

*Guilherme Montandon Chaer
Sérgio Gaiad
Ariene Basílio dos Santos
Rodrigo Grochoski*

Introdução

Os microrganismos e os processos microbiológicos do solo são os principais responsáveis pela ciclagem de nutrientes e pela decomposição e formação da matéria orgânica do solo. Os microrganismos constituem uma grande e dinâmica fonte de nutrientes nos ecossistemas e participam ativamente em processos benéficos, como a estruturação do solo, a fixação biológica de nitrogênio, a solubilização de nutrientes para as plantas, a redução de patógenos e pragas de plantas e a degradação de pesticidas e outros compostos persistentes aplicados ao solo, atuando em associações micorrízicas e em outras propriedades do solo que afetam o crescimento vegetal.

Microrganismos e processos microbiológicos destacam-se também como indicadores da qualidade do solo, por sua capacidade de responder rapidamente a mudanças advindas de alterações no manejo ou uso da terra e, adicionalmente, pelo fato de que a atividade microbiana reflete a influência conjunta de todos os fatores que regulam a degradação da matéria orgânica e a transformação dos nutrientes. Dessa forma, um solo de alta qualidade deve possuir atividade biológica intensa e conter populações microbianas balanceadas.

Diversos são os parâmetros utilizados para determinar a condição microbiológica do solo. Destacam-se nesse conjunto o carbono da biomassa microbiana (CBM), a taxa de respiração do solo, o quociente metabólico do solo (qCO_2) e a atividade de diferentes grupos

de enzimas do solo.

A biomassa microbiana inclui bactérias, actinomicetos, fungos, algas e protozoários e corresponde a 2% a 5% do carbono orgânico e a 1% a 5% do nitrogênio total do solo. É o componente do solo responsável por funções de extrema importância, como a decomposição e formação da matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes. A biomassa microbiana constitui ainda uma reserva considerável de nutrientes que são constantemente desviados para os ciclos de crescimento dos diferentes organismos que compõem o ecossistema.

A taxa de respiração do solo consiste na medida da produção de dióxido de carbono resultante da atividade metabólica, no solo, de microrganismos, de raízes vivas e de macrorganismos, como minhocas, nematoides e insetos. A atividade dos organismos no solo é considerada um atributo positivo para sua qualidade, sendo a taxa de respiração um indicador sensível da decomposição de resíduos, do giro metabólico do carbono orgânico e de distúrbios no ecossistema.

O quociente metabólico corresponde à taxa de respiração por unidade de biomassa microbiana. Essa medida é um indicador da eficiência da biomassa microbiana em utilizar o carbono orgânico do solo (Capítulo 11) e, indiretamente, um indicador de estresse ou distúrbio do solo. Fatores de estresse ou condições desfavoráveis presentes no solo, como metais pesados, limitações de nutrientes e baixo pH, irão reduzir a eficiência microbiana em converter o carbono assimilado em nova biomassa, já que uma maior parte desse carbono deverá ser utilizada para fornecer energia (e portanto ser respirada como CO_2) para processos metabólicos necessários à manutenção do equilíbrio celular. Ao contrário, à medida que determinada biomassa microbiana se torna mais eficiente na utilização dos recursos do ecossistema, menos carbono é perdido como CO_2 pela respiração e maior proporção de carbono é incorporada aos tecidos microbianos. Dessa forma, baixos valores de quociente metabólico indicam ambientes mais estáveis, ou mais próximos do estado de equilíbrio.

As enzimas do solo originam-se de todos os organismos vivos presentes no solo, incluindo fauna, raízes de plantas e microrganismos. São usualmente excretadas de células vivas ou liberadas no solo a partir

de células mortas. As enzimas livres formam complexos com a matéria orgânica do solo e podem ser estabilizadas na superfície de partículas de argila, mantendo-se ali ativas por períodos variáveis. A escolha das enzimas a serem analisadas como indicadoras de qualidade se baseia-se em sua sensibilidade ao manejo do solo e em sua importância na ciclagem de nutrientes e na decomposição da matéria orgânica, além da simplicidade de análise.

A área do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (Comperj) é ocupada predominantemente por pastagens, muitas delas degradadas, e áreas agrícolas atualmente abandonadas devido à implantação do empreendimento. Em ambas, o processo de regeneração natural da vegetação já teve início e, nelas, são poucos os remanescentes florestais, todos bastante alterados (Capítulo 3). Considerando esse quadro, este estudo teve por objetivo caracterizar a condição microbiológica de solos sob diferentes usos para determinar a existência de condições necessárias à reintrodução do componente florestal na paisagem e direcionar as ações a serem implementadas para a recuperação dos ambientes degradados.

Métodos

Foram conduzidos dois estudos diagnósticos relacionados à microbiologia do solo na área do Comperj. No primeiro foram comparados os parâmetros microbiológicos entre solos de floresta e de pastagem existentes em diferentes posições da encosta nos compartimentos Proterozoico e Terciário. No segundo estudo foram comparados parâmetros microbiológicos em solos com diferentes coberturas vegetais e profundidades em áreas do compartimento Proterozoico.

Estudo 1

No compartimento Proterozoico foram selecionadas duas encostas (áreas de relevo montanhoso) com floresta (PF1 e PF2) e quatro com pastagem (PN1, PN2, PI1 e PI2). No compartimento Terciário, para fins comparativos, selecionaram-se duas encostas com

floresta (TF1 e TF2) e quatro encostas com pastagem (TN1, TN2, TI1 e TI2), totalizando 12 áreas de amostragem. Todas as áreas de pastagem do Comperj estão sem uso desde 2008, encontrando-se predominantemente vegetadas por espécies de braquiária (Capítulo 13) no momento da amostragem. A localização exata dos pontos amostrados é apresentada no Capítulo 2 (Figura 2.2).

Para a coleta das amostras, realizada de 11 a 13 de maio de 2010, as encostas foram divididas em terços: superior, médio e inferior. No centro de cada terço foi definido um transecto de 20 m, ao longo do qual foram retiradas seis amostras simples, coletadas na profundidade de 0 a 5 cm, para integrarem uma amostra composta representativa desse terço (Figura 9.1). Imediatamente após a coleta, as amostras foram passadas em peneira de 2 mm, acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e armazenadas em caixa térmica com gelo. Após o transporte ao laboratório, foram mantidas a 4 °C até o momento da análise.

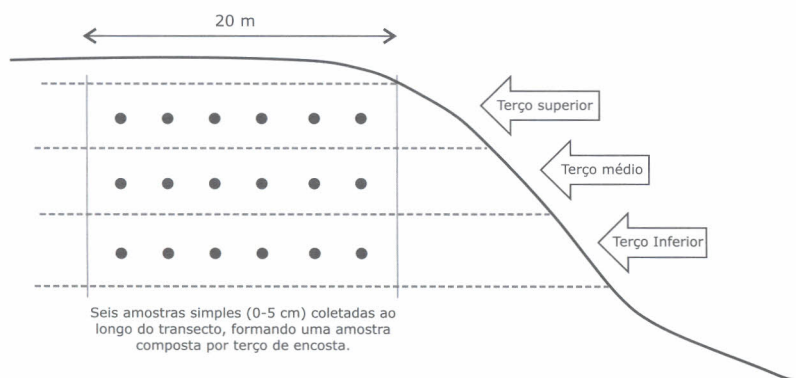


Figura 9.1. Esquema do procedimento de amostragem de solos em encostas dos compartimentos Terciário e Proterozoico.

As amostras foram analisadas quanto à atividade enzimática, com determinações de fosfatase (TABATABAI, 1994), fenol-oxidase (SINSABAUGH et al., 1999) e hidrólise de diacetato de fluoresceína (FDA) (SCHURER; ROSSWALL, 1982). Para quantificação de CBM, utilizou-se o método de fumigação-extração (VANCE et al., 1987), com determinação por colorimetria (BARTLETT; ROSS, 1988). A respiração basal do solo (RBS) foi avaliada pelo método de incubação do solo por

10 dias em recipiente hermético contendo hidróxido de sódio como armadilha de CO₂ (ISERMEYER, 1995). O valor de $q\text{CO}_2$ correspondeu à razão entre RBS e CBM.

Todas as variáveis biológicas mensuradas foram testadas estatisticamente ($p < 0,05$) para três fatores: compartimento geológico (Proterozoico ou Terciário), cobertura vegetal (pastagem ou floresta) e interação entre cobertura vegetal e compartimento. Dessa forma, as áreas de pastagem a serem futuramente reflorestadas, tanto por plantio de mudas quanto por manejo da regeneração natural, foram contrastadas em conjunto em relação às áreas florestais. As diferenças entre as posições na encosta (terços) também foram testadas dentro de cada compartimento e tipo de cobertura vegetal.

Estudo 2

Para o segundo estudo selecionaram-se três encostas no compartimento Proterozoico contendo coberturas vegetais diferenciadas: (1) encosta com remanescente de floresta, em Latossolo Amarelo Distrocoeso típico A moderado, de textura muito argilosa (PF1); (2) encosta com floresta em que predomina cambará (*Gochnatia polymorpha* Less.), em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico argissólico A moderado, de textura muito argilosa (PF2); e (3) encosta com pastagem, em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico em fase erodida, de textura argilosa nos terços médio e superior e textura muito argilosa com A moderado no terço inferior (PN1). Essas classes de solo são descritas no Capítulo 1.

Em cada encosta foram colhidas amostras de solo nas profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 10 cm, nas três posições (terços inferior, médio e superior). De cada ponto de coleta extraiu-se uma amostra composta, formada por cinco amostras simples. Em cada posição da encosta foram determinadas as características físico-hídricas dos solos.

Para a caracterização microbiológica, determinaram-se os seguintes indicadores: CBM, RBS e $q\text{CO}_2$. Para a determinação de CBM foi utilizado o método da fumigação-extração de Vance et al. (1987), com adaptações de Silva et al. (2007a). Os valores de RBS e $q\text{CO}_2$ foram determinados de acordo com a metodologia de Jenkinson e Powlson

(1976), modificada por Silva et al. (2007b).

Resultados e discussão

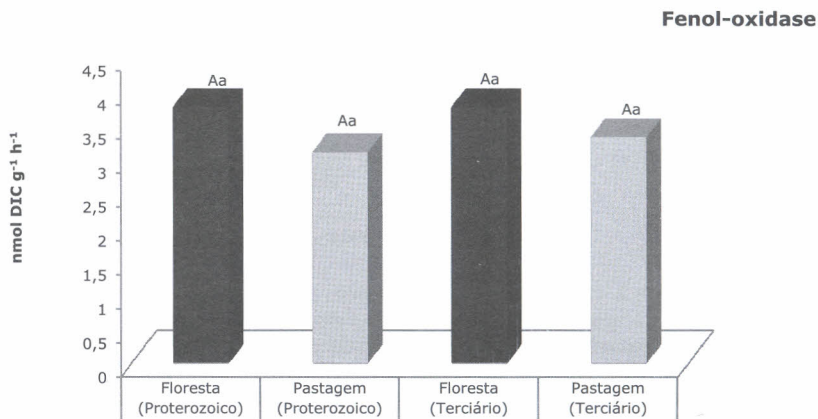
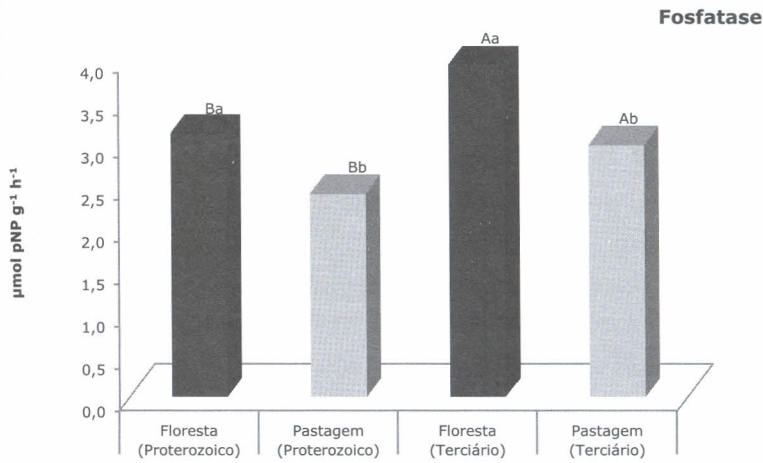
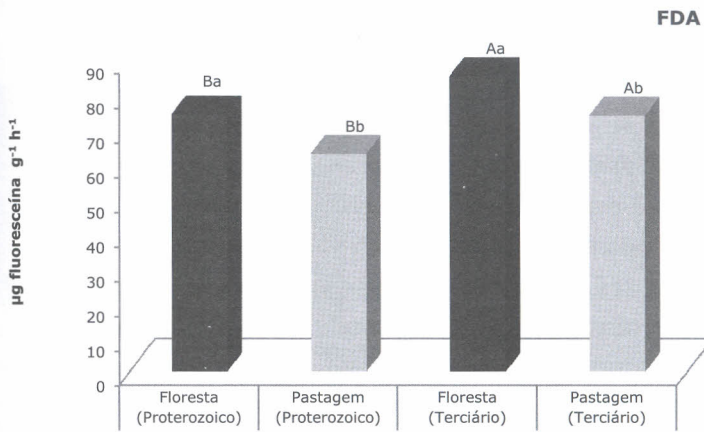
Estudo 1

Comparações entre posições de encosta

Da comparação das variáveis microbiológicas avaliadas entre os terços superior, médio e inferior, dentro de cada componente geológico e cobertura vegetal, não resultaram diferenças estatisticamente significativas (dados não apresentados). Esse resultado é de certa forma inesperado, em razão dos maiores teores de umidade, de nutrientes e de matéria orgânica esperados no terço inferior da encosta, que deveriam se refletir em uma microbiota mais abundante e ativa que a de solos provenientes de terços médios e superiores. É possível que fatores relacionados ao histórico de uso do solo das áreas pesquisadas, como por exemplo o uso mais intensivo das partes mais baixas da encosta, tenham causado redução da biomassa e da atividade microbiana. Em função da ausência de diferenças entre posições na encosta, esse fator foi desconsiderado na apresentação dos demais resultados, a seguir.

Comparações entre compartimentos geológicos

A atividade de todos os três grupos de enzimas do solo foi maior nas áreas do compartimento Terciário do que nas do Proterozoico (Figura 9.2). O padrão inverso foi observado para CBM, atividade de respiração do solo e $q\text{CO}_2$, embora não se tenham encontrado diferenças em CBM entre essas áreas, independente do tipo de vegetação. Esses resultados demonstram que os solos proterozoicos analisados possuem biomassa microbiana maior e mais ativa, embora menos eficiente na conservação do carbono do solo, do que os solos terciários.



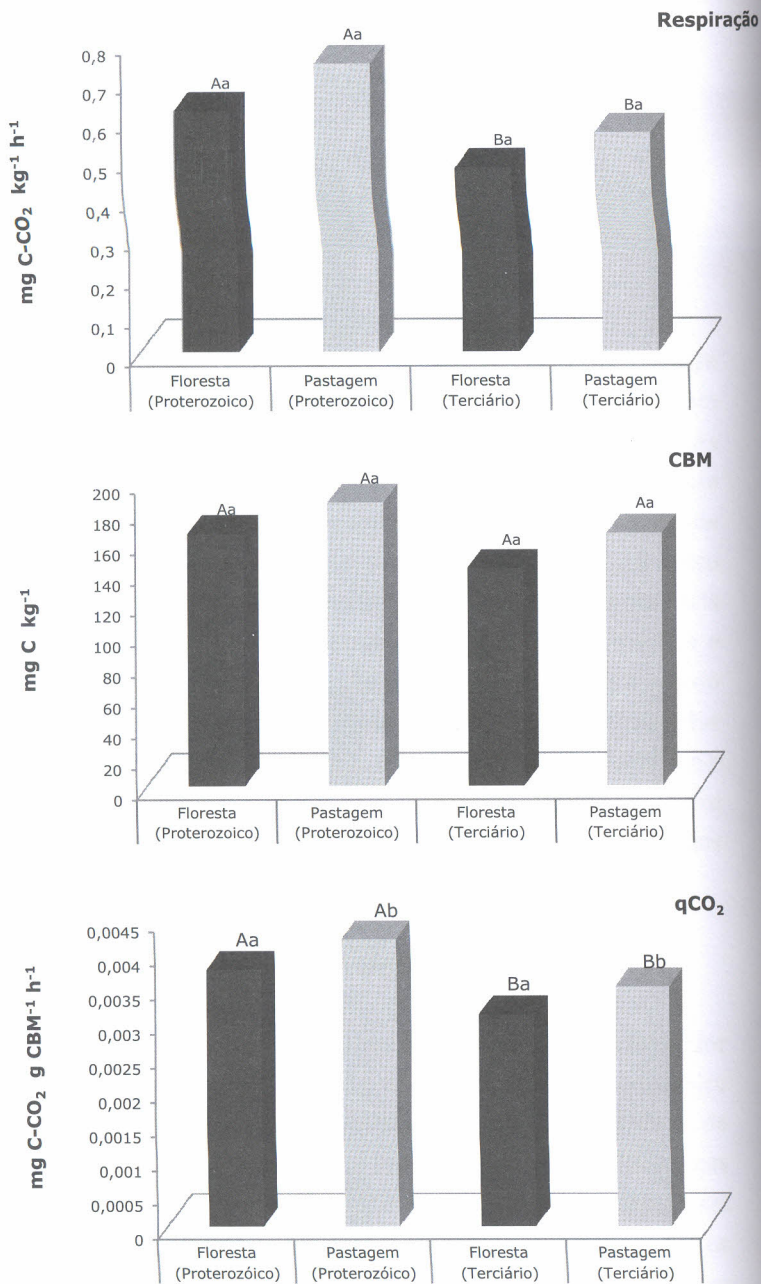


Figura 9.2. Taxas de atividade enzimática e respiratória, carbono da biomassa microbiana (CBM) e quociente metabólico (qCO_2) em áreas de pastagem e florestas localizadas nos compartimentos Proterozoico e Terciário. (Barras encimadas por letras maiúsculas semelhantes não diferem quanto ao compartimento geomorfológico. Aquelas encimadas por letras minúsculas semelhantes não diferem quanto ao tipo de cobertura vegetal dentro de cada compartimento geomorfológico.)

Os resultados das análises de atividade enzimática e respiratória e da quantificação de CBM e qCO_2 são apresentados na Figura 9.2. Nas áreas de floresta, as taxas de atividade de fosfatases e de hidrólise de FDA foram maiores que nas de pastagem, o que pode estar relacionado à maior diversidade da vegetação e ao maior aporte de serapilheira e carbono ao solo da floresta. Esses fatores, reconhecidamente, afetam de modo direto a composição e atividade microbiana do solo. Apesar das diferenças encontradas nas fosfatases e na hidrólise de FDA entre as áreas de floresta e pastagem, não se constatou diferença significativa na atividade de fenol-oxidase, embora essa variável tenha apresentado tendência similar às das outras duas medidas de atividade enzimática (Figura 9.2).

As fenol-oxidases são produzidas quase que exclusivamente por fungos e estão geralmente relacionadas à decomposição de lignina ou de formas de carbono orgânico recalcitrantes do solo. Dessa forma, alterações na atividade desse grupo enzimático podem indicar tanto diferenças na composição microbiana dessas áreas (maior predominância de fungos) quanto diferenças no potencial de ciclagem de formas de carbono mais estáveis do solo nesses ambientes.

Não foram observadas diferenças nas variáveis RBS e CBM em relação ao tipo de cobertura vegetal (Figura 9.2). No entanto, a atividade de respiração por unidade de biomassa, expressa por qCO_2 , foi significativamente maior nas áreas de pastagem. Segundo Anderson e Domsch (1995), esse resultado sugere que a biomassa microbiana de solos florestais é mais eficiente na utilização do carbono disponível do que a de solos de pastagem. Tal eficiência pode estar relacionada à composição e diversidade da microbiota de cada área e a diferenças nas propriedades físicas e químicas do solo.

Estudo 2

Influência da cobertura vegetal, da profundidade de amostragem e das características físicas nos parâmetros microbiológicos do solo

Os valores de RBS e de CBM indicaram maior atividade microbiana na camada superficial (0 a 5 cm de profundidade), independente do tipo de cobertura vegetal (Tabela 9.1). Nessa camada, porém, os indicadores microbiológicos não diferiram significativamente entre as tipologias de vegetação analisadas.

O solo sob floresta no compartimento Proterozoico (PF1) apresentava, na época das coletas, boa cobertura de serapilheira, com pouca diferença no desenvolvimento das árvores ao longo da encosta. Por outro lado, na área em processo de recuperação em que predominam cambarás (PF2), o solo apresentava um gradiente bem definido de crescimento das árvores, cujas alturas diminuía do terço inferior ao terço superior da encosta, com respectivas alterações no recobrimento do solo. No solo sob pastagem abandonada (PN1), a cobertura do solo era homogênea ao longo da encosta, mas as amostras coletadas no terço superior apresentaram teor de umidade maior que as demais. Uma vez que os parâmetros microbiológicos do solo são fortemente influenciados por condições ambientais (principalmente temperatura e umidade), esperavam-se maiores teores de CBM e menores taxas de RBS na área de floresta do que na de pastagem. De forma semelhante, previa-se que na área com cambarás houvesse maior atividade microbiana no terço inferior do que no terço superior, dada a grande diferença no porte das árvores. É possível que a maior exposição do solo a variações de temperatura e umidade decorrentes das coberturas vegetais presentes nos locais tenha mascarado os resultados dos parâmetros microbiológicos.

Tabela 9.1. Respiração basal do solo (RBS) e carbono da biomassa microbiana (CBM) em áreas com diferentes tipologias, posições na encosta e profundidades de solo (Estudo 2).

	RBS (g C-CO ₂ kg ⁻¹ solo h ⁻¹)		CBM (mg C kg ⁻¹ solo)	
	0 a 5 cm	5 a 10 cm	0 a 5 cm	5 a 10 cm
Floresta (PF1)				
Superior	0,84	0,55	221	196
Médio	0,94	0,53	213	160
Inferior	0,89	0,57	205	144
Cambará (PF2)				
Superior	0,9	0,58	211	193
Médio	0,81	0,53	229	193
Inferior	1,05	0,5	214	125
Pastagem (PN1)				
Superior	1,39	0,7	233	145
Médio	0,84	0,67	130	129
Inferior	1,07	0,78	158	113

Apesar da ausência de diferenças entre CBM e RBS na camada mais superficial, os dados obtidos na camada de 5 a 10 cm de profundidade expressaram diferenças nos indicadores microbiológicos do solo em função do tipo de cobertura. Constatou-se nos solos sob pastagem um aumento de RBS e uma diminuição de CBM em comparação com a floresta e a área com predomínio de cambará (Tabela 9.1).

Os solos sob pastagem apresentaram maior densidade e menor macroporosidade que os demais (Tabela 9.2), indicando compactação (dados completos são apresentados no Capítulo 7). Nas áreas sob floresta constatou-se macroporosidade mais adequada ao desenvolvimento vegetal, com maiores volumes de macroporos e de aeração. A compactação diminui a quantidade de macroporos do solo, dificultando as trocas gasosas, o fluxo de água e a penetração de raízes, o que pode dificultar a atividade de microrganismos, levando a uma diminuição da biomassa microbiana e um aumento de sua respiração, bem como ao estabelecimento e desenvolvimento de plantas.

Tabela 9.2. Caracterização físico-hídrica do solo no horizonte superficial em três posições na encosta (Estudo 2).

Vegetação e terço da encosta	Horizonte superficial	Densidade (kg dm ⁻³)	Porosidade (cm ³ cm ⁻³)			Água disponível (cm ³ cm ⁻³)
			Total	Macro	Aeração	
Floresta (PF1)						
Superior	A	1,129	0,563	0,174	0,178	0,048
Médio	A	1,067	0,645	0,272	0,276	0,040
Inferior	A	1,106	0,591	0,220	0,225	0,037
Cambará (PF2)						
Superior	Ap	1,250	0,509	0,188	0,199	0,046
Médio	Ap	1,400	0,448	0,128	0,135	0,061
Inferior	Ap	1,160	0,553	0,166	0,191	0,083
Pastagem (PN1)						
Superior	Ap	1,300	0,517	0,094	0,102	0,033
Médio	Ap	1,330	0,503	0,093	0,104	0,049
Inferior	BA	1,460	0,485	0,069	0,075	0,053

Os dados da Tabela 9.2 se refletem em qCO_2 , que é um indicador da eficiência do uso de carbono pela comunidade microbiana do solo ou da estabilidade ecológica do sistema. Menores quocientes metabólicos indicam ambiente de solo mais estável. Quocientes mais elevados, encontrados na pastagem (Figura 9.3), indicam menor estabilidade do sistema, que pode estar relacionada à menor porosidade e maior densidade do solo nessa área (Tabela 9.2). A diminuição da aeração e o aumento da densidade observados nos solos sob pastagem corresponderam a um aumento de RBS (Tabela 9.1), o que contribuiu para um aumento em qCO_2 . Por outro lado, os menores valores desse quociente encontrados no remanescente florestal estiveram relacionados a uma menor taxa de RBS, a uma menor densidade do solo e a maiores taxas de aeração, indicativos de solo de melhor qualidade nesse ambiente.

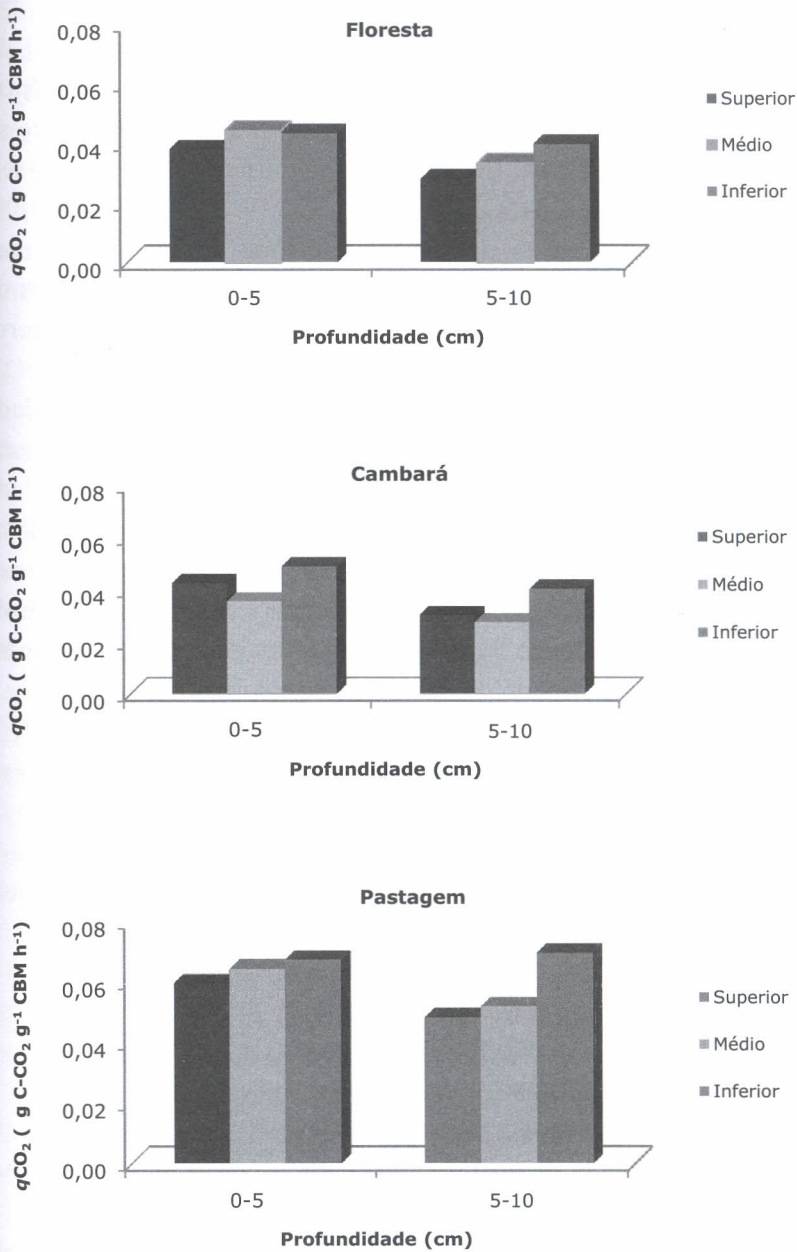


Figura 9.3. Quociente metabólico em solos sob diferentes coberturas florestais, em três posições na encosta (terços superior, médio e inferior) (Estudo 2).

Considerações finais

Os resultados obtidos prestam-se a servir como referência inicial para o monitoramento das áreas do Comperj durante o processo de recomposição florestal. Novas análises serão realizadas quatro e seis anos após o início do reflorestamento.

Esses dados iniciais revelam uma forte relação das propriedades microbiológicas e bioquímicas do solo com aquelas de caráter físico-hídrico, indicando a influência conjunta desses fatores sobre a qualidade do solo.

Constatou-se serem pequenas as diferenças de qualidade microbiológica do solo entre os ambientes de pastagem e de floresta, seja em termos da atividade e biomassa microbianas ou da estabilidade ecológica do solo, indicando que essa qualidade não constitui fator potencialmente restritivo à recuperação ambiental dessas áreas. Espera-se que o restabelecimento da cobertura florestal nas áreas de pastagem possa ao longo do tempo levar a um aumento da biomassa microbiana e da atividade de enzimas do solo, concomitantemente a uma redução de qCO_2 .

Agradecimento

Os autores agradecem ao técnico agrícola Fernando Cunha pelo apoio proporcionado nas campanhas de amostragem de solo.

Referências

- ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 10, p. 215-221, 1978.
- BARTLETT, R. J.; ROSS, D. S. Colorimetric determination of oxidizable carbon in acid soil solutions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 1191-1192, 1988.

ISERMEYER, H. Eine eingache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P. (Ed.). **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. San Diego: Academic Press Inc., 1995. p. 214-216.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. Method for measuring soil biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 8, p. 209-213, 1976.

SCHNÜRER, J.; ROSSWALL, T. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measurement of total microbial activity in soil and litter. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 43, p. 1256-1261, 1982.

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C)**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007a. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 98).

SILVA, E. E. da; AZEVEDO, P. H. S.; DE-POLLI, H. **Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO_2)**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2007b. (Embrapa Agrobiologia. Comunicado Técnico, 99).

SINSABAUGH, R. L.; KLUG, M. J.; COLLINS, H. P.; YEAGER, P. E.; PETERSON, S.O. Characterizing soil microbial communities. In: ROBERTSON, G. P. et al. (Ed.). **Standard soil methods for long-term ecological research**. New York: Oxford University Press, 1999.

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: WEAVER, R. W. et al. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison, WI: SSSA, 1994. Parte 2. (SSSA. Book Series, 5).

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 19, p. 703-707, 1987.