker, J.C.; Mendonça, E.S.; Silva, I.R.; Oliveira, E.K. (2011) Impacto da conversão floresta - pastagem nos estoques e na dinâmica do carbono e substâncias húmicas do solo no bioma Amazônico. *Acta Amazonica*, 41(1), 103-114.
- Baldock, J.A., Skjemstad, J.O. (2000) Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. *Organic Geochemistry*, 31, 697-710.
- Bayer, C., Amado, T.J.C., Tornquist, C.G., Cerri, C.E.C., Dieckow, J., Zanatta, J.A., Nicoloso, R.S. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. In: Klauberg Filho, O., Mafra, A.L., Gatiboni, L.C. *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, vol. VII, 2011.
- Baretta, D., Santos, J.C.P., Segat, J.C., Geremia, E.V., Oliveira Filho, L.C.I., Alves, M.V. Fauna edáfica e qualidade do solo. In: Klauberg Filho, O., Mafra, A.L., Gatiboni, L.C. (Eds.) *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa, MG:

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, vol. VII, 2011.

- Barreto, P.A.B., Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C., Barros, N.F.; Fonseca, S. (2008) Atividade microbiana, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em sequência de idades. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 611-619.
- Barto, E.K., Alt, F., Oelmann, Y., Wilcke, W., Rillig, M.C. (2010) Contributions of biotic and abiotic factors to soil aggregation across a land use gradient. *Soil Biology & Biochemistry*, 42, 2316-2324.
- Bernoux, M.; Carvalho, M.C.S.; Volkoff, B.; Cerri, C.C. (2001) CO₂ emission from mineral soils following land-cover change in Brazil. *Global Change Biology*, 7(7), 779-787.
- Braz, A.M.S., Fernandes, A.R., Alleoni, L.R.F. (2013) Soil attributes after the conversion from forest to pasture in Amazona. *Land Degradation e Development*, 24, 33-38.
- Briar, S.S.; Fonte, S.J.; Park, I.; Six, J.; Scow, K.; Ferris, H. (2011) The distribution of nematodes and soil microbial communities across soil aggregate fractions and farm management systems. *Soil Biology e Biochemistry*, 43, 905-914.
- Burla, R.S., Silva Neto, R., Werneck, L.G., Maciel, C.P., Silva, R.A., Pessanha, H.M., Oliveira, V.P.S. (2012) Análise das condicionantes socioeconômicas e ambientais para a implantação da silvicultura nas regiões Norte e Noroeste Fluminense. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*, 6(1), 85-113.
- Caldeira, M.V.W., Vitorino, M.D., Schaadt, S.S., Moraes, E., Balbinot, R. (2008) Quantificação de serapilheira e de nutrientes em uma Floresta Ombrófila Densa. *Semina: Ciências Agrárias*, 29, 1, 53-68.
- Carmo, J.B., Sousa Neto, E.R., Duarte-neto, P.J. Ometto, J.P.H.B., Martinelli, L.A. (2012) Conversion of the coastal Atlantic forest to pasture: Consequences for the nitrogen cycle and soil greenhouse gas emissions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 148, 37-43.

- Carvalho, J.L.N., Raucci, G.S., Cerri, C.E.P., Bernoux, M., Feigl, B.J., Wruck, F.J., Cerri, C.C. (2010) Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil e Tillage Research*, 110, 175-186.
- Cherry, J.A., Mckee, K.L., Grace, J.B. (2009) Elevated CO₂ enhances biological contributions to elevation change in coastal wetlands by offsetting stressors associated with sea-level rise. *Journal of Ecology*, 97, 67-77.
- Correia, M.E.F.; Andrade, A.G. Formação de serapilheira e ciclagem de nutrientes. In: Santos, G.A., Silva, L.S., Canellas, L.P., Camargo, F.A.O. (eds.) *Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2.ed. Porto Alegre: Metrópole. 2008, p. 137-158.
- Costa, O.V., Cantarutti, R.B., Fontes, L.E.F., Costa, L.M., Nacif, P.G.S., FARIA, J. C. (2009) Estoque de carbono do solo sob pastagem em área de tabuleiro costeiro no sul da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 1137-1145.
- Dossiê Mata Atlântica 2001: Projeto Monitoramento Participativo da Mata Atlântica. 407 p.
- Edwards, A.P.; Bremner, J.M. (1967) Microaggregates in soil. *Journal Soil Science*, 18, 64-73.
- Espig, S.A., Freire, F.J., Marangon, L.C., Ferreira, R.L.C., Freire, M.B.G.S., Espig, D.B. (2009) Sazonalidade, composição e aporte de nutrientes da serapilheira em fragmento de Mata Atlântica. *Revista Árvore*, 33(5), 949-956.
- Fundação SOS Mata Atlântica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Atlas dos remanescentes florestais a Mata Atlântica período 2014-2015. Relatório técnico. São Paulo, 2016.
- Gama-Rodrigues, A.C., Sales, M.V.S., Silva, P.S.D., Comerford, N.B., Cropper, W.P., Gama-Rodrigues, E.F. (2014) An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. *Biogeochemistry*, 118, 453-469.
- Gama-Rodrigues, E.F. Barros, N.F. Gama-Rodrigues, A.C., Santos, G.A. (2005)

- Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29, 893-901.
- Gama-Rodrigues, E.F., Barros, N.F., Viana, A.P., Santos, G.A. (2008) Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1489-1499.
- Gama-rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: Santos, G. A., Silva, L.S., Canellas, L.P., Camargo, F.A.O. (Eds.) *Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008. p. 159-170.
- Gama-Rodrigues, E.F., Gama-Rodrigues, A.C., Nair, P.K.R. Soil Carbon Sequestration in Cacao Agroforestry Systems: A Case Study from Bahia, Brazil. In: Kumar, B.M.; Nair, P.K.R. (Eds.) *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems*. Nova Iorque, Springer, 2011, p. 85-99.
- Golchin, A.; Baldock, J.A.; Oades, J.M. A model linking organic matter decomposition, chemistry and aggregate dynamics. In: Lal, R.; Kimble, J.; Follett, R.F.; Stewart, B.A. (Eds.) *Soil processes and the carbon cycle*. Boca Raton, CRC Press, 1998. p. 245-266.
- Gomes, J.M., Pereira, M.G., Piña-Rodrigues, F.C.M., Pereira, G.H.A., Gondim, F. R., Silva, E.M.R. (2010) Aporte de serapilheira e de nutrientes em fragmentos florestais da Mata Atlântica, RJ. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 5(3), 383-391.
- Gomes, L.M., Reis, R.B., Cruz, C.B.M. Análise da cobertura florestal da Mata Atlântica por município no Estado do Rio de Janeiro. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 20-25 de abril de 2009, INPE, 3849-3857.
- Grace J.B. *Structural equation modeling and natural systems*. New York: Cambridge University Press, 2006. 365 p.

- Gupta, V.V.S.R.; Germida, J.J. (1988) Distribution of microbial activity in different soil classes as affected by biomass and its aggregate size cultivation. *Soil Biology and Biochemistry*, 20(6), 777-786.
- Hair, J.R., Black, W.C., Babin, B.J., Anderson, R.E., Tatham, R.L. *Análise Multivariada de Dados*. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688p.
- Hurisso, T.T., Davis, J.G., Brummer, J.E., Stromberger, M.E., Mikha, M.M., Haddix, M.L., Booher, M.R., Paul, E. A. (2013) Rapid changes in microbial biomass and aggregate size distribution in response to changes in organic matter management in grass pasture. *Geoderma*, 193-194(3), 68-75.
- Iacobucci, D. (2009) Everything you always wanted to know about SEM (structural equations modeling) but were afraid to ask. *Journal of Consumer Psychology* 19, 673-680.
- Iacobucci, D., 2010. Structural equations modeling: Fit indices, sample size, and advanced topics. *Journal of Consumer Psychology*, 20, 90-98.
- Jastrow, J.D., Miller, R.M. (1998) Soil Aggregate Stabilization and Carbon Sequestration: Feedbacks through organomineral associations. In: Lal, R.; Kimble, J.M.; Follet, R.F.; Stewart, B.A., (Eds.) *Soil Processes and the Carbon Cycle*. Boca Raton, CRC Press, p. 207-223.
- Jenkinson, D.S., Ladd, J.N. Microbial biomass in soil: Measurement and Turnover. In: Paul, E.A.; Ladd, J.N., (Eds.) *Soil Biochemistry*. New York, Marcel Dekker, 1981, v. 5, p. 415-471.
- Jose, S., Bardhan, S. (2012) Agroforestry for biomass production and carbon sequestration: an overview. *Agroforestry Systems*, 86, 105-111.
- Kaschuk, G., Alberton, O., Hungria, M. (2010) Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. *Soil Biology e Biochemistry*, 42, 1-13.
- Lal, R. (2007) Carbon management in agricultural soils. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12, 303-322.

- Maciel, S. M. Análise espacial do carbono em um fragmento florestal com predominância de *Anadenanthera* sp. 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2012.
- Mendes, I.C.; Souza, L.V.; Resck, D.V.S.; Gomes, A.C. (2003) Propriedades biológicas em agregados de um latossolo vermelho-escuro sob plantio convencional e direto no cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27(1), 435-443.
- Moço, M.K.S. Atributos biológicos em solo e serapilheira sob sistemas agroflorestais de cacau e outras coberturas vegetais. 2010. 100 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ. 2010.
- Nair, P.K.R., Kumar, B.M., Nair, V.D. (2009b) Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(1), 10-23.
- Nair, P.K.R.; Nair, V.D.; Kumarc, B.M.; Haile, S.G. (2009a) Soil carbon sequestration in tropical agroforestry systems: a feasibility appraisal. *Environmental Science e Policy*, 12(8), 1099-1111.
- Ndaw, S.M., Gama-Rodrigues, A.C., Gama-Rodrigues, E.F., Sales, K.R.N., Rosado, A.S. (2009) Relationships between bacterial diversity, microbial biomass, and litter quality in soils under different plant covers in northern Rio de Janeiro State, Brazil. *Canadian Journal of Microbiology*, 55, 1-7.
- Oliveira, P.H.G. Modelagem de equações estruturais aplicada ao estudo das relações entre qualidade e diversidade da fauna no sistema solo-serapilheira. 2016. 95f. Tese. (Doutorado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ. 2016.
- Ribeiro, M.C., Metzger, J.P., Martensen, A.C., Ponzoni, F.J., Hirota, M.M. (2009) The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*,

Amsterdam, 142, 1144-1156.

- Sales, M.V.S., Gama-Rodrigues, A.C., Comerford, N.B., Cropper, W.P., Gama-Rodrigues, E.F., Oliveira, P.H.G. (2015) Respecification of structural equation models for the P cycle in tropical soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 102, 1-16.
- Sales, M.V.S. Modelagem de equações estruturais aplicada ao estudo do ciclo do p em solos tropicais. 2015. 110f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ. 2015.
- Salton, J.C.; Mielniczuk, J.; Bayer, C.; Fabrício, A.C.; Macedo, M.C.M.; Broch, D.L. (2011) Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46(10), 1349-1356.
- Schäffer, W.B., Prochnow, M.O. Mata Atlântica: informações gerais. In: Schäffer, W.B., Prochnow, M.O. *A Mata Atlântica e você: como preservar, recuperar e se beneficiar da mais ameaçada floresta brasileira*. Brasília: Apremavi, 2002, p.12-21.
- Schermelleh-Engel, K., Moosbrugger, H., Müller, H. (2003) Evaluating the Fit of Structural Equation Models: Tests of Significance and Descriptive Goodness-of-Fit Measures. *Methods of Psychological Research Online*, 8(2), 23-74.
- Singh, J.S.; Pandey, V.C.; Singh, D.P. (2011) Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 140, 339-353.
- Six, J.; Bossuyt, H.; Degryse, S.; Deneff K. (2004) A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil e Tillage Research*, 79, 7-31.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K. (1999) Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 1350-1358.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K. (2000) Soil macroaggregate turnover and

- microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 2099-2103.
- Six, J., Feller, C., Deneff, K., Ogle, S., Sa, J.C.M. (2002) Alain Albrecht Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755-775.
- Sundermeier, A.P., Islam, K.R., Raut, Y., Reeder, R.C., Dick, W.A., 2011. Continuous no-till impacts on soil biophysical carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 75, 1779-1788.
- Swift, M.J., Heal, O.W., Anderson, J.M. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Oxford: Blackwell, 1979. 372 p.
- Swift, R.S., 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*, 166(11), 858-871.
- Tisdall, J.M.; Oades, J.M. (1982) Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141-163.
- Tisdall, J.M. (1994) Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant and Soil*, 159, 115-121
- Vezzani, F.M.; Mielniczuk, J. (2011) Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 213-223.
- Viana, T.O. Frações de fósforo sob diferentes usos e classes de solo na Região Sul da Bahia. 2016. 88f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ. 2016.
- Vidal, M.M., Pivello, V.R., Meirelles, S.T., Metzger, J.P. (2007) Produção de serapilheira em floresta Atlântica secundária numa paisagem fragmentada (Ibiúna, SP): importância da borda e tamanho dos fragmentos. *Revista Brasileira de Botânica*, São Paulo, 30(3), 521-532.
- Wohlenberg, E.V.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J.; Blume, E. (2004) Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de cultura sem

rotação e em sucessão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28, 891-900.

Young, A. *Agroforestry for Soil Management*. CAB International, Wallingford, UK, 1997. 276 p.

Zinn, Y.L., Lal, R., Bigham, J.M., Resck, D.V. (2007) Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian cerrado: Soil structure. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 1215-1224.

Zhang, S., Li, Q., Lü, Y., Zhang, X., Liang, W. (2013) Contributions of soil biota to C sequestration varied with aggregate fractions under different tillage systems. *Soil Biology e Biochemistry*, 62, 147-156.