

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

FACULDADE DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

INDICADORES BIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO

JOSÉ ANTÔNIO KROEFF SCHMITZ

(Mestre em Fitotecnia, UFRGS)

Tese apresentada como um dos requisitos à obtenção
do Grau de Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil

Março/2003

Dedicada à minha amada Ana Luisa
e a meus filhos, Gabi e Léo,
pois são eles que dão
qualidade à minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Pedro Alberto Selbach, por sua confiança em mim, sua amizade, sua disponibilidade e apoio irrestrito e constante.

Ao professor João Mielniczuk, pelo seu jeito de ser e de ensinar: sábio, amigo e, ao mesmo tempo, simples e modesto – um exemplo a ser seguido.

Ao professor Flávio de Oliveira Camargo, pela amizade e incentivo, pelo apoio inicial e pelas primeiras idéias. Pela paixão contagiante pela ecologia microbiana.

À pesquisadora Iêda de Carvalho Mendes, da EMBRAPA Cerrados, pelo incentivo à distância, pela atenção e interesse pelo trabalho e pela ajuda indispensável.

Ao professor Valério de Patta Pillar e ao colega José Pedro Trindade, do Departamento de Ecologia, pela ajuda desinteressada.

Ao colega Luciano Kayser Vargas, pelo companheirismo, pelas trocas e a ajuda inicial com a metodologia da biomassa e respiração microbianas.

Aos funcionários Adão Luis Ramos da Silva e Luis Antônio da Silveira, por seu auxílio, pelos conselhos e pela colaboração dedicada ao longo do trabalho.

À funcionária Antônia Maria Silva Antunes, pela amizade, preocupação e cuidado, pelas conversas nas longas e solitárias horas de trabalho no laboratório.

Aos novos colegas de trabalho, na FEPAGRO de Erechim, pelo apoio e compreensão nesta reta final do trabalho.

Aos meus pais, Edmundo Henrique e Myriam, pelo carinho e estímulo, mas também pelo exemplo humano e profissional de ambos.

Aos meus filhos queridos, Gabriela e Leonardo, por me darem tanta alegria e força para viver e acreditar na vida.

À minha amada Ana Luisa, por estar sempre ao meu lado, me amando mesmo nos meus momentos de "solo descoberto":

INDICADORES BIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO

Autor: José Antônio Kroeff Schmitz

Orientador: Prof. Dr. Pedro Alberto Selbach

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar se as variáveis biomassa (BM) e respiração (RM) microbianas e as atividades de β -glucosidase, urease, amidase, fosfatase ácida e aril-sulfatase podem servir como indicadores biológicos de qualidade do solo. Foram realizados três estudos, utilizando um experimento de longa duração que avalia diferentes sistemas de culturas na recuperação do solo. No primeiro, as variáveis acima foram avaliadas durante um ano, e os resultados foram correlacionados com indicadores físicos, químicos e de produtividade dos tratamentos solo descoberto (SD), pousio/milho, aveia/milho, pousio/milho+labilab, aveia+vica/milho+caupi, guandu/milho+guandu e campo nativo (CN), buscando demonstrar a adequação de seu uso como indicadores biológicos de qualidade, além de observar seus comportamentos quanto a variações sazonais. No segundo, foi avaliada a influência da presença de raízes e da cobertura constante e integral do solo sobre a qualidade biológica, utilizando-se as variáveis acima para comparar o solo quando sob gramínea perene, sob dois sistemas de cultura de milho (com e sem leguminosa em consórcio) ou sob CN e SD. O terceiro estudo avaliou a qualidade do solo, segundo estas variáveis, em função da adição de N em cobertura no milho, em dois sistemas de cultura de milho (com e sem leguminosa em consórcio). Foram verificadas altas correlações entre as variáveis analisadas e teores de C orgânico e N total, além de outros indicadores de qualidade física e de produtividade do solo, confirmando a adequação de seu uso como indicadores biológicos de qualidade. Porém, como seu uso individual pode induzir a erros, foi proposta sua avaliação conjunta, em forma gráfica ou de índice, o que garante resultados mais abrangentes e integrados sobre a qualidade do solo. No segundo estudo, a elevada presença de raízes no tratamento com gramínea perene não garantiu a elevação dos valores das variáveis analisadas aos níveis do solo sob CN, indicando que estes possam estar relacionados à complexidade da comunidade vegetal presente sobre o mesmo e à diversidade microbiana dela resultante. No terceiro estudo, a adição de N em cobertura no milho, consorciado ou não com leguminosa, agiu seletivamente sobre a vida microbiana e sua atividade no solo, não alterando significativamente sua qualidade em termos biológicos. As variáveis avaliadas mostraram-se adequadas para a quantificação da qualidade biológica do solo, e seus resultados sugerem que a rotação e a consorciação de culturas são práticas recomendáveis para a recuperação e a manutenção da mesma em solos cultivados.

BIOLOGICAL INDICATORS OF SOIL QUALITY¹

Author: José Antônio Kroeff Schmitz

Adviser: Prof. PhD Pedro Alberto Selbach

ABSTRACT

The present research aimed at verifying whether microbial biomass-C, microbial respiration and the soil enzyme activities of B-glucosidase, urease, amidase, acid phosphatase and arylsulphatase can be used as biological indicators of the soil quality. Three studies were carried out using a long-term field experiment, which evaluates the effect of different crop management systems in soil restoration. In the first one, the variables described above were evaluated during a year and the results were correlated to physical and chemical soil parameters and to crop yields under six management systems, namely uncovered soil (US); fallow/corn; oat/corn; fallow/corn+labyrinth; oat+common vetch/corn + cowpea bean; guandu/corn+guandu and under another one: native pasture (NP). This aimed at showing the appropriateness of the use of such variables as biological quality indicators, as well as at observing their response to seasonal variations. In the second study, the influence of both the presence of roots and of the constant and complete covering of the soil over its biological quality were evaluated, using the variables above to compare the soil under cultivated perennial grass in two different management systems of corn crops (with and without legume consortiation) or under NP and US. In the third study, the same variables were used to analyse soil quality in two management systems of corn crops (with and without legume consortiation). High correlations between the variables under study and organic C and total N levels, besides other physical and yielding soil quality indicators were verified, confirming their usefulness as biological quality indicators. However, as the individual use of these variables can cause erroneous analyses, an integrated analysis was proposed, by graphic or numerical indices, in order to guarantee more complete and integrated results about the soil quality. In the second study, the high percentage of roots found in the cultivated pasture treatment did not lead to an increase in the levels of the variables analysed to the same level reached on the soil under NP, showing that the high NP results can be related to the complexity of the plant community found over it and to the microbial diversity resulting from the latter. In the last study, the addition of Nitrogen to corn (with or without legume consortiation) acted selectively over the microbial life and its activity in the soil, not altering significantly its quality in biological terms. The variables analysed proved adequate to determine the biological quality of the soil and the results obtained suggest that crop rotation and consortiation are advisable practices for the recovering and maintenance of this quality in cultivated soils.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
2.1. Novas visões sobre o sistema solo e suas implicações sobre formas de manejo e de avaliação de qualidade	
2.2. Qualidade do solo	
2.3. Indicadores de qualidade do solo	
2.3.1. Indicadores biológicos de qualidade do solo	
2.3.1.1. Biomassa Microbiana	
2.3.1.2. Atividade biológica do solo	
2.3.1.2.1. Respiração microbiana	
2.3.1.2.2. Atividade de enzimas de solo	
2.3.1.2.2.1. Atividade da β -glucosidase	
2.3.1.2.2.2. Atividade da urease	
2.3.1.2.2.3. Atividade da amidase	
2.3.1.2.2.4. Atividade da fosfatase	
2.3.1.2.2.5. Atividade da aril-sulfatase	
2.4. Enzimas de solo	
2.4.1. Localização e funções no solo	
2.4.2. Propriedades das enzimas do solo e seu comportamento neste ambiente	
2.4.3. Fatores do solo que afetam a atividade enzimática	
2.4.4. Aplicações do estudo de enzimas no ambiente solo-planta	

2.4.4.1. Uso de atividades enzimáticas como indicadores de fertilidade do solo	Pa
2.4.4.2. Uso de atividades enzimáticas na melhoria da eficiência de fertilizantes	
2.4.4.3. Uso de atividades enzimáticas como indicadores de interações rizosféricas	
2.4.4.4. Uso de atividades enzimáticas como indicadores do estado de oxi-redução do solo.	
2.4.4.5. Uso de atividades enzimáticas como indicadores de poluição no solo	
2.4.4.6. Uso de atividades enzimáticas na remediação de solos contaminados	
..	
2.4.4.7. Uso de atividades enzimáticas como indicadores em estudos de ecologia.	
2.4.4.8. Uso de atividades enzimáticas como indicadores de impactos de manejo e na avaliação da qualidade dos solos agrícolas.	
3. HIPÓTESES E OBJETIVOS.	
4. MATERIAL E MÉTODOS.	
4.1. Área experimental.	
4.1.1. Localização.	
4.1.2. Clima da região.	
4.1.3. Solo.	
4.2. Descrição do experimento avaliado	
4.3. Divisão em estudos	
4.3.1. Estudo 1 – Biomassa microbiana e atividade biológica como indicadores de qualidade de um solo sob diferentes coberturas vegetais ao longo de um ano de cultivo (2000 / 2001)	
4.3.1.1. Tratamentos e delineamento experimental	
4.3.1.2. Coleta, processamento e armazenagem de amostras	
4.3.1.3. Variáveis biológicas avaliadas	
4.3.1.3.1. Biomassa microbiana	
4.3.1.3.2. Atividade biológica do solo	

4.3.1.3.2.1. Respiração microbiana

4.3.1.3.2.2. Atividades de enzimas de solo .

a) β -glucosidase

Pa

b) Urease

c) Amidase

d) Fosfatase ácida

e) Aril-sulfatase

4.3.1.4. Variáveis químicas

4.3.1.5. Variáveis físicas

4.3.1.6. Variáveis de produtividade

4.3.1.7. Análise dos resultados

4.3.2. Estudo 2 – Qualidade de um solo sob pastagem cultivada e sob dois sistemas de cultura de milho (com e sem consórcio com leguminosa de verão) em relação aos tratamentos referência sob campo nativo e solo descoberto, avaliada por indicadores biológicos

4.3.2.1. Tratamentos e delineamento experimental.

4.3.2.2. Coleta, processamento e armazenagem de amostras

4.3.2.3. Indicadores biológicos, químicos, físicos e de produtividade

4.3.2.4. Análise dos resultados

4.3.3. Estudo 3 – Qualidade de um solo sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de nitrogênio mineral em cobertura, em relação aos tratamentos referência sob campo nativo e solo descoberto, avaliada por indicadores biológicos .

4.3.3.1. Tratamentos e delineamento experimental.

4.3.3.2. Coleta, processamento e

	armazenagem de amostras

	4.3.3.3. Indicadores biológicos, químicos, físicos e de produtividade

	4.3.3.4. Análise dos resultados

	5. RESULTADOS E DISCUSSÃO
	5.1. ESTUDO 1 - Biomassa e atividade microbianas como indicadores biológicos de qualidade de um solo sob diferentes coberturas vegetais ao longo de um ano de cultivo (2000 a 2001).
	5.1.1. Biomassa microbiana
	5.1.2. Atividade biológica do solo
	5.1.2.1. Respiração microbiana
	5.1.2.2. Atividades de enzimas de solo
	5.1.2.2.1. Atividade de β -glucosidase
	5.1.2.2.2. Atividade de urease
	5.1.2.2.3. Atividade de amidase
	5.1.2.2.4. Atividade de fosfatase ácida
	5.1.2.2.5. Atividade de aril-sulfatase
	5.1.3. Representação integrativa das variáveis biológica
	5.1.4. Índice biológico de qualidade do solo
	5.2. Estudo 2 - qualidade de um solo sob pastagem cultivada e sob dois sistemas de cultura de milho (com e sem consórcio com leguminosa de verão) em relação aos tratamentos referência sob campo nativo e solo descoberto, avaliada por indicadores biológicos
	5.3. Estudo 3 - Qualidade de um solo sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de nitrogênio mineral em cobertura, em relação aos tratamentos referência sob campo nativo e solo descoberto, avaliada por indicadores biológicos

	6. CONCLUSÕES
	7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
	8. APÊNDICES

RELAÇÃO DE TABELAS

01.	Tratamentos utilizados no estudo 1 e suas respectivas nomenclaturas.	74
02.	Tratamentos utilizados no estudo 2 e suas respectivas nomenclaturas.	93
03.	Tratamentos utilizados no estudo 3 e suas respectivas nomenclaturas.	96
04.	Biomassa microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).	162
05.	Respiração microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).	165
06.	Atividade de β -glucosidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).	168
07.	Atividade de urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).	171
08.	Interação dos fatores "sistemas de cultura" e "adição de N" sobre a atividade de urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico em fevereiro de 2002.	172

09.	Atividade de amidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).	174
-----	---	-----

10. Atividade de fosfatase ácida na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).	177
11. Atividade de aril-sulfatase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).	178
12. Valores dos indicadores biológicos em relação ao conteúdo de C orgânico na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).	184

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
01. Esquema ilustrando o conceito de solo como semelhante a um tecido vivo (extraído de Dick e Tabatabai, 1999).	34
02. Localização e categorias da atividade enzimática no solo (extraído de Ruggiero et al., 1996).	36
03. Esquema da área experimental (adaptado de Medeiros, 1985).	71
04. Biomassa microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001).	100
05. Respiração microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001).	107
06. Atividade da β -glucosidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001).	113
07. Atividade da urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001).	119
08. Atividade da amidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001).	123
09. Atividade da fosfatase ácida na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001).	126
10. Atividade da aril-sulfatase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001).	134
	Página
11. Representação integrativa das variáveis biológicas na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001).	139

12. Índice biológico de qualidade do solo (IBQS), na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001). 143
13. Biomassa microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). 146
14. Respiração microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). 148
15. Atividade de β -glucosidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). 149
16. Atividade de urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). 151
17. Atividade de amidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao

longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002).

153

Página

18. Atividade de fosfatase ácida na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002).

155

19. Atividade de aril-sulfatase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002).

156

20. Representação integrativa dos indicadores biológicos na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002).

158

21. Índice biológico de qualidade do solo (IBQS), na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho típico descoberto, sob pastagem cultivada e sob dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002).

159

22. Biomassa microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob duas formas de cultivo do milho, com e sem a adição de N, comparadas aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002.
- 164
23. Respiração microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob duas formas de cultivo de milho, com e sem adição de N, comparadas aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002).
- 166
24. Atividade da β -glucosidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob duas formas de cultivo do milho, com e sem a adição de N, comparadas aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002.
- 169
- Página
25. Atividade da urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob duas formas de cultivo do milho, com e sem a adição de N, comparadas aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002.
- 170
26. Atividade da amidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob duas formas de cultivo do milho, com e sem a adição de N, comparadas aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002.
- 173
27. Atividade da fosfatase ácida na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob duas formas de cultivo do milho, com e sem a adição de N, comparadas aos

tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002.

175

28. Atividade da aril-sulfatase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob duas formas de cultivo do milho, com e sem a adição de N, comparadas aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002.

179

29. Representação integrativa dos indicadores biológicos na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho típico sob duas formas de cultivo do milho, com e sem a adição de N, comparadas aos solos referência sob campo nativo e descoberto, no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002.

181

30. Índice biológico de qualidade do solo (IBQS), na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho típico sob duas formas de cultivo do milho, com e sem a adição de N, comparadas aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho, no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002.

183

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, é crescente o interesse da humanidade com as condições do ambiente no planeta. O solo é um recurso natural vital para a manutenção da vida sobre a terra, incluindo a do próprio homem. O crescimento de áreas para agricultura, devido ao aumento da população mundial, e o uso descuidado e intensivo dos solos têm levado a uma degradação acelerada dos mesmos, especialmente em áreas tropicais e sub-tropicais. Inventários sobre a capacidade produtiva dos solos indicam que a degradação induzida pelo homem corresponde a quase 40% de todas as terras cultivadas do mundo (Olderman, 1994).

No final do século passado, em vista desta realidade, a comunidade científica mundial iniciou a busca de formas objetivas de avaliar a qualidade do solo. Para tanto, surgiu também a necessidade de definir este termo, sendo que a definição atualmente mais aceita conceitua qualidade do solo como a capacidade do mesmo de funcionar dentro de um ecossistema de maneira a sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde vegetal e animal (Doran e Parkin, 1994).

Apesar do reconhecimento de que a qualidade do solo está intimamente ligada a seu adequado funcionamento, esta tem sido verificada ainda basicamente através de indicadores químicos e físicos, uma vez que a porção biológica do solo costuma ser de mais difícil quantificação. Entretanto, o solo é um corpo natural, dinâmico e vivo que desempenha diversas funções-chave nos ecossistemas terrestres (Doran e Parkin, 1994) como, por exemplo: servir como meio para o crescimento das plantas, regular o fluxo de água no ambiente, decompor materiais orgânicos e resíduos da atividade humana, ciclar nutrientes essenciais como C, N, P e S, podendo reduzir o efeito estufa através do seqüestro do C atmosférico, entre outras. Neste sentido, é fundamental que sua qualidade seja determinada também, e principalmente, por indicadores capazes de avaliar seu *status* biológico ou, melhor dizendo, seu *status* vital.

Para tanto, faz-se necessária a adequação e o aperfeiçoamento de técnicas de análise que possam servir como indicadores biológicos da qualidade do solo. Algumas delas, como as avaliações de biomassa e respiração microbianas já encontram-se suficientemente estabelecidas para serem utilizadas como indicadores de qualidade, sendo sua utilização praticamente essencial para qualquer avaliação desta natureza. No entanto, outros indicadores biológicos relacionados ao funcionamento do solo, especialmente no que diz respeito à ciclagem de nutrientes, tornam-se necessários quando se trata da avaliação da qualidade e da sustentabilidade dos solos agrícolas.

As avaliações de atividades enzimáticas do solo têm sido amplamente difundidas pela pesquisa agrônômica mundial, por seu potencial como indicadores de qualidade. No entanto, ainda não há um consenso sobre quais delas devem ser utilizadas, de que forma e em que situação. Por outro lado, a pesquisa agrônômica brasileira nesta área ainda é bastante incipiente, não havendo dados suficientes para permitir a recomendação do uso destas avaliações com vistas à quantificação da qualidade dos solos agrícolas.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a possibilidade do uso de algumas destas variáveis como indicadores biológicos da qualidade do solo. Para tanto, foram realizados três estudos avaliando o comportamento de variáveis como a biomassa microbiana e a atividade biológica do solo, medida por sua respiração e por cinco de suas atividades enzimáticas (β -glucosidase, urease, amidase, fosfatase ácida e aril-sulfatase), em diversos tratamentos envolvendo sistemas de cultivo e práticas de manejo instalados em um experimento, em andamento desde 1983, na Estação Experimental Agrônômica da UFRGS.

No primeiro estudo, estas variáveis foram observadas ao longo de um ano de cultivo, observando-se suas alterações no solo em função de diversos sistemas de cultivo, e comparando-as a seus níveis de referência para o local, em um tratamento não perturbado sob campo nativo. Foram também verificadas as correlações existentes entre os resultados obtidos para estas variáveis e indicadores físicos, de fertilidade química e de produtividade obtidos para os mesmos tratamentos, para demonstrar a adequação e a eficiência do uso das mesmas para a quantificação da qualidade do solo.

No segundo estudo, foram utilizadas as mesmas variáveis descritas acima para avaliar, em termos biológicos, a recuperação da qualidade de um solo sob um tratamento ainda não analisado do mesmo experimento, constituído de cobertura vegetal com pastagem perene de espécie única. Este tratamento foi comparado à referência sob campo nativo, a solo descoberto e a dois outros tratamentos de cultivo.

E no terceiro estudo, buscou-se verificar, por meio destas mesmas variáveis biológicas, a qualidade do solo em função do efeito da adição de N em cobertura no milho em dois sistemas de cultivo, e a comparação destes resultados aos obtidos no solo referência.

Por fim, foi proposta uma forma integrativa de representar graficamente a qualidade do solo em cada tratamento, tendo como referência os níveis atingidos pelas variáveis biológicas no solo sob campo nativo. Da mesma forma, foi proposto um índice que quantifica a qualidade do solo nos diversos tratamentos, a partir dos dados obtidos pelas avaliações biológicas realizadas, também tomando como referência seus respectivos níveis no tratamento sob campo nativo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Novas visões sobre o sistema solo e suas implicações sobre formas de manejo e de avaliação de qualidade

O solo é um corpo natural, dinâmico e vivo que desempenha diversas funções-chave nos ecossistemas terrestres (Doran e Parkin, 1994) e é, portanto, um dos componentes essenciais para a vida e a saúde da humanidade e de toda a vida no planeta.

No entanto, em todo o mundo, e em especial nos países tropicais, a intensificação da agricultura tem levado a sua degradação acelerada. Alguns levantamentos realizados recentemente dão conta de que a degradação induzida pelo homem corresponde atualmente a quase 40% de todas as terras cultivadas do mundo (Olderman, 1994). No Brasil, existem estimativas que indicam a perda de 2 a 2,5 bilhões de toneladas de solo anualmente, por efeito da erosão hídrica (Corrêa, 2000).

Assim como a degradação do solo, os métodos para recuperá-lo são bastante antigos e conhecidos. No entanto, o desenvolvimento tecnológico da humanidade tem aumentado em muito a complexidade dos problemas relativos à qualidade do solo e a urgência em solucioná-los.

Da mesma forma, o avanço da compreensão do funcionamento do sistema solo tem permitido ampliar os conhecimentos sobre os métodos para sua recuperação e conservação e sobre as metodologias mais adequadas para avaliar sua saúde e qualidade. Este avanço na ciência do solo tem ocorrido juntamente com as alterações da forma como ele é visto pela ciência ao longo do tempo.

De acordo com a visão mais "tradicional" do solo, estabelecida juntamente com a chamada "revolução verde", este era visto apenas como um substrato para o cultivo de plantas, cujas deficiências físicas e químicas poderiam facilmente ser corrigidas com manejos físicos e químicos que o alterassem adequadamente, sem que fosse necessário levar em conta suas condições biológicas. Segundo Swift (1998), a abordagem tradicional de manejo agrícola buscava ultrapassar ou mesmo inibir as diversas funções desempenhadas pelos microrganismos no solo, e, freqüentemente, rompia ou destruía a estabilidade e a resiliência do ecossistema.

No final da década de 30 do século passado, o cientista Ludwig von Bertalanffy iniciou o desenvolvimento do pensamento sistêmico, que passou a influenciar diversos outros campos da ciência, especialmente a cibernética e a ecologia (Capra, 1996). Bertalanffy formulou o primeiro arcabouço teórico abrangente que descrevia os princípios de organização dos sistemas vivos. De acordo com sua proposição, os sistemas vivos são sistemas "abertos", pois contradizem a segunda lei da termodinâmica, a lei da dissipação da energia, segundo a qual, qualquer sistema isolado, ou "fechado", encaminhar-se-á necessariamente para uma desordem (ou entropia) sempre crescente. Segundo ele, os sistemas vivos são considerados sistemas abertos, pois precisam alimentar-se de um contínuo fluxo de matéria e de energia extraídas do seu meio ambiente para permanecerem vivos.

Baseado nesta proposição de Bertalanffy, Addiscot (1992) propõe que o solo seja visto como um sistema aberto, que troca energia e matéria com o meio, tendendo sempre a um estado distante do equilíbrio termodinâmico, caracterizando-se, portanto, por predominância dos processos de ordenação sobre os processos dissipativos ao longo do tempo. Desta forma, conforme Addiscot (1992), a fotossíntese e a formação de húmus representariam os processos de ordenação, pois constróem estruturas complexas e ordenadas, contendo substâncias de alto peso molecular a partir de moléculas pequenas como CO_2 , H_2O e NH_3 , enquanto os processos como a respiração, a senescência e a degradação do húmus representariam os processos dissipativos, pois degradam estas estruturas novamente de volta a moléculas pequenas. Segundo o mesmo autor, nos processos naturais ou nos processos antrópicos de recuperação de solos, ocorre um desbalanço deste equilíbrio no sentido da ordem. Este aumento de ordenação reflete-se no acúmulo de compostos orgânicos de alto peso molecular (húmus), na tendência maior de floculação das partículas, no conseqüente aumento do tamanho das mesmas e na redução de seu número (agregação de partículas), resultando no desenvolvimento da estrutura do solo.

Esta nova visão do solo como um sistema aberto – e, portanto, vivo -, fornecida por Addiscot, tem sido um grande avanço para a ciência do solo, já que deixa de lado uma visão mecanicista de seu funcionamento, passando a percebê-lo como um sistema dinâmico, e regido essencialmente pelas mesmas leis que regem a vida.

A atual visão sobre sustentabilidade dos sistemas agrícolas concorda com as proposições de Addiscot sobre a dinâmica da matéria orgânica para a qualidade do sistema solo (Greenland et al., 1992; Larson e Pierce, 1994; Mielnickzuk, 1999) e com a importância da recuperação dos seus teores de carbono orgânico (C_{org}) e

nitrogênio (N) do solo . Também baseados nos fluxos de matéria e energia, foram criados, nas últimas duas décadas, diversos modelos matemáticos e computacionais baseados nos teores de C_{org} e N presentes, consumidos e adicionados ao solo, com o objetivo de recuperar sua fertilidade e qualidade (Dalal e Mayer, 1986; Parton et al., 1987; Paustian et al., 1992).

Após as proposições de Bertalanffy, no entanto, a visão sobre o funcionamento dos sistemas vivos continuou sendo ampliada. Na década de 60, Ilya Prigogine desenvolveu uma nova termodinâmica não-linear para descrever o fenômeno da auto-organização em sistemas abertos afastados do equilíbrio (Capra, 1996). Ele introduz a noção de "estrutura dissipativa" para definir estes sistemas, a fim de enfatizar a estreita associação, nessas situações, entre estrutura e ordem, de um lado, e de dissipação, de outro (Prigogine, 1996). De acordo com Prigogine, as estruturas dissipativas não só se mantêm num estado estável afastado do equilíbrio, como podem até mesmo evoluir – característica principal desta visão que a diferencia da visão dos sistemas abertos de Bertalanffy. Quando o fluxo de energia e de matéria que passa através delas aumenta, elas podem experimentar nova instabilidade e se transformar, alcançando novos estados de ordem com complexidade sempre crescente. Nestas condições, surgem novas propriedades inerentes ao sistema, chamadas de "propriedades emergentes", que habilitam o mesmo a exercer múltiplas novas funções (Capra, 1996).

Os novos conceitos lançados por Prigogine dos sistemas vivos como "estruturas dissipativas" têm, aos poucos, se refletido sobre a visão científica do sistema solo. Recentemente, Vezzani (2001) apresentou seu trabalho de doutorado, no qual interpreta este sistema segundo esta nova visão. Neste sentido, segundo a autora, o fluxo de energia e matéria ocorre através dos compostos orgânicos provenientes da matéria vegetal produzida pelas plantas e transformada pelos microrganismos. A partir da entrada dos compostos orgânicos, o sistema solo se auto-organiza, através das relações não-lineares entre os subsistemas mineral, plantas e microrganismos, e atinge estados de ordem conforme o fluxo que por ele passa. Ainda segundo a autora, estes estados de ordem podem ser melhor representados pelo processo de agregação do solo, onde ocorre a formação de estruturas por interações organo-minerais e ação direta das plantas e organismos. Estas estruturas possuem, segundo a autora, níveis de ordem que se elevam conforme aumentam as interações, e com isto, seguem uma hierarquia, a qual representa a história dos sistemas abertos, no sentido de que a estrutura atual foi formada a partir de estruturas menores formadas anteriormente. Desta forma, um solo de qualidade seria aquele com um estado de ordem em nível alto, caracterizado pela presença de estruturas complexas e diversificadas e grande quantidade de energia e matéria retida, gerando propriedades emergentes que capacitam o mesmo a exercer suas funções (Vezzani, 2001).

No entanto, como esclarece Capra (1996), todo sistema vivo pode ser considerado uma "estrutura dissipativa", porém nem todas as "estruturas dissipativas" são organismos ou sistemas vivos, já que a própria teoria de Prigogine foi desenvolvida a partir de estudos sobre sistemas físicos e químicos. Neste caso, ainda há algo mais que diferencia os sistemas vivos das estruturas dissipativas, descritas por este autor.

Neste sentido, mais recentemente, na busca de definições e de compreensão sobre o funcionamento dos sistemas vivos, surge a visão formulada por Humberto Maturana e Francisco Varela, segundo a qual, os sistemas vivos são vistos como "sistemas autopoieticos", isto é, sistemas auto-organizadores e auto-reprodutores (Maturana e Varela, 1995). Os autores verificaram que, uma vez que o padrão da "autopoiese" é a característica que define um ser vivo, não há, na natureza, um sistema autopoietico mais simples do que uma célula. Neste sentido, sua proposta é a de que os seres vivos caracterizem-se por, literalmente, produzirem-se continuamente a si mesmos. Fleischaker (1990), citado por Capra (1996), definiu as propriedades de uma rede autopoietica em termos de três critérios: o sistema deve ser autolimitado, autogerador e autoperpetuador. Ser autolimitado, segundo o autor, significa que a extensão do sistema é determinada por uma fronteira que é parte integral da rede; ser autogerador significa que todos os componentes, inclusive os da fronteira, são produzidos por processos internos da rede; ser autoperpetuador significa que os processos de produção continuam ao longo do tempo, de modo que todos os componentes são continuamente repostos pelos processos de transformação do sistema.

Segundo Capra (1996), seria preciso concordar com Maturana e Varela a respeito do fato de que os muitos caminhos e processos num ecossistema ainda não são conhecidos em detalhes suficientes para se decidir se essa rede ecológica pode ser descrita como autopoietica. No entanto, conforme o mesmo autor, quando desviamos nossa percepção dos ecossistemas para o planeta como um todo, encontramos uma rede global de processos de produção e de transformação, que foram descritos, com alguns detalhes, na teoria de Gaia, de James Lovelock (Lovelock, 1979) e Lynn Margulis (Margulis, 2001). Neste sentido, se o sistema solo não pode ser considerado ele mesmo como um sistema autopoietico, especialmente em função da falta de um claro entendimento de suas fronteiras, por outro lado, é possível sugerir que, segundo a teoria proposta por Lovelock e Margulis, ele constitua um sub-sistema fundamental para o funcionamento do sistema planetário maior, denominado pelos autores de Gaia. Neste sentido, Dick & Tabatabai (1999) afirmam que o solo pode ser entendido como uma entidade biológica similar a um "tecido vivo com reações bioquímicas complexas". Segundo os mesmos autores, a superfície do solo pode ser considerada análoga a uma membrana celular, já que regula as trocas de ar, água e outros materiais. Além disto, a interação entre os diversos processos metabólicos do solo é regulada de forma muito semelhante aos processos celulares: ocorrem inibições em "feedback", induções de atividades enzimáticas, secreções e impactos de pH, força iônica, temperatura e da presença de inibidores.

Desta forma, admitindo-se que o solo é um sistema vivo, é preciso considerar o que dizem Maturana e Varela (1995): o comportamento de um organismo (ou sistema) vivo é determinado, não por forças externas, mas pela própria estrutura deste organismo (ou sistema). Desta forma, ele não *reage* aos estímulos ambientais (ou antropogênicos) por meio de uma cadeia linear de causa e efeito, mas *responde* com mudanças estruturais em sua rede autopoietica não linear. Atlas e Bartha (1993) explicam e exemplificam este comportamento, afirmando que as comunidades microrgânicas heterogêneas presentes no solo apresentam mecanismos homeostáticos que tendem a manter uma estabilidade das condições

do solo, reagindo a influências externas como, por exemplo, a adição de microrganismos estranhos que poderiam perturbar a composição biológica daquele solo.

Pela premissa apresentada acima, depreende-se que a simples adição de material orgânico em quantidades iguais ou superiores ao que é decomposto pelo sistema solo não garante sua qualidade e saúde, já que sua comunidade microbiana responde a estas adições conforme sua própria programação, a qual possivelmente não venha a resultar em condições sanitárias apropriadas para culturas subseqüentes.

Neste sentido, visões mais simples e populares como a apresentada por DeLuca (1995), muitas vezes tornam-se úteis no sentido de aprofundar a visão da ciência sobre o solo. Este autor, através de uma analogia entre o solo e o corpo humano, questiona a maneira predominante de "alimentação" dos solos, constituída de fertilizações químicas e adições de resíduos de monoculturas (constituídos basicamente de celulose, hemicelulose e de alguma lignina), identificando-a com uma dieta humana de "pão branco e água", e indaga se esta "dieta" não seria a responsável pelos prejuízos em sua saúde, identificados por sintomas como compactação, baixo desenvolvimento radicular e reduzida quantidade e diversidade de seres vivos dos solos agrícolas assim conduzidos, quando comparados a seus solos virgens correspondentes. Este questionamento parece pertinente, pois relaciona a qualidade e a saúde do solo com a qualidade e a diversidade dos materiais por ele reciclados, bem como com as respostas (nem sempre lineares) do próprio solo a estas adições.

Segundo Beare et al. (1995), a composição e estrutura da comunidade vegetal determina direta ou indiretamente, provavelmente mais do que qualquer outro fator biológico, as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos. Segundo estes autores, plantas individuais podem apresentar zonas de influência marcadamente diferentes no solo. A diversidade de vegetais sobre o solo leva à diversidade da exploração dos espaços do solo pelas raízes, à diversidade de composição de tecidos vegetais e de exudatos radiculares, a qual leva, por sua vez, à diversidade da biota do solo, que retroalimenta esta biodiversidade, abrindo novos nichos para a vida vegetal, e assim por diante.

Desta forma, conforme Tiedje et al. (2000), os ambientes criados nos solos possivelmente sustentem a mais complexa comunidade biológica dentre os ambientes presentes no planeta, caracterizando-se por altas densidades populacionais, alta diversidade microbiana - a qual é produto de mais de 3,5 bilhões de anos de evolução -, e uma ampla faixa de variação de condições físicas e químicas. Conforme estes autores, esta heterogeneidade ambiental é encontrada especialmente na camada superficial dos solos, basicamente em função da multiplicidade de recursos orgânicos nela presentes.

Kennedy e Smith (1995) enfatizam a importância da manutenção da biodiversidade microbiológica do solo para a sustentabilidade dos agroecossistemas. Degens et al. (2001), por sua vez, afirmam que a redução da diversidade catabólica e mudanças nas propriedades do solo em função de seu uso podem reduzir a resiliência das comunidades microbianas ao estresse ou à perturbação. Em função disto, Kennedy e Smith (1995) propõem que a avaliação da resiliência do sistema solo a perturbações pode contribuir em muito para a

compreensão de sua qualidade. Acreditam também que a associação entre investigações sobre diversidade e o funcionamento do solo poderão auxiliar no deciframento do significado e do uso da diversidade funcional do solo, e que, em se tratando de agroecossistemas, as funções mais importantes a serem observadas são as que envolvem a ciclagem de nutrientes, a manutenção da estrutura do solo, a antibiose, etc. Avaliam, no entanto, que, no atual estado do conhecimento, ainda é praticamente impossível compreender a totalidade do funcionamento do sistema solo.

Segundo Swift (1998), uma abordagem biologicamente dirigida fornece um conceito mais amplo e ecológico de manejo do solo. Nos últimos anos, ainda segundo o mesmo autor, um conceito alternativo de "manejo biológico" tem sido proposto. Este enfoca a manipulação da comunidade biológica e seus processos no solo, bem como suas propriedades físico-químicas. Ainda segundo Swift (1998), o componente biológico do solo é responsável por inúmeras de suas funções, podendo-se reconhecer cinco principais maneiras pelas quais a microbiota do solo pode influenciar sua fertilidade e a produtividade vegetal, quais sejam: a aquisição de nutrientes em associações com os vegetais; a decomposição de detritos animais e vegetais; uma longa série de transformações de elementos específicos, incluindo carbono, nitrogênio, fósforo e outros ciclos de nutrientes; a síntese e decomposição da matéria orgânica do solo; e a modificação da estrutura do solo e de sua capacidade de armazenamento de água. Além disto, a microbiota do solo também inclui os patógenos e seus inimigos naturais.

De acordo com Beare et al. (1995), a diversidade funcional de um solo pode ser grandemente ampliada em função da amplitude da diversidade de espécies nele presente. Esta amplitude, segundo estes autores, permite fazer inferências sobre a redundância funcional de determinado solo. Franklin (1993), no entanto, argumenta que a perda de espécies não se refletirá necessariamente em uma mudança na velocidade dos processos biológicos e das transformações bioquímicas do solo. No entanto, embora o fenômeno da redundância em uma única função seja comum entre muitos organismos do solo, é muito pouco provável que esta redundância ocorra para o conjunto de funções atribuível a cada espécie. Da mesma forma, organismos funcionalmente similares com frequência possuem tolerâncias ambientais, necessidades fisiológicas e preferências de micro-habitats diferentes (Beare et al., 1995), permitindo inferir que eles sejam responsáveis também pela execução de diferentes papéis no sistema solo. Desta forma, conforme Price (1988), quanto mais complexas as interações bióticas, maior será a probabilidade de que efeitos indiretos possam ser importantes na regulação do funcionamento do sistema solo, sendo esta, portanto, a importância da diversidade que sustenta estas interações complexas na regulação dos processos que determinam a ciclagem biogeoquímica.

2.2. Qualidade do solo

O solo é um recurso natural chave que interage com as comunidades vegetais e animais acima dele, constituindo-se, portanto, em um fator crítico para a manutenção de qualquer ecossistema terrestre que se deseja manejar. Assim, a conceituação do termo "qualidade do solo" é fundamental para a definição dos rumos a serem adotados nos manejos e práticas agrícolas que o envolvem.

Definições amplas descrevem a qualidade do solo como a capacidade sustentável de um solo de absorver, armazenar e reciclar água, nutrientes e energia (Anderson e Gregorich, 1983, citados por Gregorich et al., 1994).

Johnson et al. (1997) ampliam a discussão da definição de qualidade do solo, afirmando que a mesma está relacionada com as necessidades, a saúde, o bem estar e/ou as percepções das espécies envolvidas, incluindo o homem, sendo definida por estes autores como uma medida da condição do solo relativa aos requerimentos de uma ou mais espécies e/ou a qualquer necessidade ou propósito humano. Esta definição dá margem a que a qualidade seja definida apenas em função de determinado propósito humano, o qual muitas vezes pode ter objetivos de curto prazo, não levando em conta a sustentabilidade dos manejos adotados e/ou do próprio ecossistema envolvido.

Já Larson e Pierce (1991), citados por Santana e Bahia Filho (1999), introduzem a preocupação ambiental em sua definição, sugerindo que a qualidade de um solo seja considerada como composta de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, de maneira a: 1) prover meio para o crescimento das plantas; 2) regular a distribuição da água no meio ambiente; 3) servir como tampão ambiental na formação, atenuação e degradação de produtos danosos ao ambiente.

Doran e Parkin (1994), por sua vez, parecem ter aprimorado esta definição englobando a questão da sustentabilidade, ao definirem qualidade do solo como a capacidade do mesmo de funcionar dentro de um ecossistema de maneira a sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde vegetal e animal. Esta definição parece ser a mais adequada até o momento, já que agrega a preocupação com a produção de alimentos saudáveis com a preservação do ambiente e da vida no planeta.

Karlen et al. (1997) aprofundam a discussão, ao afirmarem que a qualidade do solo pode ser vista de duas diferentes formas: (a) como uma característica intrínseca de determinado solo (*qualidade intrínseca*); (b) como uma condição de "saúde" do solo (*qualidade dinâmica do solo*). A qualidade intrínseca ao solo é aquela governada pelos processos formadores do mesmo. Conseqüentemente, cada solo apresenta uma capacidade própria de funcionar. Esta característica intrínseca pode ser definida por parâmetros que reflitam o potencial pleno ou ideal de determinado solo de realizar determinada função. A segunda maneira de avaliar a qualidade do solo assume que, se um solo está funcionando em um potencial máximo para determinado uso (talvez através da adoção das "melhores práticas de manejo"), ele apresenta excelente qualidade. Porém, se o mesmo está funcionando bem abaixo de seu potencial, pode-se concluir que ele está com sua qualidade prejudicada ou empobrecida. Segundo os autores, a avaliação da qualidade dinâmica do solo pressupõe implicitamente que os ecossistemas envolvidos estejam suficientemente compreendidos de forma a se saber se o sistema encontra-se realmente sustentável. Para tanto, as avaliações de qualidade do solo requerem a medição do estado atual de determinado indicador e a comparação dos resultados com valores desejáveis ou conhecidos.

Gregorich et al. (1994) lembram ainda que o sucesso dos esforços de conservação e de manejo em manter a qualidade do solo dependem de uma compreensão de como os mesmos respondem às práticas e usos agrícolas ao longo do tempo. Para serem úteis a estas práticas, os métodos para quantificar a

qualidade do solo devem acessar as mudanças nos atributos selecionados ao longo de um período prescrito de tempo, de forma a garantir a identificação das melhores estratégias de manejo.

2.3. Indicadores de qualidade do solo

A qualidade do solo é estimada pela observação ou medição de diferentes propriedades ou processos. Nenhuma propriedade pode ser usada isoladamente como um índice de qualidade do solo. Os tipos de indicadores que são mais úteis, dependem da função do solo para a qual está sendo avaliado. Segundo Doran & Parkin (1994), a seleção de indicadores deve ser baseada nos seguintes critérios de adequação:

- Devem abranger processos do ecossistema e relacionar-se à modelagens orientadas por processos.
- Devem integrar processos e propriedades físicas, químicas e biológicas.
- Devem ser acessíveis a diversos usuários e aplicáveis a condições de campo.
- Devem ser sensíveis a variações de manejo e clima.
- Devem, se possível, fazer parte de bases de dados de solo já existentes.

Além destes critérios, Turco e Blume (1999), citando Holloway e Stork (1991), incluem mais os seguintes:

- Devem apresentar respostas rápidas e acuradas às perturbações.
- Devem refletir algum aspecto do funcionamento do ecossistema.
- Devem ser de acesso fácil e de baixo custo econômico.

- Devem apresentar distribuição universal, porém com especificidades individuais a padrões espaciais e climáticos no ambiente.

Gomez et al. (1996) sugerem ainda que um indicador deve ser diretamente relacionado com os requerimentos de qualidade do solo. E, por fim, segundo Santana e Bahia Filho (1999), um indicador deve ainda ser sensível o bastante para refletir a influência de manejo e clima em variações de longo prazo na qualidade do solo, mas não tão sensível a ponto de ser influenciado por pequenas alterações no clima;

Segundo os mesmos autores, os indicadores de qualidade do solo são importantes para:

- focar os esforços de conservação em melhoria das condições do solo;
- avaliar práticas e técnicas de manejo do solo;
- relacionar qualidade do solo com outros recursos;
- coletar as informações necessárias para determinar tendências de mudanças na qualidade do solo;
- orientar as decisões de manejo.

Ainda segundo Santana e Bahia Filho (1999), é necessário que se estabeleça um limite de sustentabilidade para cada indicador, para que seja possível separar a condição sustentável da não sustentável. Segundo os mesmos autores, dois enfoques diferentes têm sido propostos para o estabelecimento destes critérios de referência: 1) condição de solo nativo; 2) condições que maximizem a produção e conservem o meio ambiente. Neste sentido, Gomez et al. (1996) sugerem que a média da região seja utilizada como princípio básico para estabelecer o limite de sustentabilidade, ao invés de um valor absoluto para todas as situações. Santana e Bahia Filho (1999), por sua vez, sugeriram um conjunto mínimo de indicadores e seus limites de sustentabilidade, para ser usado como guia na avaliação da qualidade de solos da região do cerrado, que leva em conta as médias de solos representativos. No entanto, vários outros autores têm preferido adotar como critério de referência as condições prevalentes em solos que suportam uma vegetação nativa e que tenham sofrido mínimos distúrbios antropogênicos (Dick, 1994; Doran et al., 1994; Trasar-Cepeda et al., 1998; Wick et al., 1998; Islam e Weil, 2000; Leirós et al., 2000; Pascual et al., 2000). Segundo Doran et al. (1994), o uso desse critério garante larga aplicabilidade das avaliações de qualidade do solo com respeito à sustentabilidade, pois as propriedades físicas, químicas e biológicas que suportam uma vegetação nativa evoluíram para um estado de equilíbrio que assegura uma viabilidade de longo prazo do ecossistema circunvizinho.

2.3.1. Indicadores biológicos de qualidade do solo

Conforme Turco e Blume (1999), o componente microbiológico do solo tem sido ignorado como um aspecto importante do funcionamento do ecossistema, embora os microrganismos sejam altamente sensíveis às perturbações e suas dinâmicas sejam as principais responsáveis pelo funcionamento do mesmo, antes e depois de qualquer distúrbio. Estes autores afirmam que o funcionamento dos microrganismos do solo pode servir como um marcador biológico sensível para a compreensão da estabilidade dentro de um determinado sistema. Segundo Kennedy e Papendick (1995), as populações microrgânicas podem fornecer evidências de mudanças sutis no solo, muito antes que elas possam ser medidas acuradamente por indicadores como o teor de matéria orgânica, por exemplo. Além disso, Doran e Zeiss (2000) afirmam que a avaliação das características biológicas do solo adequa-se à maioria dos critérios para a seleção de um indicador de qualidade do solo. Neste sentido, as características microbianas estão sendo cada vez mais avaliadas como indicadores sensíveis de sua qualidade (Doran et al., 1994; Kennedy & Smith, 1995; Staben et al., 1997; Trasar-Cepeda et al., 1998; Wick et al., 1998; Debosz et al., 1999; Rosado, 1999; Stamatiadis et al., 1999a,b; Glover et al., 2000; Islan e Weil, 2000; Leirós et al., 2000; Murage et al., 2000; Aon et al., 2001; Aon e Colaneri, 2001; Badiane et al., 2001; Castillo e Joergensen, 2001; Chaer, 2001; Mendes e Vivaldi, 2001; Garcia et al., 2002), em função do relacionamento entre atividade e diversidade microbiana, qualidade do solo e da vegetação e sustentabilidade do ecossistema.

A natureza dinâmica da comunidade microbiana do solo e o fato de que sua atividade reflete a influência conjunta de todos os fatores que regulam a degradação da matéria orgânica e a transformação dos nutrientes são, segundo Kennedy e Papendick (1995) e Stenberg (1999), importantes justificativas para

seu uso como indicadores de qualidade do solo. Os microrganismos constituem-se como fonte e depósito de nutrientes em todos os ecossistemas, sendo responsáveis por sua ciclagem no solo. Além disto, participam ativamente em processos benéficos como a estruturação do solo, a formação de húmus, a fixação biológica de nitrogênio, as associações micorrízicas, a solubilização de nutrientes para as plantas, a redução de patógenos e pragas de plantas, a degradação de compostos persistentes aplicados ao solo e em outras alterações nas propriedades do solo que afetam o crescimento vegetal (Atlas & Bartha, 1993; Kennedy e Papendick, 1995; Kennedy e Smith, 1995).

Stenberg (1999) descreve cinco níveis diferentes para os estudos dos microrganismos do solo. O primeiro nível é a observação dos organismos em nível individual. Isto pode ser feito com microscopia ou microeletrodos para a caracterização da atividade microbiana em nível individual ou de uma microcolônia. Este nível apresenta problemas metodológicos para a avaliação da qualidade do solo, já que a escala de observação apresenta-se muito pequena e pouco prática para este tipo de avaliação. O segundo nível considera as populações em nível de espécie, onde a dinâmica de espécies definidas pode ser estudada por meio de sondas genéticas ou de técnicas usando anticorpos. O terceiro nível também considera as populações, mas em nível funcional, e pode incluir grupos específicos de microrganismos. Estudos neste nível podem ser feitos com as mesmas técnicas utilizadas no segundo nível, mas com o uso de sondas e anticorpos de forma a terem como alvo uma gama maior de espécies dentro do grupo funcional. Outra forma é medir as taxas potenciais da atividade de populações microbianas específicas. O quarto nível preocupa-se com a comunidade microbiana como um todo, estudando a diversidade genética e fisiológica. A biomassa total ou enzimas em geral poderiam também ser incluídas aqui como medidas quantitativas da comunidade total. O quinto está no nível do ecossistema. Ele pode ser descrito por meio de dados obtidos em todos os outros níveis. Assim, estudos neste nível requerem uma avaliação integrada dos dados, incluindo os fatores químicos e físicos do solo. Conforme Chaer (2001), as características microbiológicas que normalmente são utilizadas nos estudos de qualidade do solo encontram-se enquadradas entre os níveis 3 e 5 estabelecidos por Stenberg, havendo ênfase na relação entre os microrganismos e a ciclagem de nutrientes, e sendo também comum a avaliação da atividade microbiana, a quantificação da BM e a medição de enzimas de solo envolvidas na ciclagem de nutrientes chaves (C, N, P e S). Segundo este autor, os estudos que avaliam a relação entre a qualidade do solo e a diversidade de microrganismos são cada vez mais freqüentes como consequência do grande avanço das ferramentas e métodos de avaliação. No entanto, apesar do grande potencial para o uso da análise da diversidade microbiana como indicadora de mudanças na qualidade do solo, seu uso ainda é limitado, principalmente pelo fato de que as técnicas ainda são trabalhosas e de custo relativamente elevado para serem utilizadas em análises de rotina.

2.3.1.1. Biomassa Microbiana

A biomassa microbiana (BM) é a parte viva da matéria orgânica (MO) do solo, excluindo-se as raízes e animais maiores do que aproximadamente $5000 \mu m^3$ (De-Polli & Guerra, 1996). O componente microbiano corresponde a 1-3% e 2-6%

do C e do N orgânicos do solo, respectivamente (Jenkinson, 1987, citado por Gregorich et al., 1994). Portanto, a BM serve como um reservatório de MO lábil dentro do solo. Além disso, a mineralização de N mediada por microrganismos pode prover em torno de 50% das necessidades de N das plantas anualmente, enquanto o fluxo de N através da BM pode ser 2-4 vezes superior aos teores absorvidos pelas plantas (Paul e Voroney, 1980, citados por Gregorich et al., 1994).

Devido ao fato de 95% da MO total do solo ser não viva, e, em função disto, relativamente estável ou resistente a mudanças, muitas vezes são necessárias décadas para permitir a observação de mudanças mensuráveis em seu teor no solo. A BM, por sua vez, tem um tempo de transformação muito mais rápido (Paul, 1984), sendo, portanto, muito mais sensível para aferir alterações na MO do solo causadas pelo manejo e práticas de cultivo. Powlson e Brookes (1987) verificaram que as medições de BM permitem uma indicação antecipada de mudanças lentas no conteúdo de MO, muito antes que estas possam ser acuradamente medidas por medições químicas. Portanto, em função de sua natureza dinâmica, a BM responde rapidamente às mudanças quanto ao manejo e à perturbação do solo (Carter, 1986) e ao ambiente do mesmo (Insam et al., 1989; Skopp et al., 1990; Duxbury e Nkambule, 1994). A BM é também sensível à toxidez de várias origens no solo (Domsch et al. 1983).

A BM constitui-se num importante componente ecológico, pois é responsável pela decomposição e mineralização dos resíduos vegetais e animais no solo, utilizando-os como fonte de nutrientes e energia para a formação e o desenvolvimento de suas células, bem como para síntese de substâncias orgânicas no solo. Durante seus processos metabólicos, os microrganismos são capazes de transformar, reter e liberar nutrientes às plantas (Gama-Rodrigues, 1999). A BM é a principal fonte de enzimas no solo, sendo assim responsável pela quase totalidade da atividade biológica deste, catalisando as transformações bioquímicas, representando fonte e dreno de C e troca de nutrientes entre a atmosfera e o ecossistema solo-planta (Moreira e Siqueira, 2002).

Segundo Gama-Rodrigues (1999), a BM pode ser considerada como o compartimento central do ciclo do C, representando um considerável reservatório de nutrientes nos solos e um atributo fundamental para o estudo de ciclagem de nutrientes em diferentes ecossistemas. Segundo Rice et al. (1996), o C contido na BM consiste em energia armazenada para futuros processos microbianos. Neste sentido, segundo os mesmos autores, o C da BM pode servir para indicar a atividade microbiana potencial.

A disponibilidade de N no solo, quando este não é suprido por fontes externas, depende fundamentalmente das transformações realizadas pela microbiota. Assim, conforme Gama-Rodrigues (1999), em solos com baixa fertilidade e com cobertura vegetal com baixos teores de N, a taxa de decomposição da MO é menor, propiciando a imobilização do N na BM, a qual serve como compartimento de reserva. No mesmo solo, com cobertura vegetal com maiores teores de N, a quantidade de N imobilizado pela BM é menor, pois este elemento está em quantidade suficiente para atender à atividade metabólica dos microrganismos e ao processo de decomposição da MO. Nesta situação, a BM funciona como catalisadora e/ou fonte de nutrientes na decomposição da MO.

Devido à sua rápida transformação, a BM pode ser também um indicador sensível de mudanças climáticas (Insam, 1990), sistemas de cultivo (Carter, 1991), rotações de culturas (Campbell et al., 1991) e poluição (Chander & Brookes, 1991a,b, 1993). Além disso, segundo Rice et al. (1996), seu teor no solo pode estar relacionado com outros fatores, como pH, textura e conteúdo de água. Os microrganismos também desempenham um papel fundamental na formação e manutenção da estrutura do solo (Tisdall & Oades, 1982), sendo que o C da BM apresenta forte correlação com a estabilidade de agregados (Haynes & Swift, 1990; Robertson et al. 1991). Cattelan e Vidor (1990) demonstraram uma forte correlação entre os valores da BM e a subsequente produtividade da cultura em solos coletados no Rio Grande do Sul.

Em função da reconhecida capacidade dos microrganismos em integrar propriedades físicas e químicas do solo e responder às atividades de manejo, é possível considerar a BM como um indicador biológico apropriado para a avaliação da qualidade do solo (Rice et al., 1996), podendo servir como índice de aferição da sustentabilidade de sistemas de produção (Mele & Carter, 1993; Fauci e Dick, 1994).

Diversas metodologias podem ser utilizadas para quantificar a BM. Os chamados métodos estáticos (Turco e Blume, 1999) incluem a microscopia direta, conteúdo químico de bactérias (ácido murâmico), de fungos (quitina ou ergosterol) ou de algas (clorofila). Estas técnicas, segundo estes autores, permitem a observação dos diversos grupos populacionais, porém os níveis de atividade das diferentes porções da comunidade microbiana não podem ser estabelecidos, já que, conforme De-Polli e Guerra (1996), as mesmas normalmente não permitem diferenciar organismos vivos e mortos.

Os métodos fisiológicos, por outro lado, costumam ser mais amplamente empregados, já que permitem a quantificação da BM viva presente no solo em um determinado tempo (Gama-Rodrigues e De-Polli, 2000). Eles incluem os métodos de fumigação-incubação (FI) (Jenkinson e Powlson, 1976), fumigação-extração (FE) (Vance et al., 1987; Tate et al., 1988), respiração induzida por substrato (RIS) (Anderson e Domsch, 1978), amonificação de arginina (Alef et al., 1988) e conteúdo de ATP (Jenkinson e Ladd, 1981). Segundo Turco et al. (1994), cada um destes métodos apresenta problemas e vantagens específicas, sendo todos eles capazes de indicar diferenças ou mudanças na comunidade microbiana dos solos. Já Turco e Blume (1999) acreditam que os métodos que envolvem fumigação são adequados para a maioria dos casos, porém advertem que a mensuração da BM por si só não é uma indicação completa da qualidade do solo. Trasar-Cepeda et al. (1998) sugerem o uso da BM como parte de um esquema de estimação da qualidade do solo que inclua também a avaliação do N total, do N mineralizado e de atividades enzimáticas como a fosfatase, a β -glucosidase e a urease.

2.3.1.2. Atividade biológica do solo

De acordo com Moreira e Siqueira (2002), a atividade biológica do solo pode ser definida como toda reação bioquímica catalisada pelos organismos do solo. O solo contém grande quantidade e diversidade de atividades biológicas, permitindo a inferência de que avaliações destas atividades poderiam ser úteis para avaliar a saúde e a qualidade do mesmo (Parkin et al. 1996).

Existem diversas técnicas que permitem a avaliação da atividade da biota do solo. Algumas destas técnicas refletem a atividade de organismos ou grupos de organismos específicos, enquanto outras permitem a estimativa da atividade biológica global. De modo geral, a atividade biológica do solo é medida em termos metabólicos, através de indicadores como a liberação de CO₂ ou absorção de O₂, atividades enzimáticas e caloríficas, N, P ou S mineralizados, etc.

2.3.1.2.1. Respiração microbiana

A respiração é um dos mais antigos parâmetros para quantificar a atividade microbiana (Moreira e Siqueira, 2002). A respiração do solo consiste na produção de CO₂ ou consumo de O₂ como resultado dos processos metabólicos de todos os organismos vivos presentes no solo, e costuma ser avaliada a campo. Ela representa a oxidação da matéria orgânica por microrganismos aeróbios do solo, que, portanto, utilizam O₂ como acceptor final de elétrons, até CO₂. Em muitos casos, torna-se difícil a interpretação dos resultados obtidos para avaliações da respiração do solo, em função da presença de raízes de plantas e de outros organismos do solo (Parkin et al., 1996), os quais podem causar grande variação entre as amostras. No entanto, é possível obter-se resultados menos variáveis, através da remoção destas outras formas de liberação de CO₂, através de peneiramento e mistura de cada amostra, obtendo-se assim avaliações da RM do solo. Parkin et al. (1996) ressaltam, portanto, que o termo "respiração microbiana" refere-se à produção de CO₂ ou consumo de O₂ como resultado dos processos metabólicos de microrganismos como bactérias, fungos, algas e protozoários, e sua avaliação costuma ser feita em laboratório sob condições mais controladas.

Parkinson & Coleman (1991) consideram que a RM basal é capaz de fornecer resultados válidos sobre a atividade microbiana do solo, a qual, em alguns casos, é utilizada como um índice de sua fertilidade. Parkin et al. (1996) argumentam, no entanto, que a respiração do solo pode indicar dois aspectos opostos na relação entre a MO e a qualidade do solo: a longo prazo, a perda de MO pode ser vista como um resultado negativo da respiração do solo, porém, no curto prazo, ela representa a liberação de nutrientes vegetais. Os autores afirmam que, sob esta perspectiva, não seria apropriado estabelecer relações diretas ou inversas entre a respiração do solo e os componentes produtivos da qualidade do solo. Propõem, portanto, o estabelecimento de algum ótimo respiratório que permita o balanço entre os aspectos negativos da perda de C do solo via respiração e a possibilidade de liberação de nutrientes que a mesma representa.

2.3.1.2.2. Atividade de enzimas de solo

As enzimas de solo desempenham um papel fundamental no funcionamento dos mesmos, já que catalisam inúmeras de suas reações. As atividades enzimáticas são indicadores críticos da qualidade da MO do solo, já que estas controlam a liberação de nutrientes para o crescimento de plantas e microrganismos (Skujins, 1978 e Burns, 1978, citados por Gregorich et al., 1994), trocas de gases entre o solo e a atmosfera (Conrad et al., 1983) e propriedades físicas do solo (Martens et al. 1992). De acordo com Dick et al. (1996), as avaliações de suas atividades podem ser úteis para indicar em que medida um solo está desempenhando seu potencial de ciclagem de nutrientes, nitrificação, oxidação e outros processos vitais à saúde do mesmo. Além disto, segundo os mesmos autores, estas avaliações podem estabelecer um índice integrativo da atividade biológica

passada do solo, influenciado por seu manejo. Há ainda a vantagem de que os métodos empregados para medir a atividade das enzimas do solo são geralmente simples, rápidos, acurados e reproduzíveis (Tabatabai, 1982; Peterjohn, 1991). Em função disto, diversos trabalhos têm proposto ou demonstrado a utilidade das avaliações de atividades enzimáticas dos solos na determinação de sua saúde e qualidade (Dick, 1994; Gregorich et al., 1994; Dick et al., 1996; Bergstrom et al., 1998; Bandick e Dick, 1999; Monreal e Bergstrom, 2000; Chaer, 2001; Mendes e Vivaldi, 2001; Garcia et al., 2002, entre outros.).

Como a extração de uma enzima do solo é extremamente difícil, sua presença no mesmo costuma ser caracterizada pela avaliação de sua atividade sob um conjunto de condições previamente estipuladas (pH, temperatura, umidade, concentração de substrato) . Desta forma, as atividades enzimáticas de solo costumam medir sua atividade potencial e não sua atividade *in situ* (Dick et al. 1996). Conforme Moreira e Siqueira (2002), várias atividades enzimáticas de solo podem ser medidas, sendo que os produtos de suas reações podem ser analisados por diversos métodos dependendo da sua natureza química. Destacam-se, a seguir, alguns aspectos relevantes das atividades das cinco enzimas utilizadas no presente trabalho, sendo que uma revisão mais detalhada sobre as enzimas de solo, seu comportamento neste ambiente e seu uso como indicadores encontram-se no item 2.4.

2.3.1.2.2.1. Atividade da β -glucosidase

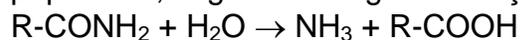
As glucosidases e galactosidases estão largamente distribuídas na natureza e são importantes no ciclo do carbono. Estas enzimas também foram detectadas no solo e a β -glucosidase foi detectada em plantas, animais e microrganismos. A β -glucosidase está mais presente em solos do que as galactosidases. É responsável pela hidrólise de resíduos de β -D-glucose terminal não reduzida, com a liberação de β -D-glucose (Paul & Clark, 1996), a qual é considerada fonte importante de energia para os microrganismos do solo. Este tipo de análise parece ser sensível na discriminação de efeitos de diferentes manejos do solo, em diferentes tipos de solo e em períodos curtos (2 anos) (Dick et al., 1996).

2.3.1.2.2.2. Atividade da urease

A urease é a enzima que catalisa a hidrólise da uréia a CO_2 e NH_3 . É amplamente distribuída na natureza e foi detectada em microrganismos, plantas e animais (Dick et al. 1996). Segundo os mesmos autores, embora a atividade da urease tenha o potencial de ser confundida por aplicações de fertilizantes contendo NH_4 , mostrou-se um forte discriminador entre efeitos de adições de resíduos de plantas, adubações nitrogenadas e esterco aos solos.

2.3.1.2.2.3. Atividade da amidase

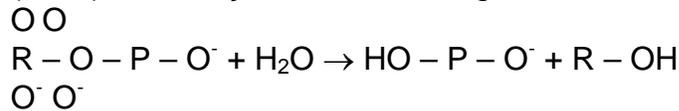
A amidase é uma importante enzima do ciclo do nitrogênio, envolvida em sua mineralização, liberando NH_4 de amidas lineares. Age sobre as ligações C-N não peptídicas, segundo a seguinte reação (Frankenberger & Tabatabai, 1995):



A amidase está amplamente distribuída em solos, plantas, fungos e fermentos (Dick et al., 1996) .

2.3.1.2.2.4. Atividade da fosfatase

Já as fosfatases são enzimas importantes no ciclo do fósforo, pois o provêm para a absorção vegetal pela liberação de PO_4 de ésteres fosfóricos. As fosfomonoesterases são classificadas como ácidas ou alcalinas de acordo com a atividade ótima em pH ácido ou alcalino, respectivamente. A atividade da fosfatase é fortemente influenciada pelo pH do solo. Adições repetidas de fertilizantes fosfatados suprimem a atividade da fosfatase (Dick, 1994). No entanto, a fosfatase ácida tem sido amplamente estudada e pode prover um índice potencial da mineralização de P orgânico de um solo (Dick et al., 1996). Segundo Alef et al. (1995), sua reação básica é a seguinte:



2.3.1.2.2.5. Atividade da aril-sulfatase

As sulfatases liberam sulfato (SO_4), a forma disponível de enxofre para as plantas, de vários ésteres de sulfato orgânicos. A aril-sulfatase é a sulfatase de solo mais amplamente estudada e é responsável pela hidrólise de ésteres de sulfato (Alef & Nannipieri, 1995a), os quais compreendem 40 a 70% do enxofre total em muitos solos (Dick et al., 1996), segundo a seguinte reação:



Bandick et al. (1994) mostraram que a aril-sulfatase pode ser muito efetiva na discriminação de efeitos de manejo do solo. Como ésteres sulfato microbianos são encontrados apenas em fungos e não em bactérias, elevada atividade de sulfatases pode estar relacionadas com a estimulação das mesmas por níveis elevados de éster sulfato produzido por fungos (Dick et al., 1996).

2.4. Enzimas de solo

Dick & Tabatabai (1999) afirmam que o solo pode ser entendido como uma entidade biológica similar a um "tecido vivo com reações bioquímicas complexas" (Figura 01). Segundo os mesmos autores, a superfície do solo pode ser considerada análoga a uma membrana celular, já que regula as trocas de ar, água e outros materiais.

FIGURA 01. Esquema ilustrando o conceito de solo como semelhante a um tecido vivo (extraído de Dick e Tabatabai, 1999).

Os diversos ciclos metabólicos que ocorrem no solo são influenciados por componentes bióticos e um grande número de compostos orgânicos e inorgânicos. Os produtos destes ciclos metabólicos são então transportados para os poros do solo e podem potencialmente mover-se através de sua superfície.

A interação entre os diversos processos metabólicos do solo é regulada de forma muito semelhante aos processos celulares: ocorrem inibições em "feedback", induções de atividades enzimáticas, secreções e impactos de pH, força iônica, temperatura e da presença de inibidores (Dick e Tabatabai, 1999).

As enzimas presentes no solo desempenham, portanto, papel fundamental neste meio, pois, através da coordenação dos ciclos metabólicos nele presentes, asseguram a transformação e o movimento de materiais entre suas porções bióticas e abióticas (Ruggiero et al., 1996). Todas as transformações bioquímicas do solo são dependentes ou relacionadas à presença de enzimas.

Cada tipo de solo pode ter seu padrão próprio de enzimas específicas e seu nível inerente de atividade enzimática, já que, dependendo de sua origem e condições de desenvolvimento, cada solo difere dos demais quanto ao conteúdo de MO, composição e atividade de organismos vivos, e conseqüentemente, quanto à intensidade dos processos biológicos que nele ocorrem.

2.4.1. Localização e funções no solo

A localização de uma enzima depende da natureza e do estágio de crescimento das células de origem e das propriedades físico-químicas do solo (Ruggiero et al., 1996). Na Figura 02, as diversas categorias de localização são divididas em quatro grupos.

FIGURA 02. Localização e categorias da atividade enzimática no solo (extraído de Ruggiero et al., 1996).

Termos como "extra-celulares", "acumuladas", "abiômicas" e "imobilizadas" são geralmente utilizados para diferenciar as enzimas dentro de uma categoria. Enzimas extra-celulares são aquelas secretadas por organismos vivos durante o crescimento e a divisão celular, ou ainda, liberadas por células lisadas, ligadas à parede celular ou retidas no espaço periplasmático. No solo, as enzimas extra-celulares podem ser definidas como todas as que catalisam reações fora do organismo que as sintetizou. As enzimas extra-celulares, embora facilmente degradáveis, podem sobreviver no solo através de estabilização como enzimas imobilizadas, ou seja, ligadas a suportes naturais presentes no solo (representadas pelos quadrantes C e D da Figura 02). Estes suportes podem ser formados, tanto por materiais de origem orgânica (ácidos húmicos) (Ladd e Butler, 1975), quanto mineral (argilas) (Harter e Stotzky, 1971).

Enzimas livres ou imobilizadas, pertencentes às categorias B, C e D da Figura 02, são consideradas acumuladas. Estas enzimas são as principais responsáveis pelas transformações catalíticas de substratos no solo. Conforme Kiss et al. (1975), as fontes de enzimas acumuladas são principalmente as células microbianas, podendo, no entanto, também originar-se de resíduos de plantas e de animais.

Segundo Skujins (1978), citado por Dick e Tabatabai (1992), enzimas abiômicas são aquelas secretadas para o ambiente por células proliferantes (grupo A da Figura 02) e aquelas dos grupos B, C e D que estão contidas em células mortas intactas ou seus fragmentos, ou em células viáveis mas não proliferantes. Esta classificação deve ser vista de maneira dinâmica, já que o destino das enzimas secretadas por células vivas ou liberadas por células mortas no solo pode diferir, dependendo das propriedades de solo e da duração de sua exposição a este ambiente.

As enzimas do solo podem também ser classificadas quanto a sua função no solo. Segundo Dick e Tabatabai (1999), as enzimas de solo mais correntemente encontradas e estudadas são as hidrolases, mas também são registradas as oxiredutases, as transferases e as liases. Tanto Gianfreda e Bollag (1996), quanto Dick e Tabatabai (1992), produziram listas das enzimas que já foram ao menos parcialmente caracterizadas no solo.

As hidrolases são as enzimas responsáveis por catalisar reações de clivagem de ligações com a posterior liberação de uma molécula de água. De acordo com Dick e Tabatabai (1999), estas enzimas costumam ser pequenas em tamanho, normalmente não requerem cofatores e são mais resistentes à inativação do que as demais enzimas de solo. Nesta categoria encontram-se enzimas como as polissacaridases (amilase, celulase, xilanase, dextranase, etc.), a protease, a

invertase, a amidase, a urease, as fosfatases (fosfatase ácida e alcalina, fosfodiesterase e pirofosfatase) e a aril-sulfatase.

As oxiredutases catalisam a transferência de elétrons de uma molécula para outra. Quando disponível, o O_2 funciona como aceptor de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos, mas, na ausência de O_2 , outros compostos como nitrato, sulfato, e vários óxidos de Fe, Mn, e Cu podem cumprir esta função. Neste grupo, podem ser encontradas enzimas como a desidrogenase, a peroxidase, a catalase, a nitrogenase, a nitrato-redutase, a lacase, entre outras. Íons de Cu, o Fe ou Mo costumam agir como centros catalíticos deste tipo de enzimas (Ruggiero et al., 1996).

As transferases catalisam a transferência de grupos, ou substituintes moleculares entre moléculas (Moreira e Siqueira, 2002), e como exemplo, cita-se a aminotransferase. E as liases catalisam a quebra de ligações diferentes das catalisadas por hidrolases e oxiredutases, citando-se como exemplo a glutamato-descarboxilase (Gianfreda e Bollag, 1996; Dick e Tabatabai, 1999).

2.4.2. Propriedades das enzimas do solo e seu comportamento neste ambiente

As enzimas do solo freqüentemente apresentam propriedades especiais, tais como alta estabilidade à desnaturação térmica, ao ataque de proteases ou à irradiação, além de um comportamento cinético característico (Gianfreda e Bollag, 1996).

Diversos estudos (McLaren, 1975, citado por Martens et al., 1992; Pettit et al., 1976 e Dick et al., 1983, citados por Gianfreda e Bollag, 1996; Tabatabai e Fu, 1992; Dick e Tabatabai, 1999) demonstram que enzimas "nativas" do solo são mais estáveis em relação a enzimas a ele adicionadas, apresentando uma estabilidade ampliada quanto a agentes desnaturantes físicos, químicos e biológicos, especialmente contra o ataque proteolítico. Esta alteração de comportamento possivelmente ocorra devido à minimização e/ou à prevenção quanto a alterações conformacionais das mesmas em função de sua imobilização (Gianfreda e Bollag, 1996). Por exemplo, conforme experimentos citados por estes autores, a urease retirada de feijão, e fosfatase e pirofosfatase retiradas de raízes de milho foram parcialmente ou completamente inativadas, quando adicionadas a diferentes tipos de solo. Esta inativação foi o resultado da inibição provocada por constituintes do solo ou pela atividade de proteases. Em contraste, urease e fosfatase, além de outras enzimas extraídas do solo, mostraram considerável estabilidade quando sujeitas à ação de enzimas proteolíticas ou altas temperaturas.

Além disto, o comportamento cinético das enzimas do solo é usualmente diferente do apresentado pelas mesmas enzimas em sua forma purificada: os valores da V_{max} podem ser menores e as constantes K_m são superiores, indicando baixa eficiência catalítica e redução da afinidade pelo substrato (Beri et al., 1978; Frankenberger e Tabatabai, 1985), porém podendo variar para cada tipo de solo (Frankenberger e Tabatabai, 1980). Da mesma forma, efeitos diferentes de pH ou temperatura também foram demonstrados para enzimas de solo (Eivazi e Tabatabai, 1977; Frankenberger e Tabatabai, 1985; Bandick e Dick, 1999). Segundo Gianfreda e Bollag (1996), este comportamento diferenciado pode ser,

em parte, explicado pela natureza "heterogênea" do processo catalítico que ocorre no solo, associado com a imobilização da enzima.

2.4.3. Fatores do solo que afetam a atividade enzimática

Dick e Tabatabai (1999) estabelecem diversos fatores inerentes ao solo que influenciam diretamente a habilidade das enzimas nele presentes em catalisar reações. São eles:

- **pH.** Cada enzima apresenta seu máximo de atividade dentro de uma faixa específica de pH. Quando esta encontra-se imobilizada junto a um suporte sólido, como uma argila, o pH ótimo normalmente é alterado em uma ou duas unidades no sentido da alcalinidade. Isto ocorre porque, próximo de onde se encontra a enzima, a concentração de íons H^+ é mais alta do que em relação à solução total do solo.
- **Temperatura.** As enzimas do solo são geralmente mais resistentes a elevadas temperaturas do que enzimas livres em estado puro ou soluções.
- **Conteúdo de água do solo.** A atividade enzimática ocorre sempre em solução. É necessário que o substrato possa difundir-se ou mover-se até a enzima por fluxo de massa para que possa ser transformado. Portanto, solos secos apresentarão baixa atividade enzimática. Por outro lado, o encharcamento do solo pode provocar o deslocamento ou lixiviação dos substratos solúveis para além do sítio catalítico. Geralmente, o conteúdo de água ótimo para a maioria das atividades enzimáticas está em torno da capacidade de campo do solo.
- **Biomassa e atividade microbiana.** O tamanho da biomassa e a atividade dos microrganismos influencia a taxa de degradação das enzimas, muito embora a imobilização destas no solo torne-as relativamente resistentes ao seu ataque.
- **Presença de inibidores.** As proteases reduzem a atividade das enzimas, devido à degradação da sua cadeia proteica. A solução do solo também pode conter uma grande variedade de compostos orgânicos e inorgânicos capazes de inibir a atividade enzimática. A presença de metais pesados no solo, por exemplo, costuma ser um forte fator de inibição da mesma.
- **Propriedades químicas do substrato.** Um dos principais fatores que influenciam a degradação enzimática de determinado substrato no solo está relacionado à força de adsorção do mesmo às superfícies das partículas do solo. Neste sentido, o tempo de introdução do substrato no solo também torna-se importante, pois quanto menor a probabilidade de adsorção do mesmo pelas partículas, mais fácil a degradação. Em geral, quanto mais solúvel o substrato, menor será sua resistência à degradação.

Outro efeito comum de redução da atividade das enzimas acumuladas no solo é o efeito de repressão catabólica, gerado pela presença maior do produto da reação

por elas catalisada, no meio. Este aumento pode ocorrer, por exemplo, pela adição de adubações minerais ao solo, que resultem na liberação de nutrientes que são o produto final da reação de determinadas enzimas. Nannipieri et al. (1978), verificaram, por exemplo, que os aumentos na atividade da fosfatase ácida coincidiram com aumentos na biomassa fúngica e bacteriana apenas em tratamentos sem P inorgânico. A adição de P inorgânico reprimiu a atividade da fosfatase ácida em todas as concentrações em ambos os solos. Apenas os tratamentos com glicose e 0 mg de P apresentaram um aumento na atividade da fosfatase. Segundo Chróst (1991), citado por Sinsabaugh e Moorhead (1994), a atividade da aminopeptidase apresenta um padrão similar de comportamento, ou seja, sua atividade é induzida por baixas concentrações de N e inibida na presença de N inorgânico.

Em função destas variações mais pontuais, outras variações de ordem mais ampla nas atividades enzimáticas de solos também podem ser verificadas. Dentre elas destacam-se variações quanto a condições climáticas, presença de raízes, posição topográfica do local de amostragem, fenologia da vegetação de cobertura, etc.

Neste sentido, diversos autores têm constatado que a maioria das enzimas de solo apresenta um padrão de atividade variável ao longo do ano, em função das condições climáticas e de seus respectivos efeitos sobre a atividade da vida do solo (Rastin, 1988; Bergstrom et al., 1998). Rastin et al. (1988) investigaram a variação sazonal das atividades das enzimas fosfatase ácida, fosfodiesterase e β -glucosidase em um solo de floresta. A fosfatase ácida apresentou a atividade mais alta e a menor variação sazonal. As flutuações sazonais das três enzimas investigadas seguiram padrões divergentes, mas alcançaram seu máximo na primavera. Em setembro (hemisfério norte), a atividade da fosfatase ácida atingiu seu mínimo, o qual está relacionado com a alta temperatura e baixa umidade do solo. Já no trabalho de Bergstrom et al. (1998), houve variação climática na atividade das seis enzimas analisadas, sendo que a fosfatase foi a mais fortemente afetada.

Quanto à presença de raízes no solo, Bergstrom e Monreal (1998), trabalhando com milho e soja, verificaram diferenças significativas na atividade de enzimas (urease, fosfatase e aril-sulfatase) em solos rizosféricos e não rizosféricos, devido à produção das mesmas pelas próprias raízes e pela microbiota a elas associada. Os autores alertam que comparações de atividades enzimáticas entre locais durante a estação de crescimento devem levar em conta a influência da cultura. No entanto, em outro trabalho realizado por Aon e Colaneri (2001) com cultivo de soja, esta tendência não se verificou, já que as variações nas atividades enzimáticas avaliadas (fosfatase ácida e alcalina, β -glucosidase, urease, atividade de hidrólise de FDA e desidrogenase) ocorreram independente da época do ano ou da presença de culturas. No entanto, os autores observaram uma estratificação no espaço para todas as atividades enzimáticas no período de florescimento, havendo uma redução das mesmas em função da profundidade, o que sugere a influência da cultura sobre as atividades enzimáticas nos arredores da rizosfera, em função da alta atividade microbiana provocada pelas adições de C pelas raízes das plantas.

Em relação à posição topográfica do local de amostragem, Bergstrom et al. (1998) recomendam que as comparações envolvendo atividades enzimáticas do solo devem ser feitas a partir de coletas realizadas em uma mesma posição na encosta, e para uma mesma camada do solo, que adequadamente represente os efeitos de manejo. Segundo estes autores, a profundidade de amostragem pode ser particularmente importante para as atividades de desidrogenase, urease e β -glucosidase. Ainda segundo estes autores, solos muito secos ou muito úmidos e a fenologia da cultura podem ser fontes de variação temporal que afetam as comparações entre as atividades enzimáticas. Portanto, os autores recomendam que sejam evitadas comparações restritas a uma única data de amostragem durante a estação de crescimento.

2.4.4. Aplicações do estudo de enzimas no ambiente solo-planta

Conforme Dick e Tabatabai (1992), as propriedades das enzimas podem ser utilizadas de forma prática em inúmeras situações envolvendo o ambiente solo-planta, incluindo aspectos relativos a fertilidade, eficiência no uso de fertilizantes, interações rizosféricas, determinação do estado de oxi-redução do solo, estudos de ecologia, indicação de poluição, remediação de solos contaminados, e avaliações de impacto de manejos e da qualidade dos solos agrícolas.

2.4.4.1. Uso de atividades enzimáticas como indicadores de fertilidade do solo

Uma das primeiras aplicações propostas para as enzimas no solo foi o uso de sua atividade como um índice de fertilidade do solo (Hofmann e Seegerer, 1950 e 1951, citados por Dick e Tabatabai, 1992). A idéia era de que as enzimas integravam os efeitos de clima, cultivo, adubação e propriedades edáficas, resultando em uma atividade indicativa da fertilidade do solo. Os primeiros pesquisadores indicavam o uso da invertase como um índice de fertilidade (Ross et al., 1973; Ross, 1975).

Skujins (1978), citado por Dick e Tabatabai (1992), porém, concluiu que a obtenção de um "índice de fertilidade" pela análise de qualquer atividade enzimática seria improvável. As atividades enzimáticas do solo são substrato-específicas, além de altamente correlacionadas com os níveis de matéria orgânica, sendo portanto, difícil que um único indicador enzimático possa prover uma informação completa sobre o estado nutricional de um solo (Nannipieri et al., 1990).

Por outro lado, segundo Dick e Tabatabai (1992), é possível que, nos sistemas produtivos onde a fertilidade do solo esteja fortemente ligada à ciclagem da matéria orgânica (agricultura orgânica, sustentável ou agroecológica), possa haver uma relação estreita entre as atividades das enzimas e a fertilidade destes solos. Segundo Dick et al. (1996), solos sob manejos que visam promover sua qualidade (plantio direto, adubação orgânica, rotação de culturas, etc.) devem apresentar maior atividade biológica, o que deve refletir em uma produção superior de enzimas e um potencial superior para estabilizar e proteger enzimas (maior produção de colóides orgânicos e maior agregação de solo), através de sua complexação na matriz do solo.

A atividade integrada de diversas enzimas de solo tem sido estudada como forma de indicar sua fertilidade. Verstraete e Voets (1977), por exemplo, verificaram que

as atividades da fosfatase, da sacarase, da β -glucosidase e da urease, bem como a respiração do solo mostraram-se úteis para caracterizar os solos estudados, revelando um forte efeito da fertilização orgânica. Os autores alertam, no entanto, que somente é possível esperar uma influência forte das características bioquímicas do solo sobre a sua fertilidade sob circunstâncias climáticas que favoreçam a atividade da comunidade microbiana do solo.

Este tipo de abordagem pode refletir melhor, tanto a liberação de nutrientes durante a ciclagem da matéria orgânica, quanto a atividade relativa dos diversos nutrientes inorgânicos, comparada com a atividade de cada enzima, e pode tornar-se eficiente através da avaliação de várias enzimas de solo e análise dos dados em um modelo estatístico específico (análise de agrupamento, como pode ser visto em Monreal e Bergstrom, 2000). Dick e Tabatabai (1992) relatam que foram observadas correlações positivas entre carboidrases e a disponibilidade de P e N, entre a fosfatase ácida e várias formas de P no solo e entre a sulfatase e a nutrição de plantas com S. Khan (1970) também observou que fertilizações orgânicas e químicas apresentaram um efeito pronunciado na atividade das enzimas analisadas.

Muitas enzimas de solo são sensíveis ao pH, e é possível avaliar o valor do mesmo no solo pela presença de algumas delas. Por exemplo, em solos ácidos, predomina a fosfatase ácida, com uma presença mínima ou mesmo ausência total da fosfatase alcalina (Dick e Tabatabai, 1984; Nahas et al. 1994). Assim, uma relação entre a presença de fosfatases ácida e alcalina poderia servir como um indicador do pH adequado para o crescimento vegetal (Dick e Tabatabai, 1993).

2.4.4.2. Uso de atividades enzimáticas na melhoria da eficiência de fertilizantes

Diversos fertilizantes dependem da atividade das enzimas de solo para produzir compostos que possam ser utilizados pelas plantas. O fertilizante mais utilizado, para o qual esta máxima é verdadeira é a uréia. A eficiência dos fertilizantes à base de uréia é limitada pela rapidez da hidrólise da mesma até NH_3 e CO_2 realizada pela urease no solo. Esta hidrólise costuma ser muito rápida, provocando perdas de NH_3 por volatilização, acúmulos e/ou lixiviação de N na forma de nitrato e prejuízos na germinação de sementes e no desenvolvimento de plântulas. Neste sentido, diversas pesquisas foram desenvolvidas com o objetivo de reduzir as perdas na aplicação deste fertilizante, incluindo táticas como: incorporação ou adição em profundidade, uso de formas de uréia de liberação lenta e uso de inibidores de urease no solo (Dick e Tabatabai, 1992).

A adição de NH_4^+ ou NO_3^- em solos adubados com C orgânico (glicose) provocou a repressão da produção de urease, embora a atividade microbiana, medida pela liberação de CO_2 , tenha sido estimulada (Anghinoni et al., 1988). Os autores acreditam que a produção microbiana de urease foi provavelmente reprimida por produtos formados pela assimilação de NH_4^+ e NO_3^- pelos microrganismos do solo.

Diversos autores (Dick, 1992; Bandick e Dick, 1999; Ajwa et al., 1999; Aon e Colaneri, 2001) também verificaram que a adição de fertilizantes nitrogenados provoca um decréscimo geral na habilidade do solo de produzir enzimas relacionadas à ciclagem de N, tais como a urease e a amidase. Aon e Colaneri

(2001) afirmam que este mecanismo representa um *feedback* negativo na habilidade do solo de degradar MO e fertilizantes nitrogenados adicionados.

Haynes e Swift (1988) estudaram os efeitos da adição de calcário e/ou fósforo a um solo ácido deficiente em P sobre as atividades microbianas e enzimáticas do mesmo, níveis de biomassa e N, S e P extraíveis. As adições de calcário geralmente aumentaram as atividades de protease e sulfatase, mas diminuíram a atividade de fosfatase, enquanto as adições de fosfato reduziram as atividades destas três enzimas, porém aumentaram a acumulação de N mineral e SO_4^{2-} .

Segundo Dick e Tabatabai (1992), outros fertilizantes propostos, constituídos de compostos com altos conteúdos de N e P, também requerem a atividade de enzimas no solo antes que os nutrientes tornem-se disponíveis. Diversas reações envolvendo compostos fertilizantes são simples reações hidrolíticas, e muitas das enzimas nelas envolvidas já foram caracterizadas, predizendo possíveis avanços futuros no campo da fertilidade do solo. Estes compostos incluem amidas de baixo peso molecular, bases púricas e pirimídicas e fosfatos condensados. Ainda segundo estes autores, o valor do pirofosfato como uma fonte de P depende de sua taxa de hidrólise.

Conforme Gianfreda e Bollag (1996), a atividade microbiana e enzimática costuma ser promovida pela adição de fertilizantes e resíduos orgânicos ao solo, sendo que o estímulo à atividade de enzimas costuma ser maior do que aquele verificado com a adição de fertilizantes inorgânicos. No entanto, os materiais orgânicos podem também conter poluentes (metais pesados, componentes orgânicos tóxicos), os quais, quando em concentrações inibitórias, podem reduzir as atividades de enzimas no solo.

Dick et al. (1988) testaram diversos tratamentos com adição de palha de trigo quanto ao seu efeito sobre as atividades de enzimas de solo (fosfatase ácida e alcalina, aril-sulfatase, β -glucosidase, urease e amidase) em um experimento de longa duração no sistema trigo – pousio sobre um solo de região semi-árida. Os tratamentos examinados foram: adição de palha, palha com queima na primavera ou no outono, palha mais adição de 45 ou 90 kg de N ha^{-1} , palha queimada na primavera mais adição de 45 ou 90 kg de N ha^{-1} , e palha mais 2,24 Mg ha^{-1} de esterco. As maiores atividades foram observadas no tratamento que incluía a adição de esterco (aumentos de 36 a 190%), enquanto que as menores (fosfatase alcalina, amidase e urease) ocorreram no tratamento que incluía palha mais 90 kg de N ha^{-1} .

Gianfreda e Bollag (1996) salientam que a influência de fertilizantes (orgânicos ou inorgânicos) sobre a atividade enzimática do solo depende do tipo de solo, do tipo de enzima e do tempo de aplicação. Em experimentos de longa duração, os efeitos podem ser causados por mudanças nas características do solo, tais como produtividade das culturas, teor de umidade e concentração e disponibilidade de nutrientes orgânicos e inorgânicos.

2.4.4.3. Uso de atividades enzimáticas como indicadoras de interações rizosféricas

Níveis mais altos de enzimas costumam ocorrer na rizosfera, e sua presença confere vantagens específicas às plantas (Speir et al., 1980; Castellano e Dick, 1991). Estas enzimas podem ser produzidas tanto pelas raízes das plantas, quanto pelos microrganismos a elas associados (Dick, 1994). Atlas e Bartha

(1993) relatam, por exemplo, que o arroz é protegido do efeito tóxico do sulfito de hidrogênio por uma associação mutualística com uma bactéria filamentosa microaerofílica, catalase-negativa e oxidante de sulfito, chamada *Beggiatoa*. Esta bactéria beneficia-se com o oxigênio e a enzima catalase providas pelas raízes do arroz e, em retorno, auxilia a planta, oxidando o sulfito de hidrogênio tóxico a enxofre elementar ou sulfato, por meio da liberação de uma enzima oxidativa na rizosfera.

Outro exemplo, citado por Dick e Tabatabai (1992), de interação solo-planta mediada pela ação de enzimas é a possibilidade de produção de ácido indolacético (AIA), um hormônio vegetal, a partir da hidrólise de indol-3-acetonitrila e indol-3 acetaldéido por enzimas de solo.

Enzimas como a amilase, a celulase, as proteases, as lipases, as fosfatases e as sulfatases podem também atuar sobre substratos orgânicos na rizosfera, tornando disponíveis diversos nutrientes (Dick e Tabatabai, 1992). Neste sentido, por exemplo, Tarafdar e Jungk (1987) demonstraram que as atividades de fosfatases ácidas e alcalinas na rizosfera de trigo foram altamente correlacionadas com a depleção de P orgânico.

Dick e Tabatabai (1992) acreditam que a exploração destas enzimas que podem converter rapidamente precursores em moléculas biologicamente ativas na rizosfera, apresenta grande potencial para um incremento na produção das culturas.

2.4.4.4. Uso de atividades enzimáticas como indicadores do estado de oxi-redução do solo

As atividades de diversas enzimas de solo podem ser utilizadas para identificar o metabolismo anaeróbico do solo, e, portanto, indiretamente os níveis de oxigênio e o potencial redox do solo. A atividade da desidrogenase costuma ser a mais indicada para este tipo de avaliação, podendo refletir mudanças na comunidade microbiana, bem como no potencial redox, já que ela pode utilizar tanto O₂, quanto outros compostos como aceptores finais de elétrons, sendo que, no entanto, a maioria das desidrogenases são produzidas por microrganismos anaeróbios.

Bergstrom et al. (1998), citando Reicosky et al., (1995), afirmam que as atividades de desidrogenase e β -glucosidase são indicadoras dos processos de oxidação do solo, e que, portanto, pode-se esperar um aumento temporário das mesmas em sistemas de preparo convencional, comparadas às sob semeadura direta, nos períodos posteriores à incorporação de resíduos de culturas. Porém, se o O₂ é excluído do solo, a atividade anaeróbia total aumenta e é refletida em um aumento na atividade da desidrogenase (Pedrazzini e McKee, 1984).

A atividade de outras enzimas também tem sido investigada para este fim. Foi verificada uma correlação positiva entre a taxa de difusão de O₂ e a atividade da catalase (Glinski et al., 1985, citados por Dick e Tabatabai, 1992). Também as atividades de fosfatases ácida e alcalina, urease e aril-sulfatase foram positivamente correlacionadas com o potencial redox do solo, após sete dias de encharcamento (Pulford e Tabatabai, 1988).

2.4.4.5. Uso de atividades enzimáticas como indicadores de poluição no solo

A possibilidade de uso das atividades enzimáticas como indicadores de poluição do solo apresenta grande potencial para acessar efeitos das adições de diversos resíduos orgânicos, químicos e industriais sobre a qualidade do mesmo.

Conforme Dick e Tabatabai (1992), as concentrações de metais pesados (especialmente Hg, Ag, Cd e Cu) necessárias para provocar efeitos sobre a biota do solo e, conseqüentemente, sobre a produção e a atividade enzimáticas, são inferiores às de xenobióticos. Porém, diversos metais são necessários em baixas concentrações para a atividade biológica ótima, por fazerem parte da estrutura de certas enzimas. O Ni, por exemplo, é um metal essencial na estrutura da urease (Gerendás e Sattelmacher, 1997). Tabatabai (1977) verificou uma alta sensibilidade da urease aos íons metálicos Cu e Cd. Dick e Tabatabai (1983) também verificaram que Mg, Ca, Ba, Co, Ni, Zn e Mn ativaram a atividade da pirofosfatase, provavelmente pela formação de uma ponte entre substrato, metal e enzima. Diversos outros trabalhos envolvendo o efeito da presença de metais pesados sobre as atividades de enzimas de solo foram revisados por Gianfreda e Bollag (1996).

Não raro, porém, a avaliação de enzimas de solo tem sido usada como um método sensível para determinar os efeitos da poluição com metais pesados e outros poluentes industriais no solo. Brohon et al. (2001) testaram medidas de atividade enzimática (desidrogenase, fosfatase, hidrólise de FDA e urease) no sentido de descrever um solo poluído com hidrocarbonetos ao longo de 50 anos. A urease e a desidrogenase mostraram-se sensíveis à presença de metais (31% de inibição da urease e 50% de inibição da desidrogenase no solo mais contaminado). Já Kuperman e Carreiro (1997) mediram as atividades de enzimas de solo em um ecossistema de pastagens com altas taxas de concentração de metais pesados (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn). Foram medidas as atividades de N-acetil-glucosaminidase, β -glucosidase, endocelulase e fosfatases ácida e alcalina. Reduções significativas (10 a 50 vezes menor) foram verificadas nas atividades de todas as enzimas (com exceção da fosfatase alcalina). Os resultados demonstraram que as contaminações com metais pesados no solo afetam adversamente a abundância e a atividade dos microrganismos envolvidos na decomposição da MO e na ciclagem de nutrientes.

Também o efeito da aplicação de agrotóxicos tem sido estudado através da observação do comportamento enzimático no solo. A adição destes pode tanto estimular, quanto inibir suas atividades, dependendo das populações do solo por eles afetadas, da natureza química e da dose do agrotóxico usado, do tipo de enzima e de solo, etc. (Gianfreda e Bollag, 1996). Frankenberger e Tabatabai (1981) buscaram verificar os efeitos de 12 herbicidas, 2 fungicidas e 2 inseticidas na atividade da amidase no solo. Em dosagens mais altas do princípio ativo no solo, a inibição média da amidase variou de 2% com dinitroamina, EPTC mais R-25788 e captan, até 10% com butilato. Outros agrotóxicos que apresentaram efeito inibitório sobre a atividade da amidase foram atrazina, naptalam, cloramben, dicamba, cianazina, 2,4-D, alaclor, paraquat, trifluralina, maneb, diazinon e malathion. Diversos outros trabalhos envolvendo a ação de agrotóxicos sobre as atividades enzimáticas são apresentados na revisão de Schäffer (1994).

2.4.4.6. Uso de atividades enzimáticas na remediação de solos contaminados

Os níveis naturais de atividades enzimáticas do solo podem ser usados na transformação de compostos contaminantes. Um aumento destes níveis pode ser alcançado pela adubação do solo, aumentando sua atividade biológica total, na esperança de que as enzimas envolvidas na transformação dos compostos orgânicos aumentem na mesma proporção. Uma inerente ausência de especificidade é a maior limitação deste tipo de abordagem, embora adubações orgânicas possam também servir para remover ou estabilizar o poluente, incorporando-o na matéria orgânica do solo (Dick e Tabatabai, 1983).

Aplicações repetidas de um mesmo tipo de agrotóxico podem fazer com que este seja tão rapidamente degradado, que se torne inefetivo tão logo seja aplicado. Este fenômeno, chamado de *biodegradação acentuada*, é conhecido na literatura para diversos produtos químicos (Dick e Tabatabai, 1992). No caso de inseticidas fosforados, verificou-se uma taxa de atividade muito alta de uma fosfatase específica, responsável pela hidrólise dos grupos fosfato destes produtos (Sikora e Kaufman, 1987, citados por Dick e Tabatabai, 1992).

A aplicação de enzimas purificadas ou parcialmente purificadas ao solo, com o objetivo de bio-remediação, já foi demonstrada sem efeito, já que estas costumam ser inibidas imediatamente após sua adição ao solo (Dick e Tabatabai, 1983). Esta inibição é atribuída à cobertura dos sítios ativos quando da ligação das enzimas às partículas do solo ou a sais solúveis, juntamente com a degradação biológica da enzima.

Para evitar a rápida perda de atividade das enzimas após sua adição direta ao solo, foram criadas diversas técnicas de imobilização prévia em suportes sólidos (Dick e Tabatabai, 1999). Normalmente, a imobilização diminui as taxas de reação, mas uma atividade significativamente maior é mantida se as enzimas são assim previamente preparadas. A imobilização também fornece uma maior estabilidade contra extremos de temperatura, proteólise e presença de fatores de inibição. Apresenta, no entanto, a desvantagem da incapacidade de agir sobre substratos insolúveis em água, já que os substratos precisam difundir-se até a enzima para que a reação possa acontecer.

De acordo com Dick e Tabatabai (1992), a utilização de enzimas imobilizadas na descontaminação de solos apresenta algumas vantagens em relação ao uso de microrganismos:

1. O uso de enzimas imobilizadas torna desnecessária a liberação de microrganismos engenheirados no ambiente.
2. Enzimas imobilizadas podem ser reutilizadas e são mais tolerantes a concentrações tóxicas de contaminantes.
3. Enzimas imobilizadas não são suscetíveis à competição microbiana.

Segundo os mesmos autores, para que esta tecnologia possa ser aplicada, no entanto, é necessária uma fonte de enzimas prontamente disponível. Esta pode ser obtida através do cultivo de células de microrganismos e o posterior aproveitamento de seu conteúdo enzimático. Caso a produção da enzima desejada seja muito baixa, é possível inserir o(s) gene(s) responsável(is) por sua produção em um microrganismo capaz de realizar, tanto a síntese, quanto a secreção da mesma em meio de cultivo.

2.4.4.7. Uso de atividades enzimáticas como indicadores em estudos de ecologia

Diversos estudos demonstram que as atividades das enzimas do solo estão correlacionadas com os estágios de sucessão da comunidade vegetal. Por exemplo, conforme Pancholy e Rice (1973), quando uma comunidade passa de uma situação de lavoura abandonada para uma de vegetação *clímax*, as atividades da desidrogenase e urease aumentam, enquanto as de amilase, celulase e invertase decrescem. O tipo de vegetação e, conseqüentemente, a matéria orgânica disponível, são os responsáveis por estas alterações nos níveis de atividade enzimática. Kulinska et al. (1982) também usaram enzimas de solo (invertase, urease, fosfatase e desidrogenase) para avaliar diferenças entre ecossistemas maiores no Brasil. As atividades decresceram na seguinte ordem: cerrado > cerrado > a-cerrado (cerrado afetado por atividade humana).

Vepsäläinen et al. (2001) verificaram que as atividades de enzimas variaram consideravelmente entre os locais e as datas de amostragem, contrariamente aos resultados das análises físicas e químicas. Os perfis de atividade enzimática obtidos, comparados em análise de agrupamento, permitiram separar as amostras em grupos com distintas características.

De acordo com Burns (1982), as enzimas extra-celulares costumam ser de grande interesse em estudos ecológicos, pois catalisam os passos limitantes da decomposição e da ciclagem de nutrientes. Badiane et al. (2001) analisaram as atividades de β -glucosidase, amilase, quitinase e xilanase em áreas naturais e melhoradas de solo em pousio de uma região semi-árida. A análise de componente principal revelou uma relação entre as atividades enzimáticas e o tempo e o manejo das áreas em pousio. A β -glucosidase e a amilase foram significativamente mais altas nos solos em pousio a mais tempo. Segundo os autores, as mudanças na vegetação de cobertura e especialmente na qualidade desta vegetação (mais herbáceas nas áreas mais jovens e mais lenhosas nas mais velhas) podem explicar as diferenças nas atividades enzimáticas.

A busca de compreensão dos impactos ambientais causados pela ação antrópica em áreas naturais tem também trazido interesse para a quantificação da atividade enzimática do solo no sentido de sua utilização como indicador da dinâmica e do equilíbrio ecológico do mesmo e do ambiente como um todo. Neste sentido, Mendes e Vivaldi (2001) realizaram estudos de caracterização das propriedades microbiológicas dos solos da Mata de Galeria, na região dos Cerrados, nos quais utilizaram como indicadores, entre outros, as atividades de β -glucosidase, fosfatase ácida e aril-sulfatase. Estes resultados foram comparados aos obtidos num solo sob Cerrado, e os autores verificaram que os dois solos possuem algumas propriedades microbiológicas e bioquímicas diferenciadas.

A interferência sobre ecossistemas por fatores outros do que a vegetação também pode ser acessada pelo uso de enzimas de solo. Assim, por exemplo, solos onde foram adicionadas minhocas (*Lumbricus rubellus*, *Allolobophora caliginosa*, *Eisenia foetida* e *Dendrobaena veneta*), apresentaram uma atividade muito maior da fosfatase e continham mais do que o dobro de P solúvel presente no solo não tratado (Satchell e Martin, 1984).

2.4.4.8. Uso de atividades enzimáticas como indicadores de impactos de manejo e na avaliação da qualidade dos solos agrícolas

A análise das atividades enzimáticas pode contribuir na avaliação de manejos que visam a recuperação de solos degradados, trazendo informações a respeito dos efeitos dos manejos sobre os processos biológicos neles contidos, sua fertilidade relativa, o desenvolvimento da comunidade vegetal neles presente, etc. No entanto, para que estas avaliações possam ser eficazes, é necessário o estabelecimento de cuidadosas relações destas com os contextos de clima e solo. O cultivo do solo costuma reduzir suas atividades enzimáticas (Dormaar, 1983; Gupta e Germida, 1988), sendo que os manejados com cultivo reduzido ou plantio direto costumam apresentar atividades enzimáticas mais altas do que aqueles que sofreram mobilizações (Doran, 1980; Klein e Koths, 1980; Angers et al., 1993). Neste sentido, diversos autores verificaram que o cultivo convencional por longo período reduziu as atividades de fosfatase, desidrogenase, urease e protease, tanto na camada superficial, quanto na sub-superficial, tendo-se inclusive registrado níveis mais elevados destas atividades na camada sub-superficial (Doran, 1980; Klein e Koths, 1980). É possível que as práticas de revolvimento do solo apresentem um efeito mais pronunciado nas camadas superficiais devido à sua ação deletéria sobre a quantidade e a qualidade da matéria orgânica nelas presente (Angers et al., 1993). Dick (1984) também encontrou atividades superiores de fosfatase, aril-sulfatase, invertase, amidase e urease em solos sob semeadura direta, em relação aos sob cultivo tradicional. Estes efeitos foram mais pronunciados na camada de 0 - 7,5 cm, e foram afetados significativamente pela rotação de culturas. Gianfreda e Bollag (1996), analisando diversos trabalhos que verificam as atividades enzimáticas em solos agrícolas revolvidos, verificaram que estas atividades estavam geralmente correlacionadas com as populações microbianas e com os conteúdos de C orgânico, N total e água. Dick (1984), por sua vez, calculou que 78 a 92% da variação total das atividades enzimáticas observadas nas amostras sob plantio direto estava relacionada com a concentração de C orgânico.

Cochran et al. (1989), utilizando cevada por quatro anos consecutivos em solos sub-árticos, não verificaram efeitos significativos dos tratamentos de cultivo sobre as atividades de desidrogenase, fosfatase e urease. Segundo os autores, algumas diferenças quanto a atividades enzimáticas encontradas entre áreas sob plantio direto e convencional foram explicadas por mudanças nas populações microbianas aeróbias e anaeróbias, já que os solos sob semeadura direta normalmente apresentam um ambiente menos oxidativo, quando comparados a solos mais mobilizados.

Aon e Colaneri (2001) verificaram que três propriedades físico-químicas (C orgânico, N total e espaço poroso preenchido por água) apresentaram fortes correlações com as atividades enzimáticas avaliadas (fosfatase ácida e alcalina, β -glucosidase, urease, atividade de hidrólise de FDA e desidrogenase) independente da época do ano ou da presença de culturas. Segundo os autores, os resultados obtidos estão em concordância com a hipótese de que as atividades enzimáticas desempenham um papel integrativo entre as propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo.

Monreal e Bergstrom (2000) identificaram complexos de enzimas mineralizadoras de nutrientes do solo expressando a influencia do uso da terra, do sistema de manejo e da textura sobre a qualidade bioquímica do solo em sistemas envolvendo milho, soja, trigo e aveia. As atividades de desidrogenase, β -glucosidase, L-glutaminase, urease, fosfatase alcalina e aril-sulfatase foram medidas, sendo as amostras retiradas de gleissolos e luvisolos não cultivados e cultivados em cultivo convencional e em cultivo reduzido. A análise de discriminação mostrou um fator de decomposição enzimática que capturou que 96% da dispersão total da atividade enzimática do solo responde ao tipo de uso do solo e ao sistema de manejo. As enzimas β -glucosidase, desidrogenase e L-glutaminase foram as que mais contribuíram para este fator e foram indicadores sensíveis para acessar a saúde dos processos de mineralização microbiana dos ciclos do C e do N. A análise de agrupamento auxiliou na definição de sete níveis de atividades enzimáticas do solo variando de níveis muito baixos (a maioria em solos cultivados sob cultivo convencional) até níveis muito altos (a maioria em solos não cultivados e solos cultivados sob cultivo reduzido). Conforme os autores, a identificação dos fatores enzimáticos-chave e a definição de níveis de atividades enzimáticas podem servir como uma base para o desenvolvimento de sistemas quantitativos de monitoramento do impacto dos sistemas de produção sobre enzimas de solo que possuem funções ecológicas específicas nos solos agrícolas. As diversas alterações químicas, físicas e biológicas verificadas nos solos submetidos à saturação com água também refletem-se nas atividades das enzimas do solo. Em particular, segundo Gianfreda e Bollag (1996), as mudanças no potencial redox devem influenciá-las especialmente em função dos íons metálicos reduzidos que são liberados e que agem como inibidores ou ativadores de enzimas. Pulford e Tabatabai (1988) estudaram as atividades de oito enzimas envolvidas nos ciclos do C, N, P e S, em dez diferentes solos antes e depois de sua saturação hídrica por sete dias a 22°C. As porcentagens de mudanças variaram de -59 a +2% para a fosfatase ácida, de -51 a +2% para a fosfatase alcalina, de -66 a -19% para a urease, de -31 a -5% para aril-sulfatase, de -43 a +43% para β -glucosidase e acima de 71% para a amidase. As atividades das fosfatases ácida e alcalina, da urease e da aril-sulfatase foram positivamente correlacionadas com o Eh, enquanto que as atividades das fosfodiesterases e da amidase correlacionaram-se negativamente com este indicador de oxiredução. As atividades enzimáticas do solo podem ser especialmente afetadas pela presença e pela natureza da cobertura vegetal. As plantas podem comportar-se como fontes de enzimas ou contribuir para o favorecimento das condições necessárias para a síntese microbiana de enzimas (Gianfreda e Bollag, 1996). Pancholy e Rice (1973), por exemplo, testaram a atividade de amilase, celulase, invertase, desidrogenase e urease em três diferentes estágios de sucessão vegetal para três diferentes tipos de vegetação. Encontraram atividade de carboidrases mais altas nos estágios de sucessão iniciais e decréscimo quando a sucessão tendia ao *clímax*. Por outro lado, as enzimas urease e desidrogenase apresentaram baixas atividades nos estágios iniciais e aumento das mesmas com o progresso das sucessões vegetais. Aparentemente, o tipo de vegetação, e

portanto o tipo de matéria orgânica adicionada ao solo durante a sucessão foram os principais determinantes dos gradientes de atividade das enzimas estudadas.

Já em outro trabalho realizado por Garcia et al. (1997a), foram quantificadas as mudanças na qualidade biológica de solos áridos da Espanha após sete anos da retirada da vegetação nativa. Foi observado que hidrolases como a urease, a fosfatase e a β -glucosidase tornaram-se menos ativas no solo, enquanto a protease que hidrolisa N- α -benzoi-L-argininamida não apresentou mudanças significativas em sua atividade.

Garcia et al. (1997b), em outro trabalho que avalia mudanças ocorridas na atividade microbiana em solos agrícolas após seu abandono, estudando sua recuperação espontânea, verificaram que solos abandonados por longo período e em processo de recuperação apresentam valores de oxidoredutases mais altos que os solos naturais. As atividades de hidrolases como proteases, ureases, β -glucosidases e fosfatases apontam para uma influência negativa das práticas culturais, indicando que a atividade humana não favoreceu o estabelecimento adequados da ciclagem de nutrientes. Os autores constataram que a interrupção da atividade agrícola levou à recuperação da atividade das hidrolases do solo.

Em um trabalho de Turner et al. (2002), a atividade da β -glucosidase foi analisada em 29 solos na Inglaterra e no País de Gales com cobertura de pastagem permanente e com diferentes propriedades físico-químicas e biológicas. Os autores concluíram que a atividade da β -glucosidase é uma medida integrativa das propriedades físico-químicas e biológicas do solo e pode ter aplicações no monitoramento biológico de sua qualidade.

Os impactos causados por sistemas de rotação de culturas sobre a qualidade do solo também podem ser verificados pela análise das atividades enzimáticas do mesmo (Khan, 1970; Angers et al., 1993). Khan (1970), analisando os efeitos de longo prazo de sistemas de culturas sobre a atividade de algumas enzimas de solo, verificou que os sistemas de rotação apresentam um efeito pronunciado na atividade das enzimas. As atividades de desidrogenase, urease, catalase, fosfatase e invertase dos solos na rotação foram significativamente maiores do que aquelas do sistema trigo-pousio, sendo que as atividades da fosfatase e da invertase foram quase o dobro de um sistema para o outro. Conforme o autor, é possível que a presença das leguminosas na rotação tenha resultado em um considerável aumento da atividade microbiológica total do solo, em relação ao sistema trigo-pousio.

A adição de fertilizantes orgânicos e inorgânicos ao solo pode alterar suas características qualitativas e as análises de atividades enzimáticas também podem contribuir para a avaliação destas (Bolton et al., 1985; Verstraete e Voets, 1977; Martens et al. 1992). Martens et al. (1992) conduziram um estudo de campo para determinar a atividade e persistência de enzimas de solo com adições repetidas de diferentes resíduos orgânicos. As atividades de 10 enzimas (fosfatase ácida e alcalina, aril-sulfatase, N-acetil- β -glucosaminidase, β -glucosidase, β -galactosidase, invertase, desidrogenase, amidase e urease) foram analisadas em um solo que havia recebido 100 Mg ha⁻¹ de esterco de galinha, lodo de esgoto, palha de cevada ou alfafa fresca durante 31 meses (25 Mg ha⁻¹ x 4 adições). As atividades enzimáticas analisadas nos solos adubados aumentaram em média de

2 a 4 vezes pela incorporação dos quatro adubos quando comparadas com as do solo não adubado, durante o período de estudo. De forma geral, no entanto, a adição de adubos orgânicos aumentou a atividade enzimática apenas durante o primeiro ano do experimento, sendo que as adições subseqüentes não permitiram a sustentação de uma alta atividade enzimática nos solos adubados. A adição de palha foi a que apresentou o melhor resultado quanto ao aumento da atividade enzimática para todas as enzimas estudadas, com exceção da urease.

Conforme Vepsäläinen et al. (2001), as atividades enzimáticas reagem prontamente às práticas de cultivo, porém também são alteradas pelas mudanças sazonais. São afetadas pelos consórcios microbianos, pela disponibilidade de substrato, pela presença de plantas e animais, por inibições em *feedback* e outras, e por características físicas e químicas do solo. Portanto, segundo os autores, critérios gerais de qualidade não podem ser estabelecidos no presente estado do conhecimento. Os resultados destes autores, no entanto, sustentam os trabalhos de Bandick e Dick (1999) e Kandeler et al. (1999a,b,c), afirmando a utilidade do estabelecimento de padrões para as atividades enzimáticas no monitoramento das tendências do solo ao longo do tempo e no seu uso como indicadores de mudanças induzidas pelo manejo no solo.

3. HIPÓTESES E OBJETIVOS

A hipótese principal a ser verificada neste trabalho é a seguinte:

- A biomassa microbiana e a atividade biológica de um solo agrícola servem como indicadores biológicos de sua qualidade.

Os objetivos gerais do trabalho são:

- Avaliar se as quantificações de biomassa microbiana e atividade biológica, avaliada por atividades enzimáticas e respiração microbiana, são adequadas para o uso como indicadores biológicos de qualidade de um solo.
- Propor um índice biológico de qualidade de solo capaz de quantificar os efeitos bióticos globais de diferentes coberturas vegetais e práticas de manejo sobre o mesmo.

Hipóteses e objetivos específicos

Estudo 1 - Biomassa microbiana e atividade biológica como indicadores de qualidade de um solo sob diferentes coberturas vegetais ao longo de um ano de cultivo (2000 / 2001)

Hipóteses:

- A biomassa microbiana e a atividade biológica do solo, medida por sua respiração microbiana e suas atividades enzimáticas, podem diferenciá-lo quanto a sua qualidade, quando sob influência de distintas coberturas vegetais e práticas de manejo.
- Existem correlações entre as variáveis biológicas avaliadas e indicadores físicos, de fertilidade química e de produtividade do solo que comprovam a adequação de seu uso como indicadores biológicos.
- As variáveis biológicas utilizadas apresentam variação sazonal ao longo do ano, havendo um período durante o qual há maior possibilidade de diferenciação dos manejos adotados sobre o solo pelas mesmas.

Objetivos:

- Avaliar a variabilidade da biomassa e respiração microbianas e das atividades de cinco enzimas de solo ligadas à ciclagem dos principais nutrientes vegetais, sob diversos tratamentos de cobertura vegetal e de práticas de manejo, ao longo de um ano de cultivo, de forma a identificar a possibilidade de seu uso como indicadores biológicos de qualidade do solo.
- Avaliar as correlações existentes entre biomassa e respiração microbianas e atividades enzimáticas de solo, e sua produtividade vegetal ao longo do tempo, bem como com outros indicadores químicos e físicos de qualidade, quando sob o efeito de diferentes coberturas vegetais e práticas de manejo.
- Identificar em que época do ano estas variáveis biológicas melhor diferenciam os vários tratamentos de cobertura vegetal e de práticas de manejo, de forma a maximizar seu uso como indicadores biológicos de qualidade do solo.

Estudo 2 – Qualidade de um solo sob pastagem cultivada e sob dois sistemas de cultura de milho (com e sem consórcio com leguminosa de verão) em relação aos tratamentos referência sob campo nativo e solo descoberto, avaliada por indicadores biológicos

Hipótese:

- Um solo sob pastagem cultivada constituída por gramínea perene apresentará indicadores biológicos de qualidade com valores superiores aos verificados nos tratamentos com culturas anuais e próximos aos observados no solo sob campo nativo, em função da presença constante de raízes e de cobertura vegetal sobre o mesmo.

Objetivo:

- Avaliar a qualidade de um solo sob pastagem cultivada com gramínea perene em relação a dois sistemas de cultura de milho e aos tratamentos referências sob campo nativo e solo descoberto, por meio de indicadores biológicos.

Estudo 3 - Qualidade de um solo sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de nitrogênio mineral em cobertura, em relação aos tratamentos referência sob campo nativo e solo descoberto, avaliada por indicadores biológicos

Hipótese:

- A adição de N mineral em cobertura na cultura do milho, seja ela consorciada com leguminosas ou não, aumenta a ciclagem de carbono do solo, demonstrável por uma maior respiração microbiana e maior atividade de β -glucosidase, porém reduz sua capacidade biológica de ciclagem de outros nutrientes como N, P e S, demonstrável por reduções nas atividades de enzimas como a urease, a amidase, a fosfatase ácida e a aril-sulfatase, reduzindo, conseqüentemente, sua qualidade em termos biológicos.

Objetivo:

- avaliar a qualidade de um solo por meio de indicadores biológicos, em função do efeito da adição de N em cobertura no milho em dois sistemas de cultura de milho (com e sem consórcio com leguminosa de verão), em relação ao solo referência sob campo nativo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área experimental

4.1.1. Localização

Para o presente trabalho, foi utilizado um experimento já em andamento para a coleta de amostras de solo. O experimento utilizado é de longa duração, estando implantado desde 1983 na Estação Experimental Agronômica da Faculdade de Agronomia – UFRGS, em Eldorado do Sul, Km 146 da BR 290, a 30° 50' 52" de latitude Sul e 51° 38' 08" de longitude Oeste. A área experimental pertence à região fisiográfica da Depressão Central, sendo que a altitude da mesma é de 96 m.

4.1.2. Clima da região

Segundo Köppen (1948), o clima é do tipo Cfa, ou seja, temperado sem estação seca definida. As temperaturas médias anuais mínimas e máximas da região são de 13,9°C e 24°C, respectivamente, com uma temperatura média anual de 19,4°C. A precipitação pluviométrica anual é de 1440mm, com variações médias mensais de 95,7 a 168 mm (Bergamaschi e Guadagnin, 1990).

4.1.3. Solo

O experimento utilizado encontra-se instalado sobre um Argissolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999) (*Typic Paleudult*, na Classificação Americana e *Acrisol*, pela legenda da FAO), de textura franco argilosa, origem granítica e relevo ondulado. Apresenta 540, 240 e 220 g kg⁻¹ de areia, silte e argila, respectivamente, na camada 0-15cm (Silva e Mielniczuk, 1997). Os principais minerais na fração argila são caulinita (720 g kg⁻¹) e óxidos de ferro (109 g kg⁻¹) (Bayer, 1996). Informações adicionais sobre atributos químicos e físicos do solo podem ser encontrados em Paladini e Mielniczuk (1991) e Burle et al. (1997).

4.2. Descrição do experimento avaliado

A área utilizada para a instalação do experimento, inicialmente sobre vegetação de campo nativo, havia sido utilizada desde 1969 para produção de culturas anuais (girassol e colza), com preparo intensivo do solo com enxada rotativa e grade de discos. Por meio deste manejo, continuado por 15 anos, o solo da área foi erodido, compactado e degradado, de tal forma que, em 1983, a área mostrava sinais visíveis de degradação estrutural e compactação (Medeiros, 1985). A partir deste ano, foi estabelecido um experimento visando avaliar a recuperação do solo por diferentes sistemas de culturas em semeadura direta. O esquema da área experimental pode ser visualizado na Figura 03.

—
—
Legenda:

Sistemas Aplicação de N em cobertura

de culturas

1. Solo descoberto
2. Pousio / milho
3. Aveia / milho
4. Pousio / milho + lab-lab
5. Aveia + vica / milho + caupi
6. Guandu / milho + guandu
7. Campo nativo
8. Pangola

FIGURA O3. Esquema da área experimental (adaptado de Medeiros, 1985)

Ao longo do presente trabalho, juntamente com as amostragens realizadas nas parcelas do experimento propriamente dito, foi também amostrada e avaliada uma área de solo sob campo nativo adjacente, que serviu de testemunha da condição original do solo (Figura O3).

O solo da área experimental já foi avaliado quanto às alterações qualitativas da MO do solo (Pavinato, 1993; Burle, 1995), fertilidade (Teixeira, 1988; Testa, 1989; Burle, 1995), temperatura e umidade do solo (Bragagnolo, 1986), microbiota do solo (Cattelan, 1989) e agregação (Silva, 1993; Vezzani, 2001) e produtividade ao longo do tempo (Medeiros, 1985; Teixeira, 1988; Testa, 1989; Pavinato, 1993; Burle, 1995), sendo que alguns destes dados serão utilizados neste trabalho em correlações com as variáveis biológicas aqui avaliadas.

Em todos os tratamentos envolvendo culturas, as operações e tratos culturais foram realizados com a menor movimentação do solo possível, sendo a resteva sempre deixada nas parcelas, sobre o solo. No primeiro ano do presente trabalho, o milho foi semeado em 14 de setembro de 2000 e colhido em 20 de março de 2001, e no segundo, foi semeado em 24 de setembro. Os tratamentos receberam 75 kg de P_2O_5 ha^{-1} ano^{-1} e 45 kg de K_2O ha^{-1} ano^{-1} na semeadura do milho. Em 1998, foram aplicados em torno de 2Mg ha^{-1} de calcário em superfície. Foram realizadas irrigações por aspersão durante o período estival em todos os tratamentos, com exceção do campo nativo.

O campo nativo não foi submetido a pastoreio, mas foi mantido baixo pela utilização de uma roçadeira mecânica. Sua composição básica é de gramíneas, principalmente *Paspalum notatum* e *Axonopus* sp. (Cattelan, 1989).

As parcelas com capim pangola, avaliadas no estudo 2, foram reinstaladas com esta gramínea após o cultivo do milho no verão de 1995/96, sendo a mesma plantada através de mudas, com um espaçamento de 0,50 x 0,50 cm.

As parcelas com aplicação de N em cobertura, avaliadas no estudo 3, receberam 180 Kg de N ha^{-1} , na forma de uréia, sendo a mesma aplicada a lanço a uma distância de 10 a 15 cm das fileiras de milho. Esta aplicação vem sendo repetida nestas sub-parcelas desde a implantação do experimento, tendo sido alterada, neste período, apenas a dosagem da mesma: até o ano de cultivo de 1994/95, a

dose aplicada foi de 120 Kg de N ha⁻¹, sendo elevada para a dosagem atual a partir do cultivo seguinte.

4.3. Divisão em estudos

O trabalho foi dividido em duas etapas e três estudos. A primeira etapa compreendeu o período completo de um ano agrícola (setembro/2000 a agosto/2001), e, ao longo dela, foi realizado o primeiro estudo. A segunda etapa correspondeu ao período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002, e, ao longo dela, foram realizados os outros dois estudos.

4.3.1. Estudo 1 – Biomassa microbiana e atividade biológica como indicadores de qualidade de um solo sob diferentes coberturas vegetais ao longo de um ano de cultivo (2000 / 2001)

No estudo 1 foram analisadas sete variáveis biológicas: biomassa microbiana (BM), respiração microbiana (RM) e atividades das seguintes enzimas de solo: β - glucosidase, urease, amidase, fosfatase ácida e aril-sulfatase, visando observar suas correlações com outras variáveis de solo nos respectivos tratamentos analisados, e sua variabilidade ao longo do período de estudo.

4.3.1.1. Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos utilizados no estudo 1 estão apresentados na Tabela 01, juntamente com suas respectivas nomenclaturas.

TABELA 01. Tratamentos utilizados no estudo 1 e suas respectivas nomenclaturas.

Tratamentos		Nomenclatura
Inverno	Verão	
solo descoberto ⁽¹⁾	solo descoberto ⁽¹⁾) ⁽²⁾	
pousio	milho (<i>Zea mays</i> L.)	
aveia (<i>Avena strigosa</i> Schreb)	milho	
pousio ⁽³⁾	milho com lablab (<i>Lablab purpureus</i> (L.) Sweet)	P/M+L
aveia com	milho com	A+V/M+C

vica (<i>Vicia sativa</i> L.)	caupi (<i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp)	
guandu (<i>Cajanus cajan</i> (L.) Milsp)	milho com guandu	G/M+G
campo nativo	campo nativo	

⁽¹⁾ Mantido sem plantas por preparo de solo até o ano de 1988, e por aplicação de herbicidas após esta data.

⁽²⁾ Cultiva-se milho a cada 5 anos: 1^o cultivo - 1988/89, 2^o cultivo - 1993/94, 3^o cultivo - 1998/1999.

⁽³⁾ Este sistema fica em pousio somente após a ocorrência de geada; no inverno de 2000, ocorreram geadas fortes que impediram o desenvolvimento vegetativo do lablab.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com três repetições.

4.3.1.2. Coleta, processamento e armazenagem de amostras de solo

As amostras de solo foram coletadas com trado calador na profundidade de 0 a 10 cm. Foram coletadas 10 sub-amostras para a formação das amostras compostas de cada unidade experimental, tendo sido amostrados os três blocos do experimento.

As amostras foram colocadas em sacos plásticos e transportadas imediatamente até o laboratório. No laboratório, foram homogeneizadas, peneiradas (4 mm mesh para análise de BM e RM, e 2 mm mesh para análise de atividades enzimáticas) e refrigeradas a 4^o C (atividades enzimáticas). Foi retirada uma porção de \pm 20 g de solo de cada amostra para a determinação do teor de umidade, por secagem em estufa a 105^o C até peso constante.

Uma fração de cada uma das amostras coletadas em setembro de 2000 foi enviada ao Laboratório de Análises de Solos da Faculdade de Agronomia – UFRGS, para determinação de características químicas descritas no decorrer do texto.

4.3.1.3. Variáveis biológicas avaliadas

Foram avaliadas ao longo do período a BM e a atividade biológica do solo nos diversos tratamentos. A metodologia e periodicidade das avaliações é descrita a seguir.

4.3.1.3.1. Biomassa microbiana

A biomassa microbiana (BM) foi avaliada mensalmente pelo método de fumigação com clorofórmio e incubação (Jenkinson & Powlson, 1976).

Após o processamento inicial, foram retiradas, de cada amostra de solo, duas subamostras. Uma delas, pesando 100 g, com umidade de campo, foi colocada em um vidro de 2 litros com vedação hermética. A segunda amostra, pesando 99 g, também com umidade de campo, foi colocada em um copo de vidro de 200 mL

e fumigada com clorofórmio livre de álcool. Isso foi feito em dessecadores, cada um contendo um becker de 50 mL contendo 15 mL de clorofórmio livre de álcool e com as paredes forradas por papel úmido. Com uma bomba, produziu-se vácuo no dessecador até que o clorofórmio borbulhasse (25 hPa). Essas amostras permaneceram nos dessecadores por 24 horas, à temperatura ambiente. Passado esse tempo, o vapor de clorofórmio foi retirado por seis evacuações sucessivas de três minutos cada, sendo as amostras então retiradas dos dessecadores e colocadas também nos vidros herméticos de 2 litros. Os solos fumigados foram reinoculados com 1 g de solo úmido, da mesma amostra original. Com uma espátula, foi feita a homogeneização de todas as amostras de solo e, em cada vidro, sobre um tripé metálico, foi colocado um copo de plástico de 50 mL (tipo "cafezinho"), contendo 20 mL de NaOH 1,0 N. Três vidros sem solo foram utilizados como prova em branco. A liberação de CO₂ foi medida aos 10 e aos 20 dias de incubação. Para tanto, foram adicionados 4 mL de uma solução de cloreto de bário (15%) e 3 gotas de fenolftaleína (solução alcoólica a 1%) em cada frasco, seguindo-se a titulação do excesso de NaOH com HCl 1,0 N padronizado. Na leitura dos 10 dias, os solos foram revolvidos com uma espátula e os vidros permaneceram abertos por 20 minutos, para haver a renovação do ar. Para o cálculo da quantidade de CO₂ liberada, foi utilizada a fórmula proposta por Stotzky (1965):

$$\text{mg C-CO}_2 = (B-V) \cdot M \cdot E$$

onde:

B = volume (mL) do ácido usado para titular a base referente à prova em branco

V = volume (mL) do ácido usado para titular a base referente ao tratamento

M = molaridade do ácido

E = equivalente grama do carbono = 6

O cálculo da BM foi feito com o uso da fórmula proposta por Jenkinson & Powlson (1976):

$$BM = \frac{(X - Y)}{K}$$

K

onde:

BM = biomassa microbiana (dados finais expressos em mg C Kg⁻¹ de solo seco)

X = C-CO₂ liberado pelo solo fumigado no período de 0 a 10 dias (mg C-CO₂ Kg⁻¹ de solo seco)

Y = C-CO₂ liberado pelo solo não fumigado no período de 10 a 20 dias (mg C-CO₂ Kg⁻¹ de solo seco)

K = fração da BM mineralizada em 10 dias, em condições experimentais, tendo sido utilizado o valor de 0,411 (Anderson e Domsch, 1978; Voroney e Paul, 1984).

4.3.1.3.2. Atividade biológica do solo

A atividade biológica foi avaliada pela respiração microbiana e pela presença de cinco enzimas participantes dos principais processos metabólicos que ocorrem no solo: β -glucosidase (ciclo do carbono), urease e amidase (ciclo do nitrogênio), fosfatase ácida (ciclo do fósforo) e aril-sulfatase (ciclo do enxofre).

4.3.1.3.2.1. Respiração microbiana

A avaliação da respiração microbiana (RM) foi feita juntamente com a avaliação da BM, sendo que os dados foram obtidos a partir do método de fumigação com clorofórmio (Jenkinson e Powlson, 1976) descrito acima. Para estimação desta variável, foi utilizada a soma da liberação de C, na forma de CO_2 , dos dois períodos de incubação de 10 dias do solo não fumigado, resultando num total acumulado de 20 dias.

4.3.1.3.2.2. Atividades de enzimas de solo

Foram determinadas as atividades de cinco enzimas de solo (β -glucosidase, urease, amidase, fosfatase ácida e aril-sulfatase), cujos métodos de análise são descritos por Dick et al. (1996). Foram feitas análises bimensais da atividade das mesmas nos diversos tratamentos, de setembro de 2000 a agosto de 2001, sendo que as duas primeiras análises tiveram um intervalo de um mês (setembro/outubro). A avaliação de setembro de 2000 para a atividade de urease foi desconsiderada, por ter apresentado valores muito distintos dos demais, provavelmente devido a erros metodológicos decorrentes da inexperiência do operador.

As metodologias empregadas na execução de cada uma das análises enzimáticas são descritas a seguir.

a) β -Glucosidase

O método baseia-se na determinação colorimétrica do p -nitrofenol liberado pela β -glucosidase quando o solo é incubado com p -nitrofenil- β -D-glicosídeo. O p -nitrofenol liberado é extraído por filtragem e determinado colorimetricamente. O tolueno é utilizado para inibir a atividade microrgânica durante a incubação, sendo o dado obtido resultado apenas da atividade de enzimas livres ou imobilizadas no solo.

Reagentes

1. Tolueno certificado.
2. Solução estoque de tampão universal modificado (MUB): dissolver 12,1 g de tris (hidroximetil) aminometano (THAM), 11,6 g de ácido maleico, 14,0 g de ácido cítrico e 6,3 g de ácido bórico (H_3BO_3) em 488 mL de hidróxido de sódio (NaOH) 1M e diluir a solução para 1 L com água. Guardar em local refrigerado.
3. Tampão universal modificado, pH 6,0: colocar 200mL de solução estoque MUB em um becker de 500mL contendo agitador magnético e sobre um agitador. Titular a solução a pH 6,0 com ácido clorídrico (HCl) 0,1 M, transferir para um frasco volumétrico de 1L e ajustar o volume para 1L com água.
4. p -Nitrofenil- β -D-glucosidase (PNG), 0,05 M: dissolver 0,654 g de PNG em \pm 40 mL de MUB pH 6,0 e diluir para 50 mL com MUB de mesmo pH. Guardar a solução sob refrigeração.

5. Cloreto de cálcio (CaCl_2) 0,5 M: dissolver 73,5 g de $\text{CaCl}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ em ± 700 mL de água, e diluir o volume para 1 L com água.
6. Hidróxido de sódio (NaOH), 0,5 M: dissolver 20 g de NaOH em ± 700 mL de água, e diluir o volume para 1 L com água.
7. Tris(hidroximetil)aminometano (THAM), 0,1 M, pH próximo a 10: dissolver 12,2 g de THAM em ± 800 mL de água, e ajustar o volume para 1 L com água.
8. Solução extratora THAM, 0,1 M, pH 12: dissolver 12,2 g de THAM em ± 800 mL de água, ajustar o pH para 12 por titulação com NaOH 0,5 M, e diluir para 1 L com água.
9. Solução padrão de p -nitrofenol: dissolver 1,0 g de p -nitrofenol em ± 700 mL de água, e diluir a solução para 1 L com água. Guardar a solução sob refrigeração.

Passos

1. Colocar 1 g de solo (<2 mm) em um frasco Erlenmeyer de 50 mL, adicionar 0,25 mL de tolueno, 4 mL de MUB pH 6,0, 1 mL de solução PNG, e agitar o frasco por alguns segundos para misturar os componentes. Tampar o frasco e colocá-lo em água em um incubador a 37°C .
2. Após 1 hora, remover a tampa, adicionar 1 mL de CaCl_2 0,5 M e 4 mL de tampão THAM 0,1 M pH 12, agitar o frasco por alguns segundos e filtrar a suspensão de solo em um papel filtro Whatman nº 2.
3. Ler a intensidade de desenvolvimento da cor amarela do filtrado com um espectrofotômetro a 410 nm.
4. Calcular o conteúdo de p -nitrofenol do filtrado em referência a um gráfico de calibração plotado com os resultados obtidos com padrões contendo 0, 10, 20, 30, 40 e $50\mu\text{g}$ de p -nitrofenol. Para preparar este gráfico, diluir 1 mL de solução padrão de p -nitrofenol para 100 mL em um frasco volumétrico e misturar a solução completamente. Então pipetar 0, 1, 2, 3, 4 ou 5 alíquotas desta solução padrão diluída em frasco Erlenmeyer de 50 mL, ajustar o volume para 5 mL com a adição de água, e proceder como descrito para a análise de p -nitrofenol da amostra de solo incubada (isto é, adicionar 1 mL de CaCl_2 0,5 M e 4 mL de tampão THAM 0,1 M pH 12, agitar o frasco por alguns segundos e filtrar a suspensão resultante). Se a intensidade da cor do filtrado exceder à do padrão de p -nitrofenol a $50\mu\text{g}$, uma alíquota do filtrado deveria ser diluída com solução THAM 0,1 M pH~10 até que a leitura do colorímetro caia dentro dos limites da calibração do gráfico.
5. Para realizar os controles, seguir os procedimentos descritos anteriormente, porém fazendo a adição de 1 mL de solução PNG após as adições de 1 mL de CaCl_2 0,5 M e 4 mL de tampão THAM 0,1 M pH 12 e imediatamente antes da filtração da suspensão de solo.

b) Urease

O método utilizado para avaliação da atividade da urease no solo é baseado na quantidade de NH_4 liberado durante a análise. Este método envolve o uso de tolueno, e tem sido aplicável a solos que fixam NH_4 .

Reagentes

1. Tolueno.
2. Tris(hidroximetil)aminometano (THAM), 0,05 M, pH 9: dissolver 6,1 g de THAM em ± 700 mL de água, titular a pH 9,0 com $\text{H}_2\text{SO}_4 \sim 0,2$ M e ajustar o volume para 1L com água.
3. Solução de uréia a 0,2 M: dissolver 1,2 g de uréia em ± 80 mL de tampão THAM, e diluir a solução para 100 mL com tampão THAM. Armazenar a solução sob refrigeração.
4. Solução de cloreto de potássio – sulfato de prata (KCl 2,5 M – Ag_2SO_4 100 ppm): dissolver 100 mg de reagente Ag_2SO_4 em ± 700 mL de água, dissolver 188 g de reagente KCl nesta solução (a dissolução deve ser feita sempre nesta ordem, sob pena de não ocorrer diluição do Ag_2SO_4) e diluir para 1L com água. É recomendável armazenar a solução a 4°C para aumentar o efeito de inibição da enzima.
5. Reagentes para determinação de $\text{NH}_4\text{-N}$ (MgO, solução indicadora - H_3BO_3 , H_2SO_4 0,0025 M): preparar como descrito por Tedesco et al. (1995) para análise de $\text{NH}_4\text{-N}$ do solo.

Passos

1. Colocar 5 g de solo (<2 mm) em um frasco volumétrico de 50 mL, adicionar 0,2 mL de tolueno e 9 mL de tampão THAM, misturar o frasco por alguns segundos para misturar os componentes, adicionar 1 mL de solução de uréia 0,2 M, e misturar o frasco novamente por alguns segundos. Tampar o frasco, colocá-lo em água em um incubador a 37°C .
2. Após 2 horas, remover a tampa, adicionar ± 35 mL de solução refrigerada de KCl – Ag_2SO_4 e misturar o frasco por alguns segundos. Aumentar o conteúdo para 50 mL por adição de solução KCl – Ag_2SO_4 , tampar o frasco e invertê-lo diversas vezes para misturar os conteúdos.
3. Para determinar $\text{NH}_4\text{-N}$ na suspensão de solo resultante, pipetar uma alíquota de 20 mL da suspensão para um frasco de destilação de 100 mL, e determinar o $\text{NH}_4\text{-N}$ liberado por destilação a vapor desta alíquota com 0,2 g de MgO por 4 minutos, como descrito por Tedesco et al. (1995) para análise de $\text{NH}_4\text{-N}$ do solo.
4. Os controles devem ser realizados em cada série de análises para determinar o $\text{NH}_4\text{-N}$ não derivado da uréia através da atividade da urease. Para realizar os controles, seguir os procedimentos descritos para análise de urease mas fazendo a adição de 1 mL de solução de uréia após a adição de 35 mL de solução de KCl – Ag_2SO_4 .

c) Amidase

O método é semelhante ao descrito para análise da atividade de urease, modificando apenas o pH do tampão e o substrato adicionado, que passa a ser a formamida.

Reagentes

1. Tolueno
2. Tris(hidroximetil)aminometano (THAM), 0,1 M, pH 8,5: dissolver 12,2 g de THAM em \pm 700 mL de água, titular para pH 9,0 com H_2SO_4 ~ 0,2 M, e ajustar o volume para 1L com água.
3. Solução de formamida (0,05 M): adicionar 2,0 mL de formamida certificada em um frasco volumétrico de 100 mL. Completar o volume com a adição de tampão THAM, e misturar o conteúdo. Armazenar a solução a 4°C.
4. Solução de cloreto de potássio – sulfato de prata (100 ppm): idem item 4 dos reagentes da Urease. Armazenar a solução a 4°C, para ampliar o efeito de inibição da enzima com efeito térmico (este procedimento é essencial na análise de amidase, já que a solução KCl – Ag_2SO_4 , por si só, não é suficiente para inibir a reação enzimática após a incubação).
5. Reagentes para determinação de NH_4-N (MgO, solução indicadora - H_3BO_3 , H_2SO_4 0,0025 M): preparar como descrito por Tedesco et al. (1995) para análise de NH_4-N do solo.

Passos

1. Seguir os procedimentos descritos para análise de urease, porém usando 1 mL de solução de formamida 0,2 M, ao invés de 1 mL de solução de uréia 0,5 M.
2. Os controles devem ser realizados em cada série de análises para determinar o NH_4-N não derivado da hidrólise da formamida. Para realizar os controles, seguir os procedimentos descritos para análise de urease, mas fazendo a adição de 1 mL de solução de formamida 0,5 M ao invés de uréia a 0,2 M.

Observações

Os procedimentos após a incubação devem ser realizados dentro do menor tempo possível, evitando erros em função da inibição parcial da atividade da enzima. Caso haja muitas amostras a serem destiladas, é conveniente manter os frascos contendo a solução em geladeira.

d) Fosfatase Ácida

Os procedimentos de análise da atividade da fosfatase ácida estão baseados em um princípio similar ao da β -glucosidase, no qual a hidrólise de p -nitrofenil fosfato libera p -nitrofenol, o qual é extraído quantitativamente do solo e medido colorimetricamente. O tolueno também é utilizado para inibir a atividade microbiana no momento da incubação.

Reagentes

1. Tolueno, MUB pH 6,5 (usar solução MUB estoque e titular com HCl 0,1 M), cloreto de cálcio (CaCl_2 , 0,5 M), hidróxido de sódio (NaOH, 0,5 M) e solução padrão de ρ -nitrofenol, como descrito para análise de β -glucosidase.
2. Solução de ρ -nitrofenil fosfato (PNP), 0,05 M: dissolver 0,840 g de ρ -nitrofenil fosfato dissódico tetra-hidratado em 40 mL de MUB pH 6,5, e completar a 50 mL com o mesmo tampão. Armazenar em ambiente refrigerado.

Passos

1. Colocar 1 g de solo (<2 mm) em um frasco Erlenmeyer de 50 mL, adicionar 0,2 mL de tolueno, 4 mL de MUB (pH 6,5 para análise de fosfatase ácida), 1 mL de solução PNP feita com o mesmo tampão, e agitar o frasco por alguns segundos para misturar os componentes. Tampar o frasco e colocá-lo em água em um incubador a 37°C.
2. Após 1 hora, remover a tampa, adicionar 1 mL de CaCl_2 0,5 M e 4 mL de NaOH 0,5 M, agitar o frasco por alguns segundos e filtrar a suspensão de solo em um papel filtro Whatman nº 2.
3. Procedimentos seguintes idênticos aos itens 3 e 4, descritos para a atividade da β -glucosidase.
4. Para realizar os controles, seguir os procedimentos descritos anteriormente, porém fazendo a adição de 1 mL de solução PNP após as adições de 1 mL de CaCl_2 0,5 M e 4 mL de NaOH 0,5 M e imediatamente antes da filtragem da suspensão de solo.

e) Aril-sulfatase

Este procedimento usa ρ -nitrofenil sulfato como substrato que, via hidrólise, libera sulfato e ρ -nitrofenol, o qual pode ser medido colorimetricamente. O uso do tolueno tem a mesma função descrita anteriormente.

Reagentes

1. Tolueno certificado.
2. Tampão de acetato, 0,5 M, pH 5,8: dissolver 68 g de acetato de sódio tri-hidratado em \pm 700 mL de água, adicionar 1,70 mL de ácido acético glacial (99%), e diluir o volume a 1L com água.
3. Solução de ρ -nitrofenil sulfato (PNS), 0,05 M: dissolver 0,614 g de ρ -nitrofenil sulfato de potássio em 40 mL de tampão de acetato, e diluir a solução a 50 mL com tampão. Armazenar sob refrigeração a 4°C.
4. Cloreto de cálcio (CaCl_2 , 0,5 M), hidróxido de sódio (NaOH, 0,5 M), e solução padrão de ρ -nitrofenol: preparar como descrito para atividade de β -glucosidase.

Passos

1. Colocar 1 g de solo (<2 mm) em um frasco Erlenmeyer de 50 mL, adicionar 0,25 mL de tolueno, 4 mL de tampão de acetato, 1 mL de solução PNS, e agitar o frasco por alguns segundos para misturar os componentes. Tampar o frasco e colocá-lo em água em um incubador a 37°C.
2. Após 1 hora, remover a tampa, adicionar 1 mL de CaCl₂ 0,5 M e 4 mL de NaOH 0,5 M, agitar o frasco por alguns segundos e filtrar a suspensão de solo em um papel filtro Whatman nº 2.
3. Procedimentos seguintes idênticos aos itens 3 e 4 descritos para a atividade da β -glucosidase.
4. Os controles devem ser realizados em cada série de análises para determinar a cor não derivada do ρ -nitrofenol liberado pela atividade da aril-sulfatase. Para realizar os controles, seguir os procedimentos descritos anteriormente, porém fazendo a adição de 1 mL de solução PNS após as adições de 1 mL de CaCl₂ 0,5 M e 4 mL de NaOH 0,5 M e imediatamente antes da filtragem da suspensão de solo.

4.3.1.4. Variáveis químicas

Em 7 de setembro de 2000, foram coletadas três amostras compostas de solo por tratamento e encaminhadas ao Laboratório de Análises de Solos e Tecidos da Faculdade de Agronomia – UFRGS, para fins de análise das seguintes propriedades químicas: pH (H₂O) e pH SMP, capacidade de troca e cátions (CTC), teores de macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S), de alumínio (Al), alumínio mais hidrogênio (Al+H) e porcentagem de saturação da CTC por bases e por Al. As metodologias utilizadas para estas análises estão descritas em Tedesco et al. (1995).

Foram também analisados os teores de carbono orgânico (C_{org}) (método Walkley-Black com calor externo), e de nitrogênio total (NT) (método de digestão Kjeldahl) das referidas amostras, sendo realizadas duas repetições por amostra. As metodologias de análise também estão descritas em Tedesco et al. (1995).

4.3.1.5. Variáveis físicas

As variáveis físicas avaliadas foram o teor de argila e a umidade gravimétrica, e as calculadas a partir de dados de outros autores foram a densidade e a massa de agregados de solo maiores que 2mm.

O teor de argila foi determinado nas mesmas amostras coletadas em 7 de setembro de 2000 e encaminhadas ao Laboratório de Análises de Solos e Tecidos da Faculdade de Agronomia – UFRGS, tendo sido realizado juntamente com as análises de propriedades químicas descritas acima.

A umidade gravimétrica foi determinada para cada amostra de solo coletada ao longo do período de estudo, conforme a metodologia descrita em Tedesco et al. (1995).

A densidade do solo foi calculada para a profundidade de 0-10cm, a partir dos dados obtidos por Bayer (1996).

A massa seca de agregados maiores que 2mm foi calculada para cada unidade experimental, a partir dos dados fornecidos por Vennazi (2001), sendo que não foram fornecidos os dados sobre o tratamento P/M.

4.3.1.6. Variáveis de produtividade

Foram também avaliados dados referentes a duas variáveis de produtividade dos tratamentos: quantidade de carbono adicionada ao solo ha⁻¹ em dez anos e rendimento médio de grãos de milho ha⁻¹.

A quantidade de carbono adicionada ao solo ha⁻¹ em dez anos foi obtida a partir dos dados fornecidos por Burle et al. (1997), sendo que faltam os valores referentes ao tratamento CN, já que este não foi avaliado naquele estudo.

O rendimento médio de grãos de milho foi obtido a partir dos dados tabulados pelo professor João Mielniczuk para o referido experimento, sendo que foram utilizados para o cálculo destes valores, os resultados das colheitas dos seis últimos anos (1995/96 a 2000/01). Os resultados apresentados para o tratamento SD são a média dos três anos em que o mesmo foi cultivado (1988/89, 1993/94, 1995/96). Não há resultados de rendimento de milho para o tratamento CN, já que este nunca foi cultivado.

4.3.1.7. Análise dos resultados

Os resultados de cada variável foram analisados e comparados entre si por análise de variância e teste de comparação de médias. Além disto, foram calculadas as correlações entre as variáveis biológicas (possíveis indicadores biológicos) e as variáveis químicas (indicadores químicos), físicas (indicadores físicos) e de produtividade (indicadores de produtividade).

Além disto, foram calculadas as médias dos resultados das variáveis biológicas ao longo de todo o período estudado, sendo que as médias para BM e RM foram relativas aos resultados dos 12 meses, e as das atividades enzimáticas, relativas às sete observações anuais (sendo apenas seis observações para a atividade da urease). Com estes resultados, foram obtidas as percentagens dos valores de cada tratamento para cada variável em relação ao valor obtido pelo tratamento referência CN, sendo este correspondente a 100, de acordo com a seguinte fórmula:

$$Y_{ij} = X_{ij} \times 100 / X_{CNj}$$

Sendo:

Y_{ij} = Valor percentual relativo do tratamento i para a variável biológica j.

X_{ij} = Valor médio real do tratamento i para a variável biológica j.

X_{CNj} = Valor médio real do tratamento CN para a variável biológica j.

Estes dados foram plotados em um gráfico radial, denominado "representação integrativa dos indicadores biológicos", onde cada variável foi representada por um eixo do gráfico. Os pontos referentes a cada tratamento foram unidos por linhas, formando um polígono. Esta forma de representação dos resultados permite uma análise mais integrativa, podendo-se perceber, a partir do formato dos polígonos, qual foi a evolução da qualidade do solo sob cada tratamento em relação ao tratamento referência CN e em relação aos demais.

Por fim, foi proposto um índice numérico que integra todos os resultados médios relativos das sete variáveis analisadas – o Índice Biológico de Qualidade do Solo (IBQS). Este índice pretende levar em conta a média geral dos desempenhos

relativos das variáveis biológicas (porcentagem em relação aos resultados obtidos para o tratamento CN), bem como a metade do desvio de médias existente entre os valores relativos destas variáveis. A inclusão do desvio das médias das variáveis no cálculo do IBQS foi feita para reduzir a possibilidade de que valores muito díspares entre si para um determinado tratamento, pudessem resultar em um índice irreal para o mesmo. Desta forma, considerando-se a metade do desvio das médias, obtém-se uma redução da influência de determinado(s) valor(es) discrepante(s), sem, no entanto, impedir que o(s) mesmo(s) exerça(m) influência sobre o valor final. O cálculo do IBQS é dado pela fórmula:

$$IBQS_i = M_i [1 - (D_i / 200)]$$

Sendo:

IBQS_i = Índice biológico de qualidade de solo para o tratamento i em relação ao solo original/natural.

M_i = Média das médias relativas das variáveis biológicas para o tratamento i.

D_i = Desvio de médias entre as médias relativas das variáveis biológicas para o tratamento i.

4.3.2. Estudo 2 – Qualidade de um solo sob pastagem cultivada e sob dois sistemas de cultura de milho (com e sem consórcio com leguminosa de verão) em relação aos tratamentos referência sob campo nativo e solo descoberto, avaliada por indicadores biológicos

O estudo 2 visou avaliar a qualidade de um solo sob pastagem cultivada com gramínea perene em relação a dois sistemas de cultura de milho (com e sem consórcio com leguminosa de verão) e aos tratamentos referência sob campo nativo e solo descoberto, por meio de indicadores biológicos.

4.3.2.1. Tratamentos e delineamento experimental

Para o estudo 2, foram mantidos quatro dos tratamentos utilizados no estudo 1 e foi incluído um quinto tratamento, constituído por uma pastagem cultivada perene de crescimento estival, muito utilizada como melhoradora de pastagens no sul do Brasil – o capim pangola (*Digitaria decumbens* Stent). Desta forma, os tratamentos utilizados no estudo 2 encontram-se relacionados na Tabela 02, juntamente com suas respectivas nomenclaturas.

TABELA 02. Tratamentos utilizados no estudo 2 e suas respectivas nomenclaturas.

Tratamentos		Nomenclatura
Inverno	Verão	
solo descoberto ⁽¹⁾	solo descoberto ⁽¹⁾) ⁽²⁾	
aveia	milho	
pousio ⁽³⁾	milho com	P/M+L

	lablab	
capim pangola (<i>Digitaria decumbens</i> Stent)	capim pangola (<i>Digitaria decumbens</i> Stent) ⁽²⁾	
campo nativo	campo nativo	

⁽¹⁾ Mantido sem plantas por preparo de solo até o ano de 1988, e por aplicação de herbicidas após esta data.

⁽²⁾ Foi cultivado o milho em alguns anos: 1º cultivo 1988/89, 2º cultivo 1993/94, 3º cultivo 1995/1996.

⁽³⁾ Este sistema fica em pousio somente após a ocorrência de geada; no inverno de 2001 não ocorreram geadas, o que permitiu a vegetação do lablab durante o período.

O delineamento experimental utilizado foi também o de blocos casualizados, com três repetições.

4.3.2.2. Coleta, processamento e armazenagem de amostras

As amostras foram coletadas, processadas e armazenadas segundo a mesma metodologia descrita no item 4.3.1.2. Foram realizadas coletas de amostras de solo nos meses de setembro, outubro e dezembro de 2001 e fevereiro de 2002, as quais foram analisadas para todos os sete indicadores biológicos.

4.3.2.3. Indicadores biológicos, químicos, físicos e de produtividade

Neste estudo, foram avaliadas as mesmas variáveis biológicas descritas no estudo 1, sendo agora consideradas indicadores biológicos, quais sejam: BM, RM e atividades de β -glucosidase, urease, amidase, fosfatase ácida e aril-sulfatase no solo. A metodologia destas avaliações encontra-se descrita no item 4.3.1.3.

Também foram avaliados, ou calculados a partir de dados de outros autores, os indicadores químicos, físicos e de produtividade relativos ao tratamento PA, cujos resultados são apresentados nos apêndices 22, 23, 24, 25 e 26, juntamente com os dos demais tratamentos, para efeito de comparação.

4.3.2.4. Análise dos resultados

Os resultados foram avaliados da mesma forma apresentada no estudo 1 e descrita no item 4.3.1.7., com exceção de que, neste estudo, não foram calculadas correlações entre os indicadores biológicos analisados e os demais. Os valores destes últimos foram utilizados apenas quando necessário, para a discussão dos resultados.

4.3.3. Estudo 3 – Qualidade de um solo sob sistemas de cultura de milho com e sem consórcio com leguminosa de verão, com e sem a adição de nitrogênio mineral em cobertura, em relação aos tratamentos referência sob campo nativo e solo descoberto, avaliada por indicadores biológicos

O estudo 3 visou avaliar a qualidade de um solo por meio de indicadores biológicos, em função do efeito da adição de N em cobertura na cultura do milho

em sistemas de cultivo com e sem consórcio com leguminosa de verão, em relação aos tratamentos referência sob campo nativo e solo descoberto.

4.3.3.1. Tratamentos e delineamento experimental

Para atingir o objetivo acima, foram avaliados seis tratamentos, sendo que quatro deles repetem-se nos estudos 1 e 2: SD, A/M, P/M+L e CN. Os tratamentos agregados a este estudo consistem nos tratamentos de cultivo (A/M e P/M+L) adicionados de 180 kg de N ha⁻¹, na forma de uréia. Estas adições ocorreram em duas aplicações, sendo a primeira na dose de 60 kg de N ha⁻¹, 15 dias após a semeadura do milho (09 de outubro de 2001), e a segunda na dose de 120 kg de N ha⁻¹, 55 dias após a mesma (19 de novembro de 2001). Os tratamentos utilizados no estudo 3 encontram-se relacionados na Tabela 03, acompanhados de suas respectivas nomenclaturas.

TABELA 03. Tratamentos utilizados no estudo 3 e suas respectivas nomenclaturas.

Tratamentos		Nomenclatura
Inverno	Verão	
solo descoberto ⁽¹⁾	solo descoberto ⁽¹⁾ (2)	
aveia	milho sem adição de N em cobertura	
aveia	milho com adição de 180 kg de N ha ⁻¹ em cobertura ⁽⁴⁾	
pousio ⁽³⁾	milho com lablab sem adição de N em cobertura ⁽¹⁾	P/M+L s/N
pousio ⁽³⁾	milho com lablab com adição de 180 kg de N ha ⁻¹ em cobertura ⁽⁴⁾	P/M+L c/N
campo nativo	campo nativo	

⁽¹⁾ Mantido sem plantas por preparo de solo até o ano de 1988, e por aplicação de herbicidas após esta data.

⁽²⁾ Foi cultivado o milho em alguns anos: 1° cultivo 1988/89, 2° cultivo 1993/94, 3° cultivo 1995/1996.

⁽³⁾ Este sistema fica em pousio somente após a ocorrência de geada; no inverno de 2001, não ocorreram geadas, permitindo que o lablab vegetasse durante o período.

⁽⁴⁾ Em duas aplicações na forma de uréia, sendo a primeira na dose de 60 kg de N ha⁻¹, 15 dias após a semeadura, e a segunda na dose de 120 kg de N ha⁻¹, 50 dias após a semeadura.

Foram idealizados dois delineamentos experimentais para analisar os dados deste estudo. O primeiro foi um fatorial 2x2 com três repetições, incluindo os dois cultivos anuais (A/M e P/M+L) e os dois níveis de adição de N (sem adição e com adição de 180 kg de N ha⁻¹). E o segundo delineamento foi também o de blocos casualizados, com três repetições, de tal forma que todos os seis tratamentos do estudo pudessem ser comparados entre si.

4.3.3.2. Coleta, processamento e armazenagem de amostras

As amostras foram coletadas, processadas e armazenadas segundo a mesma metodologia descrita no item 4.3.1.2.

As coletas de amostras de solo foram realizadas em quatro épocas, nas seguintes datas: sete dias antes da semeadura do milho (17 de setembro de 2001), 15 dias após a primeira adição de N em cobertura (24 de outubro), quinze dias após a segunda adição (04 de dezembro) e 90 dias após a segunda adição (17 de fevereiro de 2002), as quais foram analisadas para todos os sete indicadores biológicos.

As amostragens de solo realizadas nos tratamentos de cultivo foram feitas na faixa entre 10 a 15 cm de distância da linha de cultivo, correspondendo à mesma região onde foi aplicada a uréia em cobertura nos respectivos tratamentos.

4.3.3.3. Indicadores biológicos, químicos, físicos e de produtividade

Também neste estudo, foram avaliadas as mesmas variáveis biológicas descritas no estudo 1, sendo agora também consideradas como indicadores biológicos, quais sejam: BM, RM e atividades de β -glucosidase, urease, amidase, fosfatase ácida e aril-sulfatase no solo. A metodologia destas avaliações encontra-se descrita no item 4.3.1.3.

Também foram avaliados, ou calculados a partir de dados de outros autores, os indicadores químicos, físicos e de produtividade relativos aos tratamentos A/M c/N e P/M+L c/N, cujos resultados são apresentados nos apêndices 35, 36, 37 e 38, juntamente com os dos demais tratamentos, para efeito de comparação.

Neste estudo, foi realizado o cálculo da relação entre os valores dos indicadores biológicos avaliados e os seus respectivos teores de C_{org} para cada tratamento, os quais permitiram uma avaliação dos efeitos da adição de N mineral em cobertura na cultura do milho sobre a qualidade da MO presente nos solos destes tratamentos.

4.3.3.4. Análise dos resultados

Os resultados foram avaliados da mesma forma apresentada no estudo 1 e descrita no item 4.3.1.7, com a exceção de que a análise estatística dos resultados foi feita tanto pela ANOVA do fatorial 2x2, como do delineamento blocos ao acaso, comparando os seis tratamentos entre si para cada indicador biológico através das respectivas comparações de médias pelo teste de Tukey. Os

resultados da primeira análise são apresentados no corpo do texto, enquanto os da segunda encontram-se nos apêndices.

Também neste estudo não foram calculadas correlações entre os indicadores biológicos analisados e os demais, sendo que os valores destes últimos foram utilizados apenas quando necessário, na discussão dos resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ESTUDO 1: Biomassa e atividade microbianas como indicadores biológicos de qualidade de um solo sob diferentes coberturas vegetais ao longo de um ano de cultivo (2000 a 2001)

5.1.1. Biomassa microbiana

Os diferentes tratamentos de cobertura vegetal provocaram ampla variação sobre os valores de biomassa microbiana (BM) ao longo do período estudado. O tratamento CN, que representa o solo não perturbado e sob cobertura natural, apresentou valores de BM mais elevados em relação aos demais tratamentos durante todo o tempo da avaliação, com uma média de 563 mg de C Kg⁻¹ de solo (Figura 04 e Apêndice 01) ao longo do mesmo.

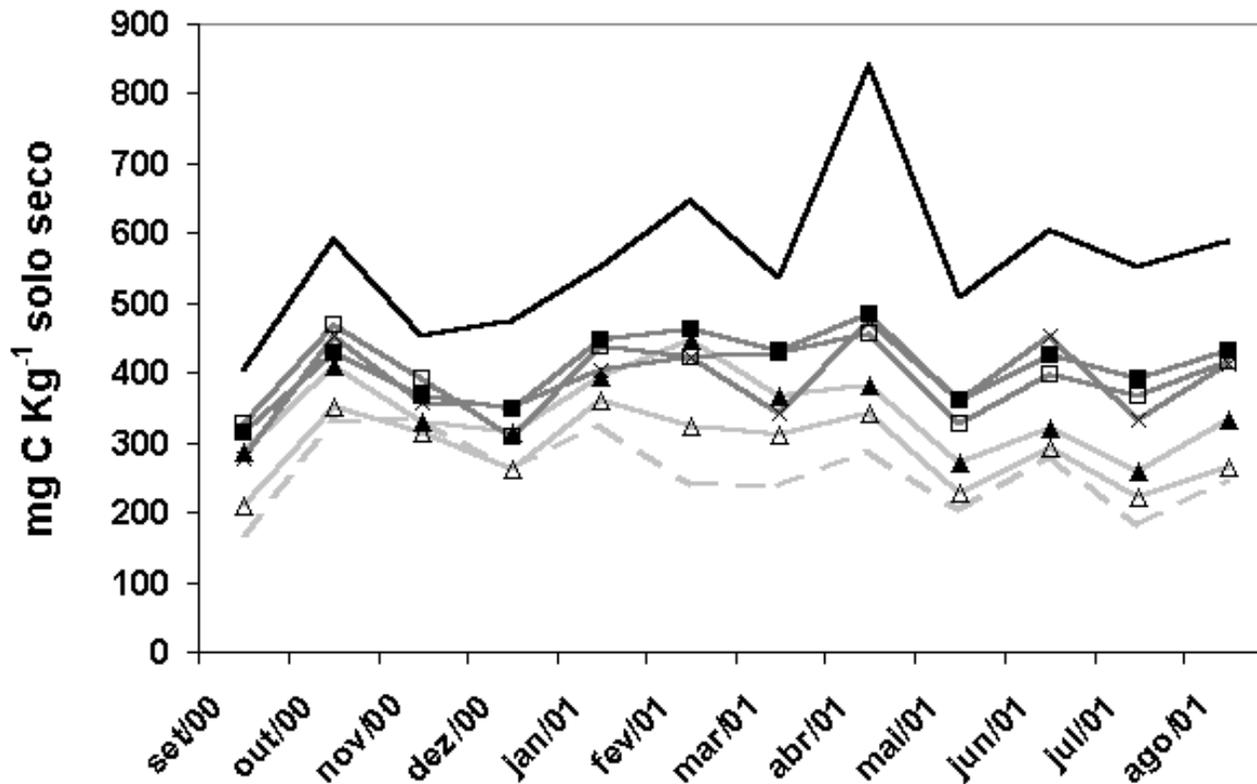


FIGURA 04. Biomassa microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diversos manejos de cobertura, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001). SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

Outros estudos também relatam maiores valores de BM em solos sob campo nativo em comparação com outros sistemas de culturas vegetais (Jenkinson & Powlson, 1976; Sparling & Eiland, 1983), sendo que o mesmo resultado também já havia sido observado neste mesmo experimento por Cattelan (1989). Segundo Rovira (1978), este efeito é devido à grande densidade e intensa renovação de raízes encontradas nas pastagens perenes, as quais transformam toda a camada mais superficial do solo em solo rizosférico, aumentando a disponibilidade de nutrientes e estimulando a BM. O alto teor de carbono orgânico (C_{org}) (Apêndice 12) no solo sob CN também colabora para este resultado, como pôde ser verificado pela alta correlação ($r=0,802^{**}$) entre C_{org} e BM (Apêndice 10). Segundo Alexander (1977), a MO do solo constitui-se na principal fonte de energia e nutrientes para os microrganismos heterotróficos, além de ampliar a capacidade de armazenamento de água do solo (Bragagnolo, 1986), o que favorece o desenvolvimento microbiano. Isto explica também a alta correlação verificada

entre a BM e a umidade gravimétrica ($r=0,555^{**}$) das amostras de solo (Apêndice 10). Aqui convém uma ressalva a respeito do valor deste coeficiente de correlação e seu grau de significância: todas as correlações realizadas entre as variáveis biológicas analisadas no presente trabalho e a umidade gravimétrica do solo consideraram todas as amostragens do período, o que, para a BM e a RM corresponde a 82 graus de liberdade, e para as avaliações de atividades enzimáticas corresponde a 47 graus de liberdade. Em função disto, mesmo que o valor de r encontrado seja baixo, como no presente caso, a correlação pode ser considerada alta, em função do grande número de amostras utilizadas em correlação.

De acordo com Garcia et al. (1997b), as práticas agrícolas não necessariamente provocam efeitos negativos sobre a BM, no entanto, também em seu trabalho, estas práticas causaram a redução dos valores da BM, de tal forma que um solo agrícola ainda em uso apresentou valores similares àqueles de um sítio abandonado há sete anos, possivelmente em função da monocultura praticada e da redução da diversidade vegetal (Griffith et al., 1988).

Dentre os sistemas com cultivo, destacaram-se os tratamentos com maior adição de massa vegetal (Apêndice 13), os quais contêm leguminosas em sua composição e, conseqüentemente, contêm também maior teor de C_{org} no solo (Apêndice 01). Assim, os valores de BM distribuíram-se entre os tratamentos de cultivo num gradiente iniciando com G/M+G, seguindo com A+V/M+C, P/M+L, A/M e finalizando com P/M, conforme pode ser observado pelas médias destes tratamentos ao longo do ano no Apêndice 01. Como se observa na Figura 04, os tratamentos de cultivo contendo leguminosas apresentaram valores de BM superiores aos dos tratamentos sem leguminosas, e diferenciaram-se estatisticamente entre si ao longo de todo o ano (Apêndice 01). Cattelan (1989) observa que a ausência de leguminosas no cultivo resulta em uma menor produção de massa verde, refletindo-se em menor cobertura do solo. Este fato reflete-se em menor crescimento de raízes e maiores amplitudes térmicas e hídricas nestes tratamentos, o que desfavorece o desenvolvimento microbiano nos mesmos. Cabe observar, por outro lado, que o solo sob o tratamento P/M+L, apesar de seu alto teor de C_{org} (1,69%) (Apêndice 12), apresentou teores de BM em média inferiores aos verificados para A+V/M+C (Apêndice 01), o qual apresenta teor de C_{org} inferior ao primeiro. Cattelan (1989), trabalhando com siratro, justifica efeito semelhante em função do acúmulo de resíduos orgânicos na superfície do solo neste tratamento, restringindo a ação dos microrganismos à camada mais superficial, já que as leguminosas tropicais como o siratro e o lablab apresentam sistemas radiculares pivotantes com poucas ramificações laterais, o que resulta em redução da BM em profundidade.

O tratamento SD apresentou, ao longo do período, a menor BM dentre os sistemas analisados (média de 258 mg Kg^{-1} de solo seco) (Apêndice 01). Este fato deve-se à muito baixa adição de massa vegetal neste tratamento ao longo dos anos (Apêndice 13) e conseqüente baixo teor de C_{org} (Apêndice 12) e limitação nutricional verificados neste solo (Apêndice 09), aliados à falta de cobertura vegetal sobre o mesmo, o que aumenta suas variações térmicas e hídricas (Apêndice 10), fatores estes que prejudicam o desenvolvimento microbiano.



A BM, de maneira geral em todos os tratamentos, sofreu grandes variações ao longo do período observado, em função de variações climáticas e ambientais. O comportamento foi muito semelhante para todos os tratamentos, tendo ocorrido picos de crescimento da BM nos meses de outubro, janeiro-fevereiro e abril, e mantendo-se relativamente estável ao longo do período hibernar. Estas flutuações devem ter sido verificadas em função das condições climáticas ocorridas no período, sendo que aumentos da BM no período estival são esperados em função do aumento da temperatura ambiente. É provável que a redução geral verificada no período de novembro-dezembro tenha ocorrido em função de uma moderada deficiência hídrica no solo no mês de novembro (Apêndice 10), associada à redução de material vegetal degradável na superfície do solo, já que o material da cultura de inverno já havia sido decomposto, inviabilizando boa parte da vida microbiana presente na camada avaliada. No mês de janeiro, houve uma recuperação na BM de todos os tratamentos, sendo que a mesma manteve-se ou aumentou no mês seguinte, nos tratamentos com cobertura vegetal na entrelinha, e foi reduzida no tratamento sem a mesma. Verifica-se aqui o efeito da presença da cobertura vegetal, proporcionando um ambiente mais favorável ao desenvolvimento microbiano, pela redução da temperatura e conservação da umidade do solo.

No mês de abril, verifica-se o valor de média mensal mais alto do período estudado (467 mg Kg^{-1} de solo seco) (Apêndice 01). Este acentuado pico observado na BM para este mês pode ser explicado pela alta adição de material vegetal ocorrida no mês anterior. No dia 20 de março, foi realizada a rolagem das culturas de verão nos tratamentos de cultivo, e o tratamento CN sofreu uma roçada com roçadeira mecânica no início do mesmo mês. Desta forma, a alta disponibilidade de material vegetal favoreceu grandemente o crescimento microbiano, provavelmente o fúngico, permitindo a elevação da BM no mês posterior. No mês seguinte, com a decomposição do material adicionado e a possível redução da temperatura em função da época do ano, ocorreu uma redução destes valores, os quais mantiveram-se em uma oscilação mais moderada até o mês de agosto. Entre os meses de abril a julho, verificou-se que os tratamentos SD, P/M e A/M formam um grupo, não se diferenciando entre si, porém diferenciando-se dos demais por seus valores bem mais reduzidos de BM neste período. Deste grupo, apenas o tratamento A/M não se diferenciou estatisticamente dos tratamentos P/M+L e/ou A+V/M+C, diferenciando-se, porém, dos tratamentos G/M+G e CN. O grupo de tratamentos com leguminosas apresentou um comportamento intermediário bem marcado neste período, diferenciando-se claramente do tratamento CN (Apêndice 01).

Cattelan (1989) observou flutuações semelhantes no período em que avaliou a BM deste experimento (fevereiro de 1987 a fevereiro de 1988). No entanto, como suas avaliações foram realizadas nas camadas de 0 a 5 cm e de 5 a 15 cm, observou variações ainda mais acentuadas na camada superior do solo e variações mais amenas na camada inferior. Isto porque a camada superior do solo está mais sujeita à ação do ambiente e das mudanças climáticas.

Em função de sua rápida reciclagem em relação à MO do solo (Paul, 1984), e por conseguir integrar propriedades físicas, químicas e responder às alterações provocadas pelo manejo, a BM é considerada por diversos autores (Campbell et

al., 1991; Rice et al., 1996) como um indicador adequado para avaliação da qualidade do solo. No entanto, Rice et al. (1996) ponderam que o fato de a BM estar sujeita a variações climáticas e sazonais e aos diversos tipos de solo, a interpretação direta de seus valores precisa ser feita com cuidado. Estas variações costumam ser ainda mais acentuadas em solos sob climas tropicais e subtropicais, tornando-a um indicador pouco confiável para a avaliação da qualidade do solo, especialmente quando tomada como um valor isolado, isto é, sem a possibilidade de comparação com resultados de solos adjacentes não manejados. Neste sentido, a possibilidade de uso deste indicador para avaliação de qualidade de solo limita-se a comparações com resultados de amostras de solo padrão (não manejado) coletadas na mesma época, preferencialmente em períodos de clima ameno, quando há maior probabilidade de diferenciação entre as amostras, devido às condições ambientais mais favoráveis ao desenvolvimento da BM.

5.1.2. Atividade biológica do solo

5.1.2.1. Respiração microbiana

Para estimação da respiração microbiana (RM) foi utilizada a soma da liberação de C-CO₂ dos dois períodos de incubação de dez dias do solo não fumigado, resultando num total acumulado de 20 dias. A RM apresentou resultados semelhantes aos observados na BM (Figura 05), havendo uma alta correlação ($r=0,713^{**}$) entre estas duas variáveis (Apêndice 08). O tratamento CN apresentou os valores mais elevados durante o período observado, com média anual de 200 mg C Kg⁻¹ de solo seco, enquanto o SD obteve os resultados mais baixos na maior parte do período, com média de 61 mg de C Kg⁻¹ de solo seco (Apêndice 02). Cattelan (1989), trabalhando com o mesmo experimento, constatou maior RM na camada mais superficial (0 a 5 cm), com médias variando de 364 a 108 mg de C Kg⁻¹ de solo, e menor RM na camada inferior (5 a 15 cm), com médias entre 164 e 90 mg de C Kg⁻¹ de solo, porém com distribuição de valores semelhante entre os tratamentos.

A visualização da Figura 05 torna evidente a superioridade dos valores de RM nos tratamentos contendo leguminosas, em relação aos que não as contêm. Da mesma forma, Campbell et al. (1991) verificaram que, tanto a RM, quanto a BM do solo elevaram seus níveis com a inclusão de leguminosas como adubo verde na rotação. A RM foi considerada pelos autores como um índice adequado para diferenciar os efeitos de tratamentos.

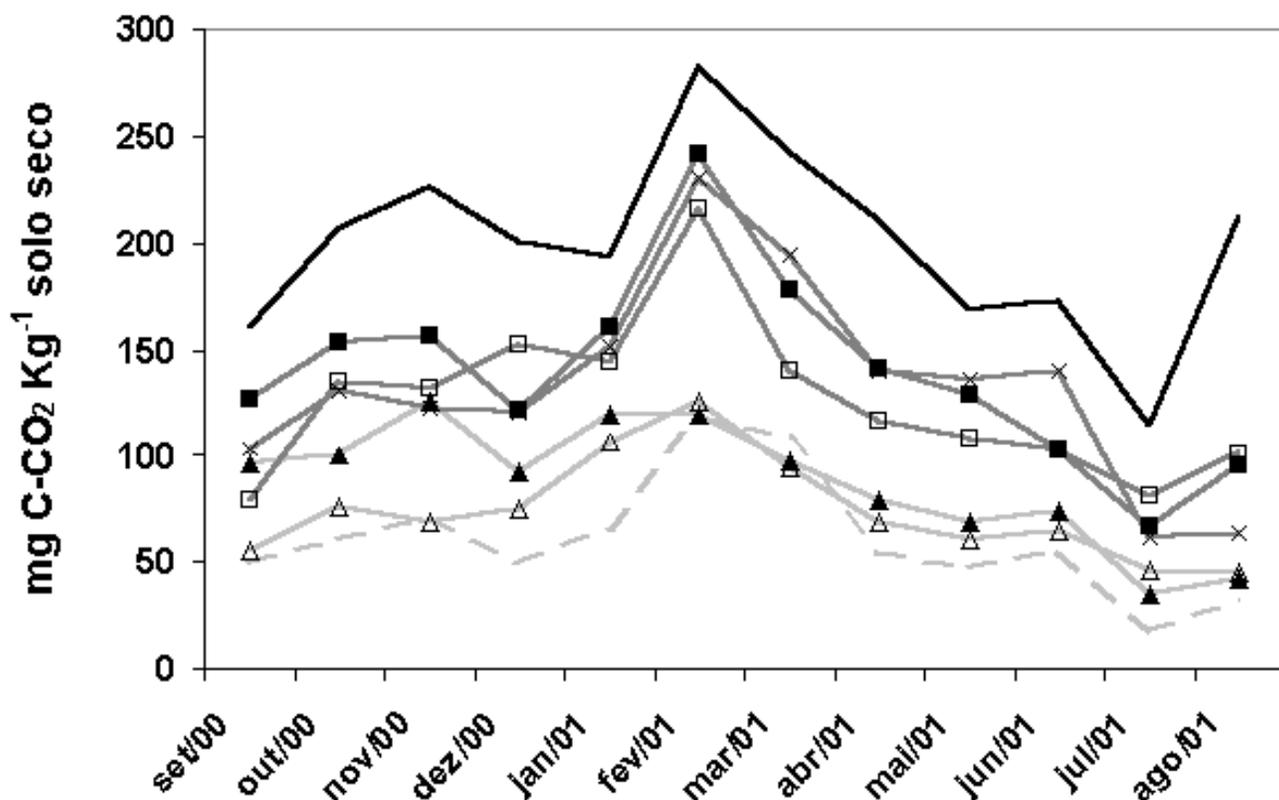


FIGURA 05. Respiração microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001). SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

O tratamento G/M+G não diferiu significativamente do CN nos meses de setembro e outubro, provavelmente devido à poda e deposição do material vegetal do guandu sobre o solo no mês de setembro, antes da semeadura do milho. Este material, rico em lignina (Khatounian, 1994) e, possivelmente também em polifenóis, foi sendo decomposto ao longo dos dois meses que se seguiram à deposição do material sobre o solo, provocando uma RM mais acentuada para este tratamento durante este período.

O resultado da RM para o tratamento P/M+L é o único que parece destoar em relação aos resultados obtidos para a BM em termos de ordem das médias anuais, apresentando uma média anual superior a A+V/M+C (133 contra 126 mg de C Kg⁻¹ de solo seco, respectivamente) (Apêndice 02). Esta maior atividade respiratória no solo sob P/M+L do que no sob A+V/M+C ocorreu no mês de setembro de 2000 e no período de março a junho de 2001, podendo tratar-se do

efeito da senescência ou da vegetação hiberna mais prolongada da leguminosa lablab, ocorrida neste ano em função da não ocorrência de geadas durante o período. Estes resultados, nem sempre acompanhados de um proporcional acréscimo na BM, denotam a presença de uma população microbiana mais ativa neste tratamento durante o período acima descrito. É provável que bactérias heterotróficas aeróbias estejam predominando na comunidade microbiana deste tratamento, já que este grupo microbiano apresenta um metabolismo mais ativo em relação aos demais, apesar de sua biomassa não ser tão expressiva em relação à BM total. A maior atividade respiratória verificada neste tratamento durante o período de outono-inverno ocorre, provavelmente, devido à grande disponibilização de material vegetal com baixa relação C:N e provável baixo conteúdo de lignina e polifenóis provindo da parte aérea do lablab. Calegari et al. (1992) relataram um teor de 5% de N na matéria seca do lablab. Conforme Paul & Clark (1996), as bactérias normalmente apresentam um teor intra-celular mais elevado de N do que os fungos. Assim, seu desempenho ótimo fica condicionado à disponibilidade de materiais com baixa relação C:N. Além disso, segundo Correia & Andrade (1999), a taxa de decomposição de serrapilheiras sofre também influência negativa com a presença de lignina e polifenóis. Oglesby & Fownes (1992), citados por Correia & Andrade (1999), observaram que a liberação de N das folhas de leguminosas tropicais apresentava correlação alta e negativa com a concentração de polifenóis, sugerindo que espécies com alto teor de polifenóis liberam N mais lentamente.

A população microbiana apresentou dois picos de maior atividade ao longo do período (Figura 05), para a maioria dos tratamentos, demonstrados pelo comportamento da RM dos mesmos. O primeiro pico deu-se entre os meses de outubro e novembro e o segundo, no mês de fevereiro. O primeiro pico deve estar relacionado à elevação da temperatura ambiente e à disponibilidade de resíduos orgânicos decomponíveis advindos das culturas de inverno. Prova disto está em que elevações na taxa respiratória são bem menos perceptíveis nos tratamentos sem cultura de cobertura no inverno (SD, P/M e P/M+L¹) neste período.

Entre os meses de novembro e dezembro, ocorreu uma queda na taxa respiratória microbiana da maioria dos tratamentos contendo vegetação durante o inverno. O tratamento A+V/M+C, no entanto, não apresentou esta queda da taxa respiratória. Isto deve-se, provavelmente, à presença do caupi em consórcio com o milho, o qual apresenta uma produção de massa mais rápida do que as demais leguminosas de verão utilizadas neste experimento, estando em pleno desenvolvimento vegetativo em torno do mês de dezembro. O efeito da presença dos sistemas radiculares das culturas estivais em desenvolvimento, possivelmente tenha permitido uma ativação mais gradual e contínua das populações microbianas presentes neste tratamento, durante o período citado. Esta queda na RM não foi perceptível nos tratamentos cultivados apenas no verão (P/M e P/M+L), já que a influência dos sistemas radiculares das culturas passou a favorecer as populações microbianas presentes nos solos dos mesmos, aumentando suas taxas respiratórias.

Um segundo pico de ativação respiratória ocorreu no mês de fevereiro, sendo que o mesmo não foi acompanhado em igual intensidade pela BM nos tratamentos sob cultivo (Figura 04), denotando uma aceleração da velocidade metabólica da

comunidade microbiana neste período. É possível que isto tenha ocorrido devido a que as plantas presentes nos tratamentos, cultivados ou não, tenham atingido aí o ápice de seu desenvolvimento. Assim, a ampliação da área de ação das raízes, o aumento de excreções radiculares e de deposições de material senescente, aliados a condições adequadas de umidade e temperatura, favoreceram a ativação da RM em todos os tratamentos no mês de fevereiro, de forma especial no tratamento CN e nos de cultivo contendo leguminosas em consórcio com o milho. No entanto, esta ativação ocorreu mesmo no tratamento SD, evidenciando a importância dos fatores climáticos sobre este evento.

No mês de março, observou-se uma queda na taxa respiratória de todos os tratamentos, tendo esta sido mais brusca nos tratamentos CN e de cultivo contendo leguminosas. É provável que isto tenha ocorrido, devido à redução do padrão de condicionantes ambientais necessárias ao desenvolvimento microbiano, como temperatura, umidade (Apêndice 10) e disponibilidade de C via excreções radiculares, de fevereiro para março. Esta queda da taxa respiratória se mantém para a maioria dos tratamentos, chegando a seu nível mais baixo no mês de julho, período que corresponde à ocorrência das mais baixas temperaturas no estado, bem como a uma tendência de elevadas precipitações no período.

As análises do mês de agosto demonstram uma tendência de recuperação da atividade microbiana global, verificando-se elevações nas taxas de RM na maioria dos tratamentos, e, de forma especial, no tratamento CN, possivelmente devido à ocorrência de condições ambientais mais favoráveis à atividade microbiana, bem como à germinação e desenvolvimento de plantas de ciclo estival sobre o solo do referido tratamento.

Ocorreram altas correlações dos resultados de RM com outros indicadores de qualidade de solo, como a massa de agregados maiores de 2 mm ($r=0,816^{**}$), o carbono adicionado pela parte aérea em 10 anos ($r=0,959^{**}$), o rendimento médio de grãos de milho ($r=0,991^{**}$), os teores de C_{org} ($r=0,838^{**}$) e de N total ($r=0,783^{**}$) (Apêndice 08). Estas correlações permitem afirmar que as avaliações de RM do solo são adequadas para uso como indicadores biológicas de sua qualidade.

A análise da RM permitiu diferenciar as diversas formas de manejo ao longo do período (Apêndice 02), possibilitando uma avaliação globalizante, porém pontual, da atividade microbiana presente em cada uma delas. É possível verificar que esta avaliação está muito sujeita às variações momentâneas do ambiente, sejam elas climáticas ou devidas aos cultivos e manejos adotados. Neste sentido, assim como as avaliações de BM, esta avaliação parece ser muito eficiente quando o interesse é verificar a atividade pontual do solo em determinado momento, porém seus resultados devem ser utilizados com cuidado para a realização de generalizações. No entanto, a possibilidade do uso de médias de observações da RM ao longo do tempo e a comparação destas com os resultados de amostras coletadas simultaneamente em solo não manejado, podem permitir generalizações mais adequadas quanto à atividade microbiana presente em determinado tratamento. Deve-se chamar a atenção, no entanto, à questão do longo tempo necessário para a obtenção dos resultados, quando do uso desta técnica, o que inviabiliza sua adoção em escala de rotina de laboratórios de análise.

5.1.2.2. Atividades de enzimas de solo

5.1.2.2.1. Atividade de β -glucosidase

Os valores de atividade da β -glucosidase observados variaram de 47 a 200 $\mu\text{g } \rho$ -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} , e estão próximos da faixa de valores obtidos por Mendes et al. (1999), em solos de cerrado sob plantio direto (até 190 e 50 $\mu\text{g } \rho$ -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} nas profundidade 0 a 5 cm e 5 a 20 cm, respectivamente). Rastin et al. (1988), num solo sob floresta decídua, na Europa, obtiveram valores máximos de atividade da β -glucosidase na profundidade 0 a 5 cm de apenas 30 $\mu\text{g } \rho$ -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} , bem inferiores aos observados neste experimento (Figura 06). Dick et al. (1996), no entanto, reunindo resultados de diversos experimentos com atividades enzimáticas, estabelecem que a faixa de variação para esta enzima está entre 38 e 720 $\mu\text{g } \rho$ -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} , para amostras com umidade de campo.

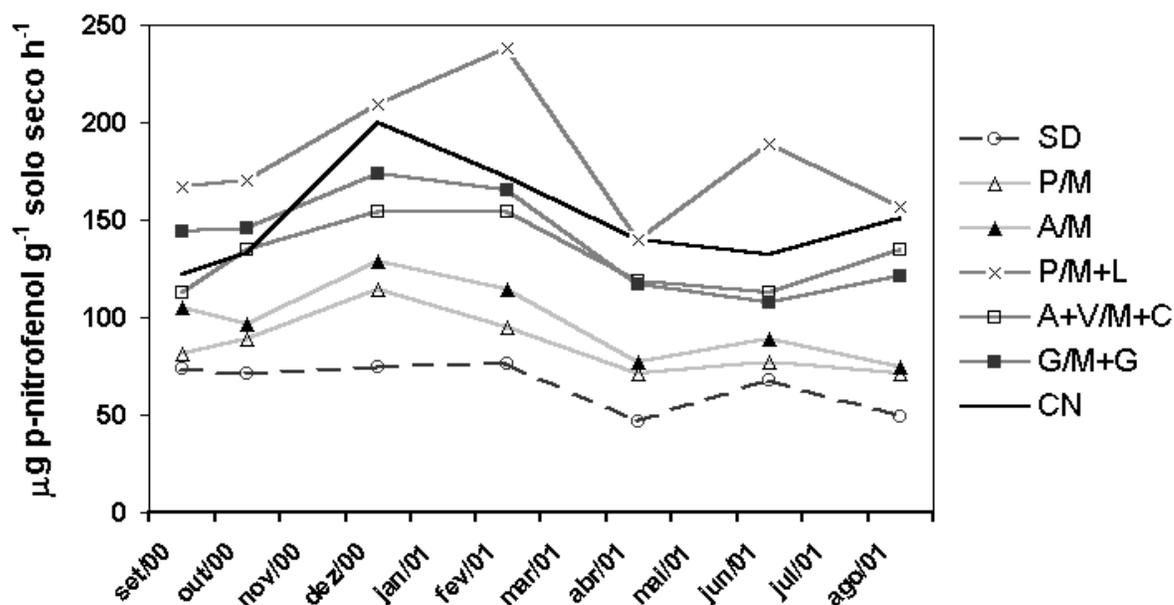


FIGURA 06. Atividade da β -glucosidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001). SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno; milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

O solo do tratamento P/M+L apresentou níveis de atividade de β -glucosidase superiores aos dos demais tratamentos ao longo de todo o período (Figura 06), com uma média anual de 181 μg de ρ -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} (Apêndice 03), superior inclusive ao tratamento referência CN, cuja média anual ficou em segundo lugar (150 μg de ρ -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1}). Este fato pode ser explicado pelas altas correlações desta atividade enzimática com os teores de C_{org} ($r=0,934^{**}$) e N total do solo ($r=0,931^{**}$) (Apêndice 08). Alef & Nannipieri (1995b), citando Eivazi & Tabatabai (1988), também relatam a ocorrência de correlação

desta atividade enzimática com o C_{org} do solo. Outra hipótese desta predominância é a alta adição de material com baixa relação C/N. Bandick e Dick (1999) também observaram atividade superior desta enzima, e de outras ligadas ao ciclo do C, em áreas de cultivo com adição de resíduos orgânicos ricos em N, em relação a áreas de pastagem contínua. A atividade da β -glucosidase elevou-se no tratamento P/M+L juntamente com o desenvolvimento das culturas durante o período de verão, sofrendo uma queda brusca quando a cultura do milho encerrou seu ciclo. O lablab seguiu vegetando durante o inverno deste ano, o que permitiu uma recuperação desta atividade enzimática no mês de junho, possivelmente também em função da decomposição da resteva do milho. Outra hipótese para estes valores enzimáticos serem mais elevados em P/M+L do que em CN diz respeito ao estágio de sucessão de cada tratamento, e, conseqüentemente, à sua complexidade. Pancholy e Rice (1973), tratando com diferentes estágios de sucessão vegetal, encontraram atividade de carboidrases mais altas nos estágios de sucessão iniciais e decréscimo, quando a sucessão tendia ao *clímax*.

Os demais tratamentos envolvendo cultivos apresentaram um comportamento semelhante ao já observado pelos indicadores descritos anteriormente, sendo que, a seguir ao tratamento já mencionado, aparecem G/M+G, A+V/M+C, A/M e P/M (médias anuais de 139, 132, 98 e 85 μ g de p -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} , respectivamente) e, por fim, o tratamento SD, com média anual de 66 μ g de p -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} (Apêndice 03). Mullen et al. (1998), trabalhando com diferentes culturas de cobertura de inverno e solo descoberto previamente à cultura do milho, verificaram que os tratamentos que aumentaram o C_{org} do solo, aumentaram igualmente a atividade microrgânica e/ou proporcionaram um ambiente mais adequado para a estabilização de enzimas de solo. Desta maneira, no referido trabalho, o solo coberto com vicia (*Vicia vilosa*) apresentou maior atividade de β -glucosidase do que as observadas nos tratamentos com cobertura de trigo ou sem cobertura, com ou sem adição de N no milho. Dentre estes últimos, a cobertura com trigo apresentou maior atividade enzimática do que o tratamento sem cobertura. Tudo isto indica o efeito positivo da cobertura vegetal, especialmente a de baixa relação C/N, sobre a atividade desta enzima.

O comportamento desta atividade enzimática ao longo do período estudado é marcado por sua sazonalidade. Na Figura 06 é possível observar que esta eleva-se no período mais quente do ano, para a maioria dos tratamentos, tendendo a ser reduzida com a chegada do inverno, e voltando a acentuar-se com a aproximação da primavera. Turner et al. (2002) sugerem que a atividade de β -glucosidase na forma de enzimas extracelulares imobilizadas é baixa e pouco importante, e citam Kiss et al. (1972), que afirmaram que a degradação da celobiose nos solo ocorreria pela ação de enzimas liberadas por microrganismos ativos, mais do que pela fração de enzimas acumuladas.

O grupo de tratamentos de cultivo que não inclui leguminosas (P/M e A/M) praticamente não se diferenciou do SD quanto à atividade de β -glucosidase ao longo de todo o período, com exceção do mês de dezembro. Por outro lado o grupo contendo leguminosas no cultivo (P/M+L, A+V/M+C, G/M+G) apresentou atividades de β -glucosidase sempre semelhantes ou mesmo superiores

estatisticamente ao tratamento referência CN, mostrando que o cultivo de plantas com alto teor de N e alta adição de biomassa vegetal é fundamental para a ativação da ciclagem do C e da degradação da celulose no solo .

A atividade da β -glucosidase correlacionou-se positivamente com os teores de K trocável no solo ($r=0,688^{**}$) (Apêndice 08), indicando uma possibilidade de que a presença deste cátion no solo apresente algum efeito ativador sobre a atividade desta enzima. Cattelan (1989), trabalhando neste mesmo experimento, observou uma alta correlação entre os teores de K trocável e a população fúngica do solo, o que faz sentido, tendo em vista que a β -glucosidase costuma ser produzida principalmente por este grupo de microrganismos (Hayano e Tubaki, 1985). Em adição a isto, Moreira e Siqueira (2002) afirmam que os fungos são os principais responsáveis pela degradação da celulose em solos com pH igual ou menor do que 5,5, como é o caso de todos os tratamentos aqui estudados (Apêndice 09). É possível, no entanto, que a correlação apresentada acima seja resultado de mero acaso e que, em realidade, não exista uma correlação direta entre a atividade de β -glucosidase e os teores de K trocável no solo.

Também houve correlação positiva da atividade da β -glucosidase com o rendimento médio do milho ($r=0,887^{*}$), sendo que, no entanto, esta correlação não foi tão alta quanto as verificadas para os demais indicadores biológicos testados (Apêndice 08). Isto se deu devido à disparidade entre a elevada atividade desta enzima no tratamento P/M+L e seu rendimento médio de milho (Apêndice 13). Apesar da elevação do teor de C_{org} no solo, garantido por este tratamento (Apêndice 12), a maior parte do N mineralizado pela degradação da leguminosa não ocorre no período mais adequado para sua absorção pela cultura do milho, resultando em um rendimento de grãos desproporcional à atividade desta enzima. A mesma explicação pode ser dada à falta de correlação verificada entre esta atividade enzimática e a estimativa de quantidade de C adicionado pela parte aérea dos cultivos em 10 anos (Apêndice 08), fornecida por Burle et al. (1997).

A atividade de β -glucosidase foi a atividade enzimática que apresentou a correlação mais alta com os teores de C_{org} no solo ($r=0,934^{**}$) (Apêndice 08), o que é facilmente explicável, já que esta é uma enzima ligada à ciclagem deste elemento no solo.

A alta correlação verificada entre a atividade de β -glucosidase e os teores de N total no solo ($r=0,931^{**}$) (Apêndice 08), confirmada pelas observações de Ajwa et al. (1999) e Aon e Colaneri (2001), bem demonstra a forte ligação desta atividade enzimática com a disponibilidade deste nutriente no solo.

Esta atividade enzimática também correlacionou-se bem com todos os demais indicadores biológicos analisados, bem como com indicadores físicos como a umidade gravimétrica ($r=0,466^{**}$) e a massa de agregados maiores do que 2 mm ($r=0,596^{*}$), indicando ser adequado seu uso como indicador na avaliação da ciclagem de C no solo e um dos indicadores de sua qualidade.

5.1.2.2.2. Atividade de urease

As variações verificadas para a atividade de urease ao longo do período observado mantiveram-se entre 31 e 164 μ g N-NH₄ g⁻¹ solo 2h⁻¹, sendo coerentes com a faixa de variação para esta atividade, estabelecida por Dick et al. (1996), de 22 a 422 μ g N-NH₄ g⁻¹ solo 2h⁻¹.

Nas avaliações de atividade de urease, verificou-se uma diferenciação do tratamento CN em relação aos demais, ao longo de todo o período observado (Figura 07), com uma média de $120 \mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ solo } 2\text{h}^{-1}$ (Apêndice 04), concordando com os dados obtidos por Bandik & Dick (1999). Estes autores também encontraram maior atividade da urease em solos com cobertura de pastagens em relação aos cultivados. Pancholy e Rice (1973) verificaram que a urease apresenta baixas atividades nos estágios iniciais de sucessão vegetal e aumento das mesmas com o progresso destas sucessões. Isto indica que o nível de atividade desta enzima tem grande relação com a complexidade atingida pelo sistema.

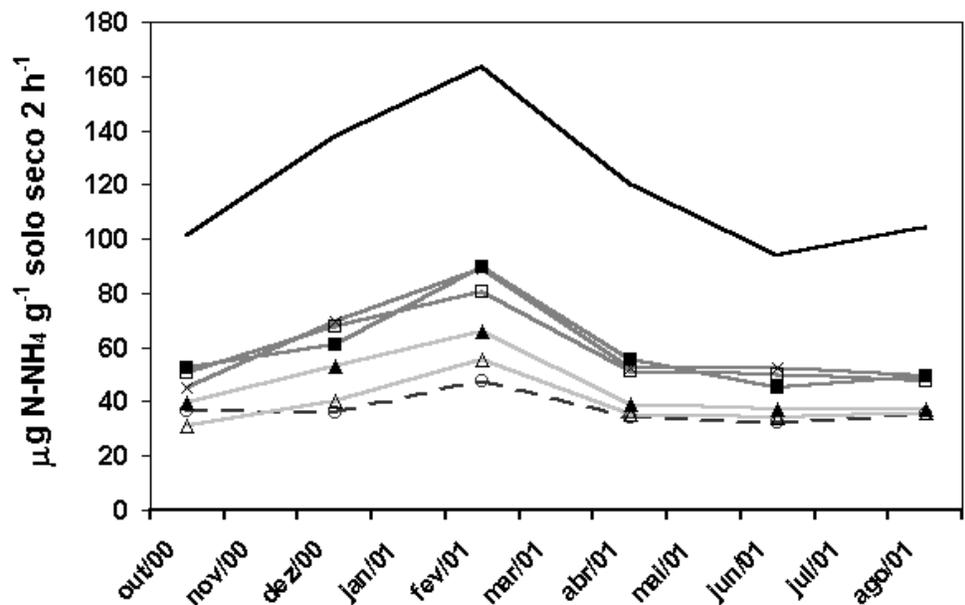


FIGURA 07. Atividade da urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001). SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no

inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

Os tratamentos com cultivo diferenciaram-se mais entre si a partir das observações de dezembro e fevereiro, quando o grupo de cultivos contendo leguminosas diferenciou-se significativamente do grupo contendo apenas gramíneas e SD (Apêndice 04). Esses dados corroboram os obtidos por Chavarria-Carvajal & Rodriguez-Kabana (1998) que verificaram que a atividade desta enzima foi diretamente proporcional a adições de resíduos de leguminosas ao solo. Aon et al. (2001), trabalhando com a cultura da soja, observaram uma elevação pronunciada da atividade microbiana no período de floração da cultura, observada por um gradiente máximo na atividade das diversas enzimas avaliadas, incluindo urease, fosfatase ácida e β

-glucosidase. Além disto, Palma & Conti (1990), citados por Gianfreda & Bollag (1996), também relataram maior atividade da urease nos meses de verão em solos sob pastagem natural na Argentina.

Nos meses de abril, junho e julho não houve diferença significativa entre as atividades de urease observadas nos tratamentos de cultivo e no tratamento SD (Apêndice 04), o que demonstra uma forte influência sazonal sobre o comportamento desta enzima de solo, como pode ser observado na Figura 07. Estes resultados indicam que a melhor época para coleta de amostras para avaliação da qualidade do solo, por meio da atividade desta enzima, corresponde aos meses mais quentes do ano.

Os tratamentos SD e P/M alternaram-se na posição mais baixa do ranqueamento para a atividade desta enzima ao longo dos meses do ano, com valores médios anuais de 37 e 39 $\mu\text{g N-NH}_4\text{ g}^{-1}\text{ solo 2h}^{-1}$, respectivamente. Bandik & Dick (1999) também verificaram maior atividade da urease em áreas cobertas com culturas de cobertura ao longo de todo o ano.

O tratamento SD apresentou a menor variação sazonal ao longo do ano dentre os tratamentos observados, o que está de acordo com o trabalho de Garcia et al (1997), os quais verificaram pequena variação sazonal na atividade de hidrolases, incluindo a urease, a β -glucosidase e a fosfatase ácida, em áreas após a retirada da vegetação. Segundo os autores, possivelmente as quantidades de enzimas existentes no solo de áreas sem vegetação mudem pouco em função de sua grande estabilidade, por estarem ligadas aos colóides do solo e serem de difícil desnaturação.

A atividade da urease apresentou correlação significativa e negativa em relação aos teores de P ($r = -0,541^*$) no solo, indicando a possibilidade de um efeito inibitório direto ou indireto da adubação fosfatada sobre a presença e a atividade desta enzima no solo. Não foi possível explicar esta correlação, sendo possível que tenha ocorrido por acaso. No entanto, fez-se aqui seu registro para que futuras investigações possam comprová-la ou refutá-la.

Segundo Gianfreda & Bollag (1996), o tamanho da BM e a atividade dos microrganismos podem influenciar a taxa de degradação das enzimas, muito embora a imobilização destas no solo torne-as relativamente resistentes ao seu ataque. Apesar disto, a atividade da urease, assim como das demais enzimas analisadas (com exceção da β -glucosidase), correlacionou-se bem com a BM ($r = 0,654^{**}$) e a RM ($r = 0,849^{**}$) (Apêndice 08).

Apesar da grande variação verificada ao longo do ano para cada tratamento, o ranqueamento entre os mesmos apresentou pouca variação, indicando a possibilidade de utilização desta enzima para avaliações de qualidade de solo, desde que um solo não perturbado seja amostrado e analisado como referência, simultaneamente.

Também as correlações verificadas entre a atividade de urease e variáveis como: umidade do solo ($r=0,568^{**}$), massa de agregados maiores do que 2 mm ($r=0,754^{**}$), teores de C_{org} ($r=0,682^{**}$) e N total ($r=0,582^*$), C adicionado pela parte aérea em 10 anos ($r=0,943^*$), rendimento médio de grãos de milho ($r=0,982^{**}$) e demais indicadores biológicos incluídos neste estudo (Apêndice 08), avalizam a possibilidade de seu uso como indicador biológico de qualidade do solo.

5.1.2.2.3. Atividade de amidase

Os valores encontrados para a atividade da amidase variaram numa faixa entre 136 e 372 $\mu\text{g N-NH}_4\text{ g}^{-1}$ de solo 2h^{-1} , estando de acordo com os valores encontrados por Frankenberger e Tabatabai (1981) e a faixa estabelecida por Dick et al. (1996) para esta atividade enzimática, em solos com umidade de campo utilizando formamida como substrato, a qual varia de 22 a 422 $\mu\text{g N-NH}_4\text{ g}^{-1}$ de solo 2h^{-1} .

As avaliações da atividade da amidase demonstraram uma distribuição muito semelhante à verificada para a da enzima anteriormente descrita, porém apresentando grupos de tratamentos mais definidos, sendo que o CN destacou-se dos demais tratamentos ao longo de todo o período, com uma média de 359 $\mu\text{g N-NH}_4\text{ g}^{-1}$ solo 2h^{-1} (Apêndice 05). Em seguida, os tratamentos de cultivo contendo leguminosas formaram um grupo intermediário, com valores médios variando de 244 a 261 $\mu\text{g N-NH}_4\text{ g}^{-1}$ solo 2h^{-1} . Este grupo apresentou uma atividade de amidase mais elevada do que os demais tratamentos de cultivo e SD (Figura 08), o que demonstra a importância da rotação e consorciação dos cultivos com leguminosas para a recuperação da capacidade de ciclagem de N dos solos. Neste sentido, Vargas e Scholles (2000) observaram valores mais elevados de N mineralizado no solo sob a sucessão cultural aveia+vica/milho+caupi do que naquele sob a sucessão aveia/milho, o que demonstra que a presença de leguminosas no cultivo eleva o potencial de mineralização de N no solo, em função da fixação simbiótica de N_2 pelas leguminosas.

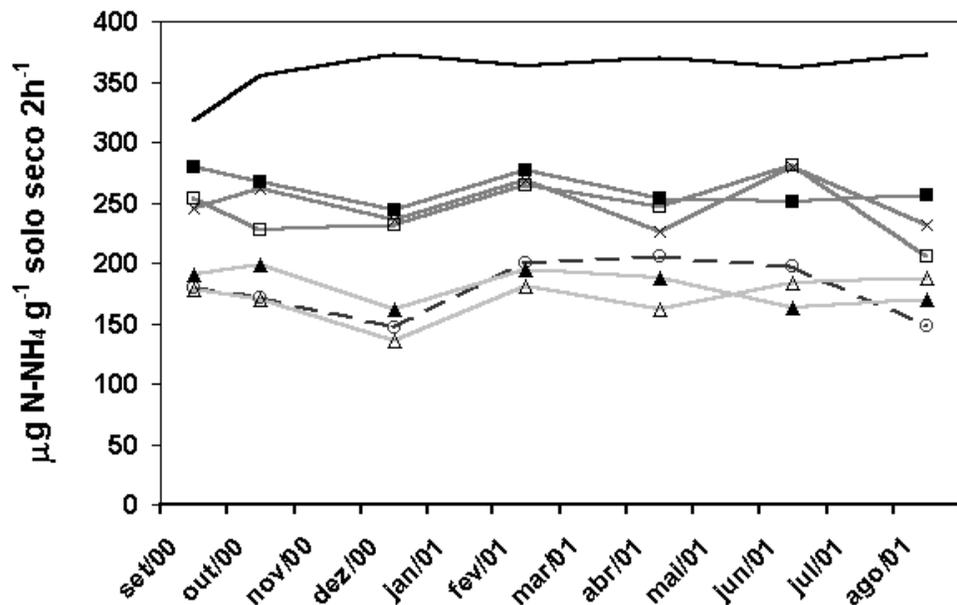


FIGURA 08. Atividade da amidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano (2000/2001). SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

A tendência de uma resposta intermediária e mais homogênea dos tratamentos de cultivo com leguminosas acentuou-se nas observações dos meses de dezembro e fevereiro, período em que este grupo destacou-se estatisticamente dos demais (Apêndice 05).

Os tratamentos de cultivo sem leguminosas formaram outro grupo, juntamente com o tratamento testemunha SD, apresentando os valores mais baixos de atividade de amidase durante todo o período de observação, com médias variando de 171 a 181 $\mu\text{g N-NH}_4\text{ g}^{-1}\text{ solo } 2\text{h}^{-1}$ (Apêndice 05). Os sistemas de cultivo P/M e A/M não acrescentam N, via fixação simbiótica, levando a uma baixa disponibilidade deste nutriente no solo. Além disso, os resíduos de gramíneas costumam apresentar relação C:N elevada e altas concentrações de celulose e lignina. Segundo Somani (1988), citado por Vargas e Scholles (2000), a adição de resíduos com alta relação C:N resulta em imobilização líquida de N. O maior conteúdo de lignina e outros compostos recalcitrantes nos resíduos de gramíneas também diminui a mineralização de N, em virtude de sua menor taxa de decomposição e das interações físico-químicas da lignina com o N do solo (Mary et al., 1996). Neste sentido, segundo Mengel (1996), a mineralização dos compostos nitrogenados de resíduos orgânicos é limitada pela disponibilidade de N no solo e pela relação C:N e composição dos resíduos, o que explica a baixa

atividade de enzimas como a amidase e a urease em solos sob cultivo apenas com gramíneas, uma vez que a produção das mesmas pela microbiota do solo é induzida pela presença de seus substratos (Frankenberger e Tabatabai, 1981). Desta forma, fica evidente a razão da alta correlação verificada entre a atividade desta enzima e os teores de N total no solo ($r=0,737^{**}$). Além disto, Burket e Dick (1998) verificaram correlação positiva entre a absorção de N mineralizado no solo e a atividade da amidase, o que pode explicar em parte a correlação da atividade desta enzima com o rendimento de grãos de milho ($r=0,986^{**}$) (Apêndice 08) no presente trabalho.

A atividade da amidase não apresentou grandes variações ao longo do período observado, para cada tratamento, porém a tendência de agrupamento e diferenciação mais clara entre os tratamentos observada nos meses de dezembro e fevereiro sugere que esta época do ano seja mais favorável à realização de coletas de solo para fins de avaliação de qualidade.

Ao contrário das atividades enzimáticas descritas anteriormente, a atividade da amidase parece não sofrer variações sazonais significativas. Além disto, a atividade da amidase correlacionou-se positiva e significativamente com o C_{org} do solo ($r=0,817^{**}$), confirmando observações relatadas por Frankenberger e Tabatabai (1995). Esta alta correlação deve-se ao fato de esta enzima comumente permanecer ligada aos complexos organo-minerais do solo (Frankenberger e Tabatabai, 1981). Estes autores também encontraram altas correlações entre atividade de amidase e teores de C_{org} , N total e atividade de urease no solo. Também foram verificadas altas correlações desta atividade enzimática com a umidade do solo ($r=0,643^{**}$), a massa de agregados maiores do que 2mm ($r=0,759^{**}$) e o C adicionado pela parte aérea dos cultivos em 10 anos ($r=0,913^{*}$), as quais também avalizam a possibilidade de uso da mesma como um indicador de qualidade do solo para estas condições.

5.1.2.2.4. Atividade de fosfatase ácida

A atividade da fosfatase ácida apresentou uma ampla faixa de variação de seus valores, situando-se entre 249 e 1078 μ g de p -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} (Apêndice 06). Estes valores conferem com a faixa de variação estabelecida por Dick et al. (1996) para esta atividade enzimática, com variação de 23 a 2100 μ g de p -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} , para solos com umidade de campo. Conte et al. (2002), também trabalhando com solos do Rio Grande do Sul, porém mais argilosos, verificaram teores que variaram de 534 a 656 μ g de p -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} em solos sob cultivo, e de 1504 μ g de p -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} em solo sob mata nativa.

Verificou-se grande destaque da atividade da fosfatase ácida no tratamento CN, especialmente ao longo do período mais quente do ano, com uma média anual de 925 μ g de p -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1} (Apêndice 06). Os tratamentos com cultivo e o SD apresentaram valores muito reduzidos em relação ao CN, conforme pode-se observar na Figura 09. Também Dormaar (1983), em trabalho analisando atividades enzimáticas em solos sob diferentes sistemas de cultivo comparados ao campo nativo, observou que a atividade da fosfatase ácida foi praticamente três vezes superior sob campo nativo do que sob trigo contínuo. Conforme Stewart e Tiessen (1987), em sistemas naturais, como florestas e campos nativos, o

fornecimento de P às plantas depende basicamente da ciclagem do P orgânico, principalmente em solos de regiões tropicais e subtropicais.

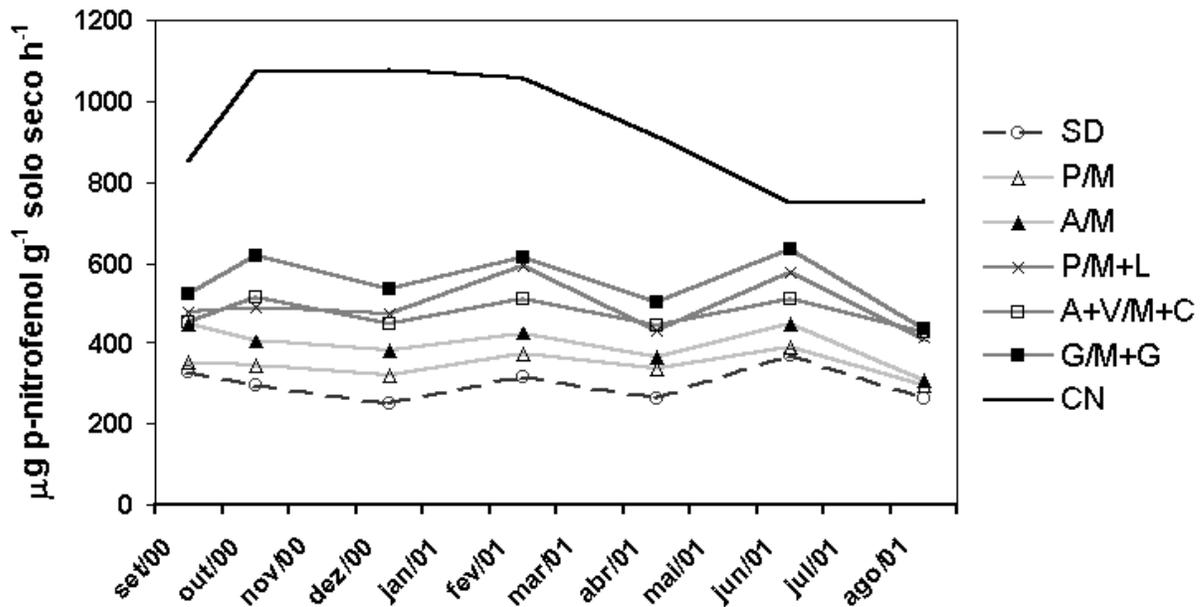


FIGURA 09. Atividade da fosfatase ácida na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001). SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

Bandick e Dick (1999) questionaram o valor das medições das atividades de fosfatases, porque elas são controladas pelo pH e pelo teor de fertilizantes fosfatados adicionados e, segundo os autores, não revelam impactos de longo tempo em função de práticas de manejo. No trabalho de Vepsäläinen et al. (2001), no entanto, foram medidas as atividades de fosfomonoesterases e diesterases ácidas e alcalinas e, contrariando as afirmações dos autores anteriores, foram observadas mudanças das mesmas durante a estação de crescimento e diferenças significativas em função dos tratamentos.

No presente trabalho, existem várias hipóteses para explicar a menor atividade da fosfatase ácida nos tratamentos de cultivo em relação ao tratamento CN. Uma das prováveis causas desta redução tenha sido a adubação fosfatada anual realizada nestas áreas juntamente com a semeadura do milho, que elevou os teores de P solúvel nos solos dos tratamentos de cultivo (Apêndice 09). A elevação da disponibilidade de fosfato inorgânico solúvel é conhecida por apresentar um efeito inverso na produção de fosfatases no solo (Tabatabai, 1982; Tadano et al., 1993; Naseby e Lynch, 1997). De acordo com Juma & Tabatabai (1978), citados por Fernandes et al. (1998), a intensidade de inibição é determinada principalmente

pela concentração de (PO_4), o qual é um inibidor competitivo tanto de fosfatases ácidas, quanto de alcalinas. Os autores relatam, no entanto, que esta inibição foi maior sobre a atividade da fosfatase alcalina do que sobre a da ácida, tendo encontrado inibições médias de 57 e 11% destas enzimas, respectivamente, em função da adição de ortofosfato. Por outro lado, contrariando a tese da inibição por fosfatos, Conte et al. (2002) não verificaram diminuição da atividade da fosfatase ácida com o aumento da disponibilidade de P em solos cultivados. No entanto, estes autores trabalharam com solos com elevado conteúdo de argilas e óxidos de ferro e alumínio, que adsorvem o P e reduzem seu efeito inibidor sobre esta atividade enzimática.

No presente trabalho, apesar da existência de uma tendência de correlação negativa entre a presença de P solúvel na solução do solo e a atividade de fosfatase ácida, esta não foi significativa (Apêndice 08), indicando a existência de fatores atenuantes da inibição provocada pela maior disponibilidade de P solúvel. Uma das possibilidades de atenuação poderia estar relacionada à grande presença de raízes encontrada nos solos dos tratamentos com culturas consorciadas. A fosfatase ácida também pode ser produzida por plantas, sendo que a síntese e excreção desta enzima por raízes já foi relatada para diversas culturas vegetais (Dodd et al., 1987; Goldstein et al., 1988).

Possivelmente, outros fatores atenuantes do efeito inibidor do fosfato sobre a atividade da fosfatase ácida consistam nos teores de C_{org} , bem como nos valores de BM e RM dos tratamentos de cultivo. De acordo com Harrison (1983), a MO do solo protege estas enzimas da decomposição por microrganismos. A atividade da fosfatase ácida apresentou correlações positivas com estas variáveis ($r=0,736^{**}$, $0,766^{**}$ e $0,746^{**}$ para C_{org} , BM e RM, respectivamente) (Apêndice 08), indicando que elas podem ter funcionado como atenuantes dos teores de P nos tratamentos sob cultivo e, por outro lado, foram responsáveis pela baixa atividade verificada no tratamento SD (média anual de $297 \mu\text{g de } p\text{-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) (Apêndice 06), apesar de seu baixo teor de P disponível (Apêndice 09).

A atividade de fosfatase ácida verificada no tratamento CN parece ter sido a única a sofrer uma variação sazonal bem definida, tendo os demais tratamentos apresentado suas respectivas atividades sob patamares mais estáveis ao longo do período estudado (Figura 09). Da mesma forma, no trabalho de Garcia et al. (1997a), foram verificadas mudanças sazonais mais acentuadas da atividade da fosfatase na área natural. Bolton et al. (1985) citam Harrison e Pearce (1979) que, também tendo encontrado este tipo de flutuação para a atividade desta enzima, justificaram-na pelo aumento da produção da mesma por raízes e por microrganismos do solo nesta época do ano. Outra hipótese para este comportamento da fosfatase ácida no tratamento CN está relacionada à elevação da diversidade de plantas no mesmo durante o período estival. Neste sentido, Neal (1973), trabalhando com dezesseis espécies forrageiras crescendo separadamente em casa de vegetação, percebeu que os solos contendo espécies classificadas como invasoras, que normalmente tornam-se espécies dominantes em locais abandonados após pastejo excessivo, apresentaram uma atividade de fosfatase ácida marcadamente aumentada, sendo que, em vários casos, o aumento foi superior ao dobro do solo controle sem plantas. Desta forma, é

possível que a presença mais elevada de determinadas plantas durante o ciclo estival favoreça a elevação dos teores de fosfatase ácida no solo sob CN.

O tratamento G/M+G destacou-se dentre os tratamentos de cultivo ao longo de todo o ano, apresentando a média anual mais elevada dentre estes ($553 \mu\text{g}$ de p -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1}). Os resultados verificados para a atividade da fosfatase ácida neste tratamento demonstram que é possível ampliar esta atividade enzimática mesmo com elevados teores de P no solo (36mg P L^{-1} para o solo sob G/M+G) (Apêndice 09), através do cultivo de determinadas plantas, no caso o guandu. De modo geral, o cultivo de leguminosas tropicais de alta produção de massa favoreceu a atividade da fosfatase ácida, sendo que o tratamento G/M+G diferenciou-se estatisticamente do P/M+L apenas no mês de outubro e de A+V/M+C apenas de outubro a fevereiro (Apêndice 06). Este último tratamento apresentou, nas avaliações de outubro, fevereiro e junho, uma posição intermediária entre os cultivos com leguminosas e os que não as continham, chegando a diferenciar-se estatisticamente do primeiro grupo nos meses de dezembro e fevereiro. É possível que este resultado esteja relacionado apenas ao menor conteúdo de C_{org} verificado no solo do tratamento A+V/M+C em relação aos demais tratamentos com leguminosas (Apêndice 12). Mas ele também pode indicar uma possível menor produção de fosfatase ácida proporcionada pela comunidade biológica formada pelo consórcio milho + caupi em relação às dos dois outros consórcios aqui estudados.

A Figura 09, no entanto, permite observar uma clara elevação da atividade da fosfatase ácida nos tratamentos contendo leguminosas em consórcio ou em rotação com o milho em relação aos tratamentos sem leguminosas ou sem rotação. Da mesma forma, Khan (1970) verificou que as atividades de diversas enzimas, incluindo a fosfatase e a urease, foram significativamente maiores em um sistema de rotação contendo leguminosas do que as observadas em um sistema trigo-pousio, sendo que as atividades da fosfatase foram quase o dobro de um sistema para o outro. O autor verificou que a presença das leguminosas na rotação resultou em um considerável aumento da atividade microbiológica total do solo, em relação ao sistema trigo-pousio. No presente experimento, já foi constatado que a presença de leguminosas em consórcio ou rotação com o milho favoreceu uma maior adição de massa vegetal aos solos destes tratamentos (Apêndice 13) (Burle et al., 1997), aumentando os teores de C_{org} e de NT (Apêndice 09) e, conseqüentemente, os de P orgânico dos mesmos, o que provavelmente favorece a atividade da fosfatase ácida, em função de uma maior quantidade de substrato disponível. Segundo Appiah e Thomas (1982) e Trasar-Cepeda e Gil-Sotres (1987), a atividade desta enzima é mais influenciada pelo teor de P orgânico que pelo P total do solo e tem sido correlacionada com os teores de C_{org} e P orgânico no mesmo.

Possivelmente em função disto, o tratamento P/M não se diferenciou estatisticamente da testemunha SD em nenhuma avaliação ao longo do ano, e o tratamento A/M diferenciou-se desta apenas no período mais quente do ano. Estes resultados demonstram uma expressiva limitação da capacidade de reciclagem do P orgânico nos solos sob estes tratamentos de cultivo, possivelmente aumentando a dependência das culturas estabelecidas sobre os mesmos ao P adicionado via adubação mineral.

Novamente a maior amplitude de valores verificados nos meses mais quentes do ano (outubro a fevereiro) para esta atividade enzimática parece favorecer a discriminação entre os diversos tratamentos, tornando a coleta de amostras de solo para fins desta análise mais recomendável durante este período.

Assim como nas demais atividades enzimáticas estudadas, as correlações verificadas entre a atividade da fosfatase ácida e variáveis como: a umidade do solo ($r=0,535^{**}$), a massa de agregados maiores do que 2 mm ($r=0,807^{**}$), o C_{org} ($r=0,736^{**}$), o N total ($r=0,649^*$), a quantidade estimada de C adicionado pela parte aérea dos cultivos em 10 anos ($r=0,943^*$), o rendimento médio de grãos de milho ($r=0,978^{**}$) e as demais variáveis biológicas avaliadas (Apêndice 08), sugerem sua aplicabilidade como indicador biológico de qualidade e de fertilidade de solos, ligado ao ciclo do P, especialmente sob cultivos orgânicos sem adições de fosfatos prontamente solúveis.

5.1.2.2.5. Atividade de aril-sulfatase

A variabilidade dos valores de atividade da aril-sulfatase abrangeu uma faixa muito ampla ao longo deste experimento, sendo que seus valores mínimos e máximos foram, respectivamente, 43 e 412 $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}\text{ solo h}^{-1}$ (Apêndice 07). A faixa de valores estabelecida por Dick et al. (1996) para esta atividade fica entre 7 e 340 $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}\text{ solo h}^{-1}$, estando, portanto, abaixo dos valores aqui descritos. No entanto, Farrell et al. (1994), utilizando a mesma metodologia do presente trabalho, e estudando os efeitos da desvegetação e do cultivo de solos nativos de pastagem e de floresta sobre a atividade desta enzima, obtiveram uma faixa de variação de 89 a 829 $\mu\text{g de p-nitrofenol g}^{-1}\text{ de solo h}^{-1}$. Também Mendes e Vivaldi (2001) encontraram valores entre 120 e 570 $\mu\text{g de p-nitrofenol g}^{-1}\text{ de solo h}^{-1}$, na profundidade de 0 a 5 cm, e de 80 a 470 $\mu\text{g de p-nitrofenol g}^{-1}\text{ de solo h}^{-1}$, na profundidade de 5-20 cm, para solos sob Cerradão e Mata de Galeria na região do cerrado brasileiro. No entanto, Mendes et al. (1999), trabalhando em solos com tratamentos de cultivo nesta mesma região do Brasil, observaram valores bem inferiores aos deste trabalho, com médias variando de 26 a 63 $\mu\text{g de p-nitrofenol g}^{-1}\text{ de solo h}^{-1}$, sugerindo que possam haver diferenças nas metodologias adotadas para a obtenção dos valores do presente trabalho e os dos acima apresentados. No entanto, como a faixa de variação foi sempre a mesma ao longo do trabalho e os resultados foram coerentes entre si e com os demais, optou-se por apresentá-los da forma como foram obtidos.

Também a atividade da aril-sulfatase mostrou ser preponderantemente mais alta no tratamento CN em relação aos demais, tendo este se diferenciado estatisticamente ao longo de todo o ano, com exceção de fevereiro, em que não houve diferença significativa entre CN e G/M+G (Apêndice 07). O tratamento CN apresentou uma média anual de 361 $\mu\text{g de p-nitrofenol g}^{-1}\text{ solo h}^{-1}$. Bandik & Dick (1999) também verificaram maior atividade desta enzima em áreas de pastagem em relação a áreas de cultivo. Farrel et al. (1994) observaram que o cultivo por longo tempo (69 anos) do solo nativo sob pastagem resultou em uma redução de 66% na atividade da aril-sulfatase. Esta enzima tem sido detectada em plantas, animais e microrganismos (Klose & Tabatabai, 1999), portanto, a maior quantidade de raízes presente no solo do tratamento CN pode ser um dos motivos desta atividade mais elevada.

Os resultados dos demais tratamentos confirmam o que já foi demonstrado pelas outras análises de atividades enzimáticas, ou seja, uma supremacia dos tratamentos com maior teor de C_{org} no solo, como G/M+G e P/M+L, sobre os tratamentos com teores mais baixos, como A+V/M+C, A/M e P/M, ficando o SD com a atividade mais baixa em relação aos demais, ao longo do ano (Figura 10). Conforme Castellano e Dick (1990), o cultivo aumenta significativamente a atividade da aril-sulfatase em relação aos tratamentos sem cultivo, pois, de acordo com Tabatabai e Bremner (1970), esta atividade costuma ser maior na presença de raízes de plantas vivas.

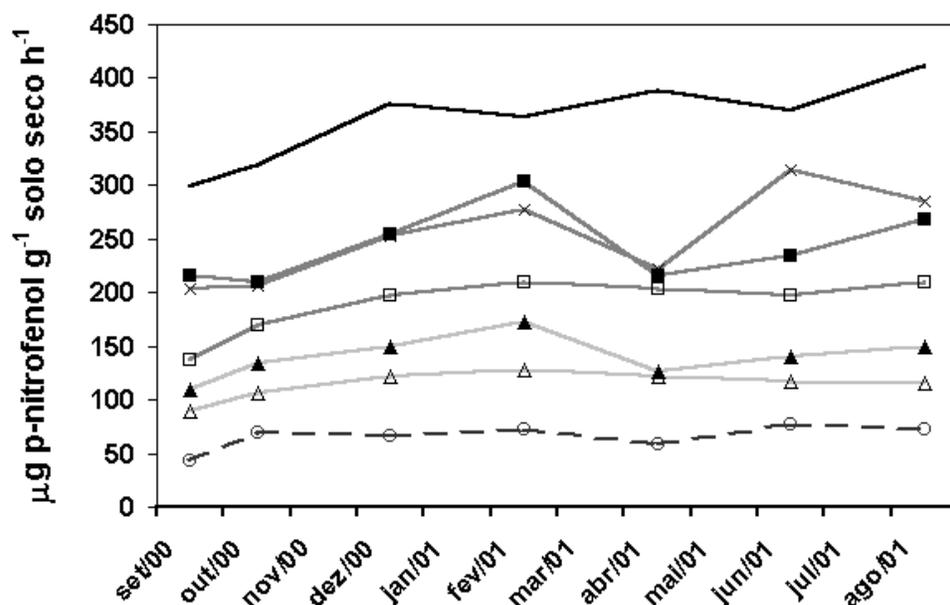


FIGURA 10. Atividade da aril-sulfatase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001). SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

O tratamento G/M+G apresentou um acréscimo linear de seus valores de atividade de aril-sulfatase entre os meses de outubro e fevereiro, provavelmente em função do amplo desenvolvimento radicular proporcionado pela presença das culturas consorciadas de milho e guandu, de tal maneira que não houve diferença significativa entre os valores de G/M+G e o tratamento referência CN no mês de fevereiro (Apêndice 07). Em seguida, este tratamento de cultivo sofre uma perceptível influência sazonal, reduzindo a atividade desta enzima nos meses de inverno, e voltando a se elevar com a aproximação da primavera.

O tratamento P/M+L, por sua vez, também apresenta um acréscimo na atividade da aril-sulfatase no verão, e a reduz no mês de abril, porém acentua-a nos meses de

junho, chegando a apresentar o mesmo grau de significância dos valores obtidos para o tratamento CN para este mês (Apêndice 07). É provável que a maior degradação de restos vegetais senescentes do lablab, juntamente com a resteva do milho, provocada por fungos saprofíticos, tenha proporcionado o aumento da atividade desta enzima no solo deste tratamento no referido período.

Os valores obtidos para os tratamentos A+V/M+C, A/M, P/M e SD sugerem não ter havido modificações relevantes na atividade desta enzima para cada um deles ao longo do ano. O tratamento A+V/M+C não apresentou diferenças significativas em relação a A/M quanto à atividade de aril-sulfatase ao longo do ano, porém diferenciou-se dos valores obtidos para P/M e SD na maior parte do período, ao contrário do segundo.

O tratamento P/M só diferenciou-se estatisticamente do tratamento testemunha SD, quanto à sua atividade de aril-sulfatase, no mês de dezembro, o que indica que esta prática de manejo é ineficiente para ampliar a capacidade de ciclagem de S em solos degradados.

A pequena variação sazonal verificada para esta atividade enzimática no período estudado pode ser explicada pelo fato de que, segundo Kiss et al. (1975), citando Tabatabai e Bremner (1970), a aril-sulfatase não é uma enzima livre no solo, mas sim costuma estar ligada aos constituintes celulares de microrganismos não proliferantes.

Foram verificadas altas correlações desta atividade enzimática com os teores de C_{org} ($r=0,874^{**}$), N total ($r=0,649^{**}$), BM ($r=0,824^{**}$) e RM ($r=0,730^{**}$). Klose e Tabatabai (1999) verificaram correlações positivas entre a atividade da aril-sulfatase e o C_{org} , a BM e o N total muito próximas das observadas neste trabalho. Estas correlações só confirmam o fato, já observado por diversos outros autores (Tabatabai & Bremner, 1970; King & Klug, 1980; Farrell et al., 1994; Mullen et al., 1998), de que a atividade desta enzima no solo está ligada aos componentes orgânicos e à vida nele presentes. Além disto, segundo outros autores, a correlação constante existente entre esta atividade enzimática e o conteúdo de C_{org} dos solos permite relacioná-la especialmente com estes teores em estudos de solos na paisagem, podendo a mesma ser usada como um indicador da acumulação de C_{org} no solo (Bergstrom et al. 1998; Bergstrom e Montreal, 1998). Ainda David et al. (1982), trabalhando com solos florestais, verificaram correlações entre a BM e a atividade de aril-sulfatase com o S orgânico, indicando o alto potencial das transformações microbianas do S. Segundo estes autores, a formação de sulfato pela mineralização microrgânica pode ser mais importante do que as adições externas.

A atividade desta enzima foi a que apresentou a maior correlação com a umidade gravimétrica ($r=0,643^{**}$) nos momentos de amostragem, o que indica a possibilidade de uma maior dependência desta atividade em relação às condições de umidade do solo. Mendes & Vivaldi (2001) verificaram também grande variação da atividade da aril-sulfatase entre as épocas de seca e chuvosa em solos do cerrado, sendo que, na profundidade de 0 a 5 cm, a atividade na época chuvosa foi, em média, o dobro da época seca, enquanto, na profundidade de 5 a 20 cm, ela foi o triplo. Bergstrom et al. (1998) também encontraram correlações altas entre a água no solo e a atividade de aril-sulfatase, sendo as mesmas altamente dependentes espacialmente. A similaridade nos padrões espaciais ao longo de

uma topossequência foi interpretada pelos autores como uma evidência da influência dos conteúdos de água e de C_{org} , sobre os teores de aril-sulfatase nesta escala. Freeman et al. (1998), no entanto, observaram uma redução de 44% na atividade da aril-sulfatase em resposta a irrigações intensas sobre um solo turfoso, enquanto outras enzimas ligadas ao ciclo do C não foram afetadas. Isto indica a possibilidade da existência de um ótimo de umidade para cada solo para a ocorrência da máxima atividade desta enzima.

A atividade da aril-sulfatase também apresentou correlações positivas e significativas com a massa de agregados maiores do que 2 mm ($r=0,828^{**}$), com a estimativa de C adicionado pela parte aérea dos cultivos em 10 anos ($r=0,888^*$) e com o rendimento médio de grãos de milho ($r=0,952^{**}$) (Apêndice 08), sendo estas indicações importantes quanto à possibilidade de seu uso como um indicador biológico relacionado ao ciclo do S em avaliações da qualidade do solo.

5.1.3. Representação integrativa das variáveis biológicas

Segundo Dick et al. (1996), as análises de atividades enzimáticas são indicadores de processos ocorrentes no solo, podendo ser úteis para indicar as condições de um determinado solo quanto à ciclagem de nutrientes, nitrificação, oxidação, etc., além de poder servir como um índice da atividade biológica ocorrida anteriormente aos momentos de amostragem, em função do manejo adotado sobre o mesmo.

Em função da necessidade de uma visão mais geral dos processos ocorrentes no solo para permitir sua avaliação qualitativa, foi criado o modelo apresentado na Figura 11, onde o resultado da avaliação de cada variável biológica referente ao solo em cada tratamento é dado como uma porcentagem da atividade verificada no tratamento referência, que, neste caso, é o CN. Os resultados da BM, da RM e das diversas atividades enzimáticas foram dispostos em eixos específicos com origem comum, e os pontos estabelecidos para cada tratamento sobre cada eixo foram ligados entre si, formando um polígono específico para cada tratamento. Este polígono possibilita uma avaliação mais globalizante da microbiota do solo e sua atividade para cada tratamento em relação ao tratamento referência e também aos demais. Permite também a realização de inferências a respeito dos processos específicos (ciclagem do C, N, P ou S) presentes no solo e destes com os demais.

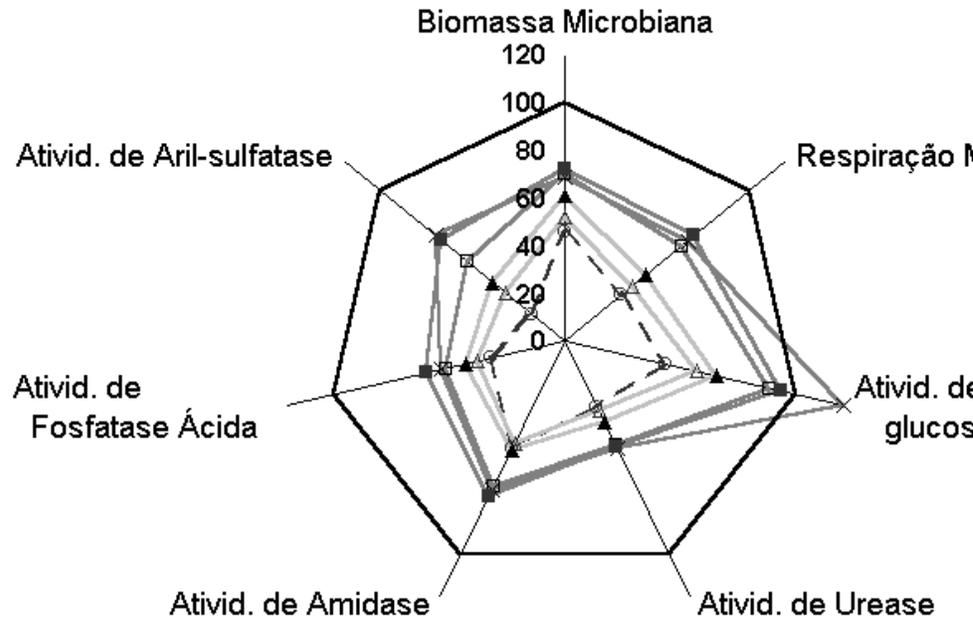


FIGURA 11. Representação integrativa das variáveis biológicas na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001). Médias das avaliações realizadas nos meses de outubro, dezembro, fevereiro, abril, junho e agosto (3 repetições a campo). SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

Através da Figura 11 e do Apêndice 14, é possível observar os resultados obtidos no presente estudo de forma resumida. Verifica-se que, de maneira geral, os polígonos formados pelos tratamentos sob cultivo foram aumentando sua área em função da biomassa vegetal adicionada e da presença de leguminosas em consórcio. No entanto, observa-se também que a recuperação da atividade biológica medida pelo crescimento da área dos polígonos não se deu de maneira uniforme, tendo sido recuperada mais eficazmente sob alguns aspectos do que outros, nos diversos tratamentos utilizados. Assim, verifica-se que as atividades de urease e fosfatase ácida ficaram em torno de 50 e 60%, respectivamente, para os

tratamentos sob cultivo com maior adição de massa (G/M+G, P/M+L, A+V/M+C), em relação ao solo referência sob CN, mostrando a ocorrência de uma maior dificuldade de recuperação destas atividades específicas nos solos sob os tratamentos testados. Para outros indicadores como BM, RM e atividades de amidase e aril-sulfatase, os valores percentuais médios alcançados mesmo por estes tratamentos de melhor resposta em termos físicos e produtivos do solo, dificilmente superaram a marca de 70%. Estes resultados indicam que a recuperação dos teores de C_{org} e de N total não necessariamente correspondem a uma recuperação concomitante da qualidade do funcionamento metabólico do solo. Degens et al. (2001) lembram que a redução da diversidade catabólica e mudanças nas propriedades do solo em função de seu uso podem reduzir a resiliência das comunidades microbianas ao estresse ou à perturbação.

A atividade da β -glucosidase, por outro lado, demonstra grande recuperação nos solos sob os diversos tratamentos de cultivo testados, tendo inclusive igualado ou superado os valores obtidos para o tratamento referência CN nos tratamentos G/M+G (97,2%) e P/M+L (120,0%), respectivamente (Apêndice 14). Diversos trabalhos têm indicado a análise da atividade da β -glucosidase como um bom indicador de qualidade do solo, por refletir com eficiência o efeito das diversas práticas de manejo, sendo mais eficiente na avaliação deste efeito do que o teor de C_{org} do solo (Wick et al., 1998; Bandik & Dick, 1999; Monreal e Bergstrom, 2000; Wick et al., 2000). No entanto, conforme foi possível observar por este modelo, verifica-se que a atividade da β -glucosidase, apesar de responder bem aos diferentes tratamentos envolvendo manejos de solo, não pode ser utilizada como um indicador isolado, já que representa apenas parcialmente o que está ocorrendo com o ciclo do C no solo. Neste sentido, a RM talvez seja um indicador mais globalizante com relação à observação da degradação dos materiais orgânicos no solo, além de apresentar altas correlações com todas as demais variáveis biológicas avaliadas, incluindo a BM, as cinco atividades enzimáticas, e os indicadores de produtividade do solo (Apêndice 08). Apesar disto, no entanto, a atividade de β -glucosidase parece ser também de grande utilidade na avaliação da qualidade do solo, já que representa uma das principais etapas da ciclagem do C neste sistema.

Por fim, deve-se salientar a grande diferença de áreas verificada entre os polígonos formados pelos dois tratamentos testemunha: o CN (referência positiva) e o SD (referência negativa). O SD foi o tratamento com resultados mais baixos para BM e atividade biológica segundo todas as avaliações realizadas, apenas assemelhando-se numericamente ao tratamento P/M nas avaliações referentes à atividades de urease e amidase e ao A/M, em relação à amidase. Percebe-se, assim, a grande disparidade quanto à qualidade, em termos biológicos, entre estes dois tratamentos de referência. Esta disparidade permite avaliar em que medida os manejos antrópicos errôneos continuados podem reduzir, em termos biológicos, a qualidade de um solo como este.

Através do gráfico da Figura 11 é possível verificar que as variáveis biológicas utilizadas neste estudo foram capazes de discriminar com grande clareza os diversos tratamentos de cultivo entre si e em relação aos tratamentos de referência. Além disto, os altos valores de correlação verificados entre estas

variáveis e outros reconhecidos indicadores de qualidade física, química e de produtividade do solo permitem afirmar que as mesmas podem ser consideradas indicadores biológicos adequados para avaliações de qualidade do solo no que tange ao manejo de cultivos.

5.1.4. Índice biológico de qualidade do solo

Tendo em vista a satisfatória discriminação realizada entre os diversos tratamentos pelo modelo de representação gráfica proposto na Figura 11, agregou-se a ele um modelo estatístico que permite, além de comparar os diversos resultados dos indicadores avaliados para cada tratamento com os respectivos resultados do tratamento referência (CN), comparar também os mesmos entre si, de forma a quantificar a homogeneidade/heterogeneidade dos resultados. Desta forma, foi possível obter, além do resultado gráfico para cada avaliação de manejo realizada, também um resultado numérico globalizante. A este modelo foi dado o nome de IBQS (Índice biológico de qualidade do solo) e os resultados do mesmo, para cada um dos tratamentos, podem ser vistos na Figura 12.

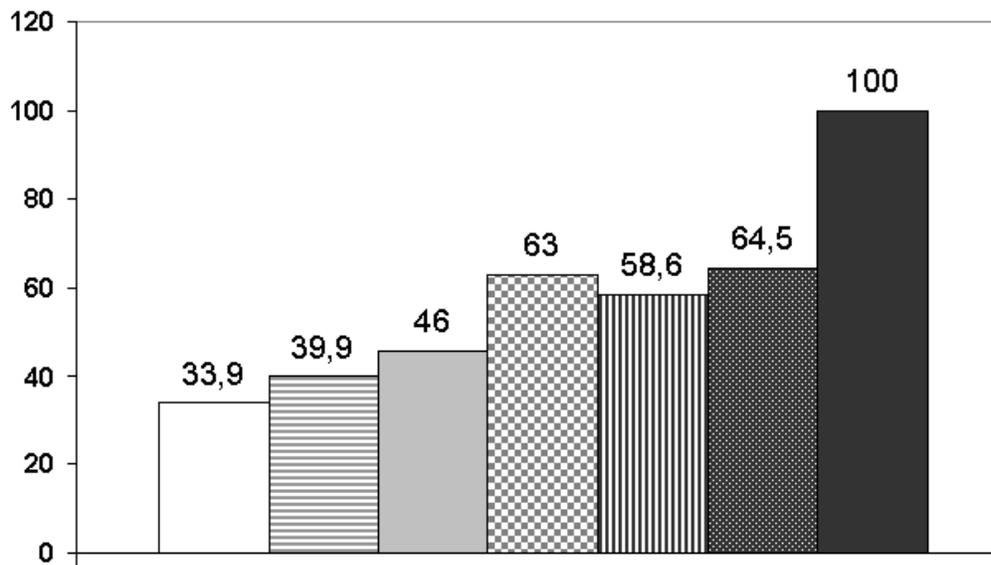


FIGURA 12. Índice biológico de qualidade do solo (IBQS), na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001). O IBQS foi calculado pela fórmula: $IBQS_i = média_i [1 - (desvio\ padrão_i / 200)]$. SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

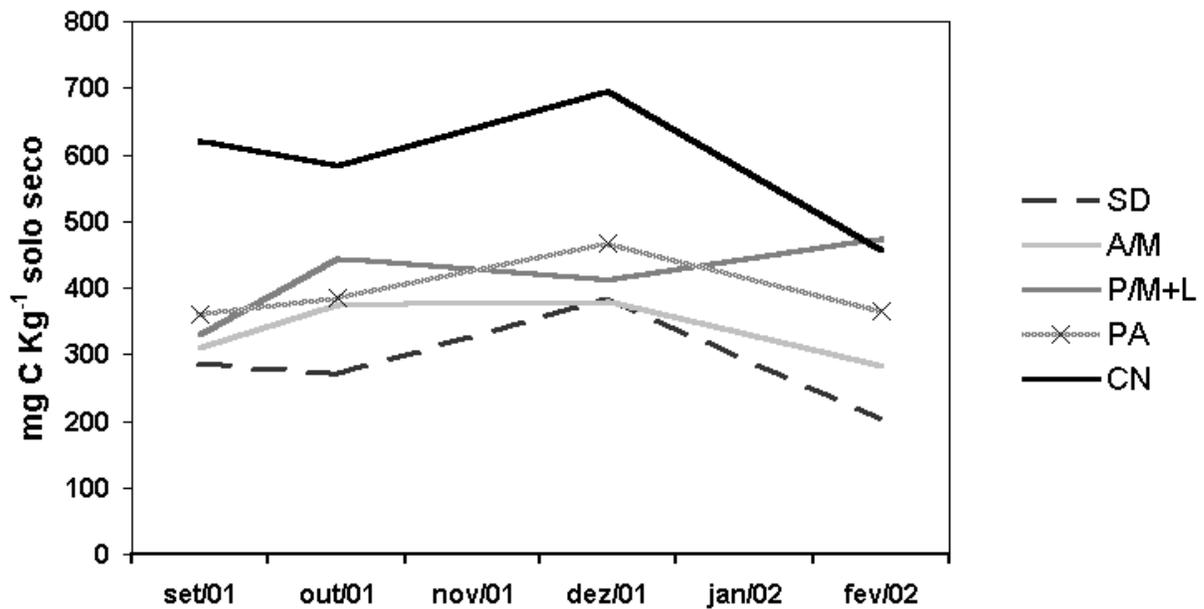
De acordo com esta classificação, os tratamentos de cultivo aumentam a qualidade biológica do solo à medida em que ampliam o tempo de cobertura do solo durante o ano e a densidade de cobertura deste em função das culturas utilizadas, sendo que a inclusão de leguminosas, em especial as de maior produção de massa, tende a elevar o IBQS. No entanto, os valores de IBQS obtidos por estes tratamentos foram proporcionalmente bastante inferiores ao tratamento referência CN. É provável que o cultivo continuado das mesmas espécies ao longo dos 19 anos de andamento do experimento, unido aos menores conteúdos de raízes, a uma cobertura e adição de resíduos vegetais muito sazonal e às adições continuadas de fertilizantes químicos aos tratamentos de cultivo avaliados, estejam sendo responsáveis por uma recuperação mais lenta da BM e de sua atividade biológica, especialmente quanto a suas potencialidades naturais de reciclagem de nutrientes, em comparação ao tratamento CN.

Por fim, cabe avaliar a validade da utilização destes indicadores, em especial as atividades enzimáticas, como indicadores biológicos de qualidade do solo. Conforme afirmam Vepsäläinen et al. (2001), as atividades enzimáticas reagem prontamente às práticas de cultivo, porém também são alteradas pelas mudanças sazonais, sendo também afetadas pelos consórcios microbianos, pela disponibilidade de substrato, pela presença de plantas e animais, por inibições em

feedback e outras e por características físicas e químicas do solo. Em função de toda esta variabilidade, segundo os autores, não há como estabelecer critérios gerais de qualidade a partir deste tipo de avaliação. O presente trabalho demonstrou, no entanto, que, embora estas variáveis estejam sujeitas a todas as influências descritas acima, quando as amostragens de solo são realizadas em época adequada, e os resultados são avaliados em conjunto e comparados aos de um solo nativo não alterado antropicamente, são capazes de identificar com grande precisão as diferenças de qualidade relativas à vida e ao funcionamento metabólico do solo, em função dos diferentes manejos sobre ele adotados.

5.2. Estudo 2. Qualidade de um solo sob pastagem cultivada e sob dois sistemas de cultura de milho (com e sem consórcio com leguminosa de verão) em relação aos tratamentos referência sob campo nativo e solo descoberto, avaliada por indicadores biológicos

Neste estudo, foram utilizados novamente alguns tratamentos de culturas avaliados no Estudo 1 (A/M e P/M+L), juntamente com os tratamentos de referência (SD e CN), tendo sido incluído um tratamento com pastagem cultivada – o capim pangola (*Digitaria decumbens* Stent) (PA). A intenção deste estudo foi verificar o comportamento deste tratamento em relação aos demais, já que, do ponto de vista físico de reestruturação de agregados (Vezzani, 2001) (Apêndice 24) e em relação ao conteúdo de C_{org} (Apêndice 25), o mesmo já conseguiu recuperar o nível de qualidade do tratamento referência positivo CN (Vezzani, 2001). Acredita-se que a elevada presença de raízes no tratamento PA, observada por Silva e Mielniczuk (1998) neste mesmo experimento (6,00 cm cm⁻³ em PA, contra 1,08 cm cm⁻³ em A/M, na camada de 0-10 cm), aliada à perenidade das mesmas no solo e à elevada adição de massa pela parte aérea do capim pangola (Apêndice 26), devem influenciar positivamente os indicadores biológicos analisados, elevando sua qualidade em relação aos tratamentos de culturas e ao SD. Dando apoio à hipótese do "efeito rizosférico", Bergstrom e Monreal (1998) verificaram maior atividade enzimática na linha do que na entrelinha das culturas de milho e soja. Da mesma forma, Aon e Colaneri (2001) verificaram uma estratificação no espaço para as diversas atividades enzimáticas observadas, havendo uma redução das mesmas em função da profundidade, o que sugere a influência da cultura sobre as atividades enzimáticas nos arredores da rizosfera, em função de sua alta atividade microbiana provocada pelas adições de C pelas raízes das plantas.



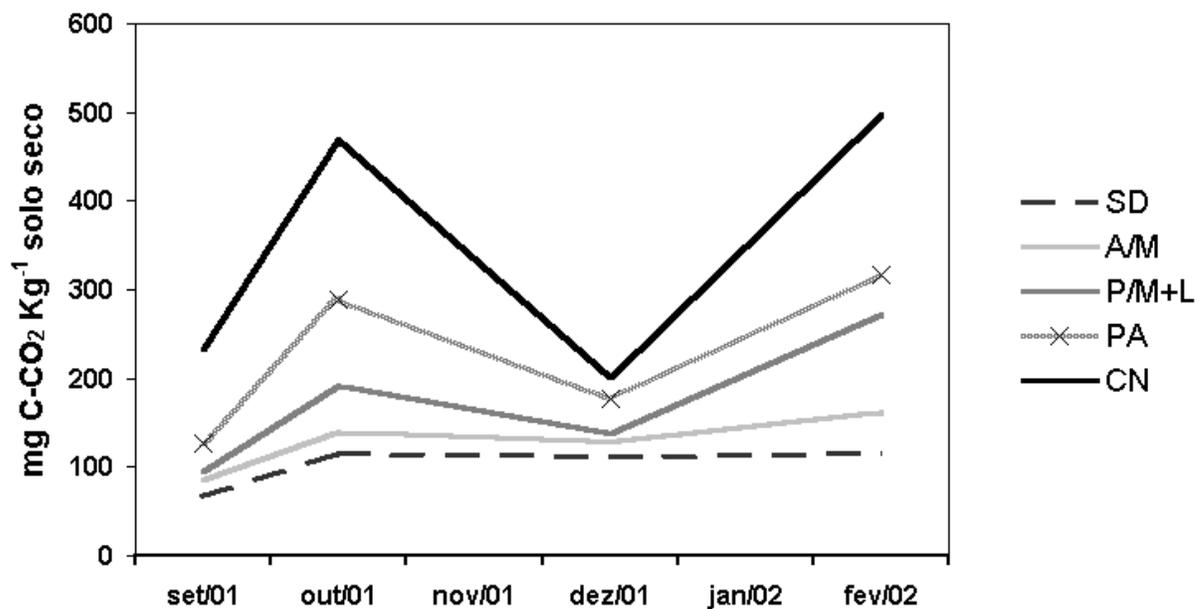
Com relação à BM, como pode ser observado na Figura 13, o tratamento PA não alcançou os valores verificados no tratamento CN.

FIGURA 13. Biomassa microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

Os valores de BM para este tratamento não se diferenciaram significativamente dos tratamentos de cultura, nem tampouco do tratamento SD entre os meses de setembro e dezembro (Apêndice 15). Os resultados obtidos para fevereiro não foram significativos estatisticamente, não permitindo uma avaliação mais clara de seu comportamento durante esta época de amostragem. No entanto, conforme a média obtida para as quatro observações do período, pode-se verificar que o tratamento PA apresentou um comportamento intermediário entre os dois tratamentos de culturas, parecendo aproximar mais seus valores do tratamento contendo leguminosas (P/M+L). Estes resultados demonstram que o elevado conteúdo de C_{org} (Apêndice 25) e a alta densidade de raízes, verificada neste tratamento por Silva e Mielniczuk (1998), não foram suficientes para, da mesma forma, recuperar a BM aos níveis observados no tratamento CN. A principal hipótese levantada para esta diferença reside nas diferenças quanto à biodiversidade microbiana existentes entre os tratamentos PA e CN. Esta maior diversidade presente no CN é proporcionada pela igual maior diversidade de espécies vegetais existentes neste tratamento, as quais criam um número de nichos ecológicos muito superior no solo.

O comportamento sazonal do tratamento PA assemelhou-se ao dos tratamentos referência e do tratamento de culturas A/M, havendo um aumento dos valores de BM até o mês de dezembro e um decréscimo dos mesmos no mês de fevereiro. Este comportamento explica-se, provavelmente, por características fenológicas das coberturas vegetais dos referidos tratamentos. Prova disto é que os valores de BM no tratamento P/M+L apresentaram um comportamento um pouco diverso dos anteriores ao longo do período, elevando-se de setembro a outubro, estabilizando-se até dezembro e voltando a elevar-se até fevereiro. É provável que o ciclo de desenvolvimento da leguminosa lablab tenha sido a maior responsável por esta variação comportamental da BM no tratamento P/M+L.

Quanto à RM, os resultados do tratamento PA só assemelharam-se estatisticamente aos do CN nas avaliações realizadas em dezembro (Apêndice 16), quando houve uma queda brusca nos valores da RM para todos os tratamentos (Figura 14). Nas demais épocas de avaliação, os resultados de RM para este tratamento foram intermediários entre os resultados para CN e P/M+L, assemelhando-se estatisticamente aos deste último. Nas avaliações de setembro e outubro, não houve diferenças significativas entre os resultados de RM para PA, P/M+L, A/M e SD, porém nas avaliações seguintes, o tratamento PA diferenciou-

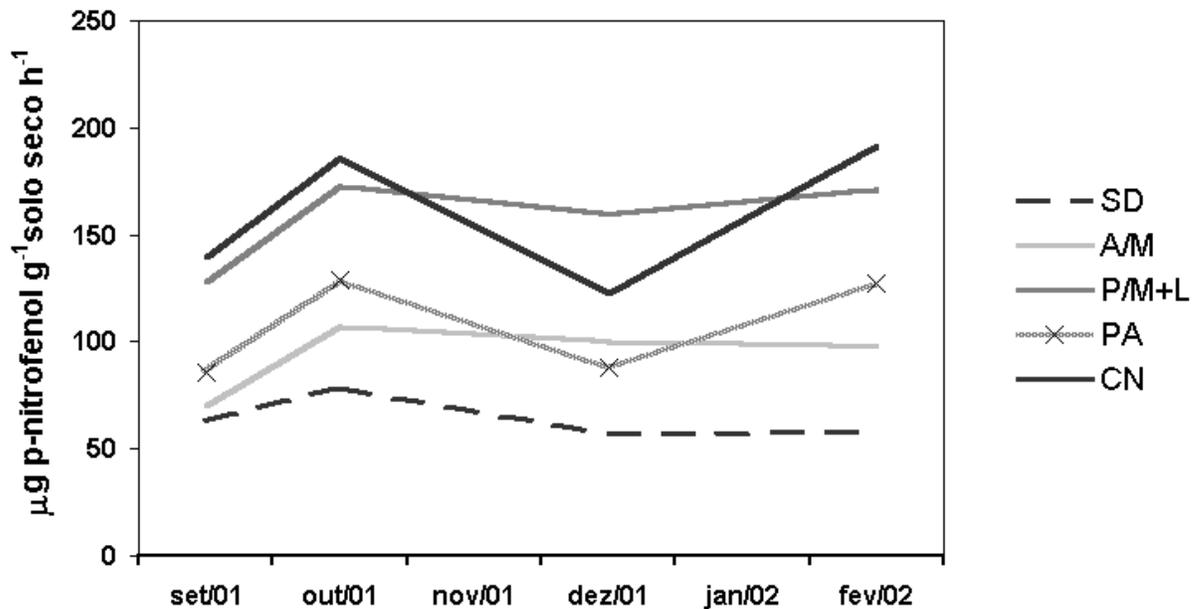


se dos tratamentos A/M e SD, o que demonstra uma atividade microbiana diferenciada do mesmo neste período.

FIGURA 14. Respiração microbiana (acumulado de 20 dias) na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no

inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola;
CN = campo nativo.

O valor mediano dos resultados de RM para o tratamento PA no período (228 mg de C-CO₂ Kg⁻¹ de solo seco) (Apêndice 16) indica que este tratamento apresenta uma RM intermediária entre os tratamentos CN e P/M+L, o que demonstra que este tipo de tratamento é eficaz para recuperar a atividade global da microbiota do solo, apresentando valores superiores aos tratamentos que envolvem culturas quanto a este indicador.



Quanto à atividade da β -glucosidase, o tratamento PA apresentou um comportamento sazonal muito semelhante ao CN, apresentando picos nos meses de outubro e fevereiro e um decréscimo de atividade em dezembro (Figura 15). Ambos os tratamentos são constituídos basicamente de gramíneas perenes, o que justifica um comportamento microrgânico muito semelhante, embora em escalas diferentes.

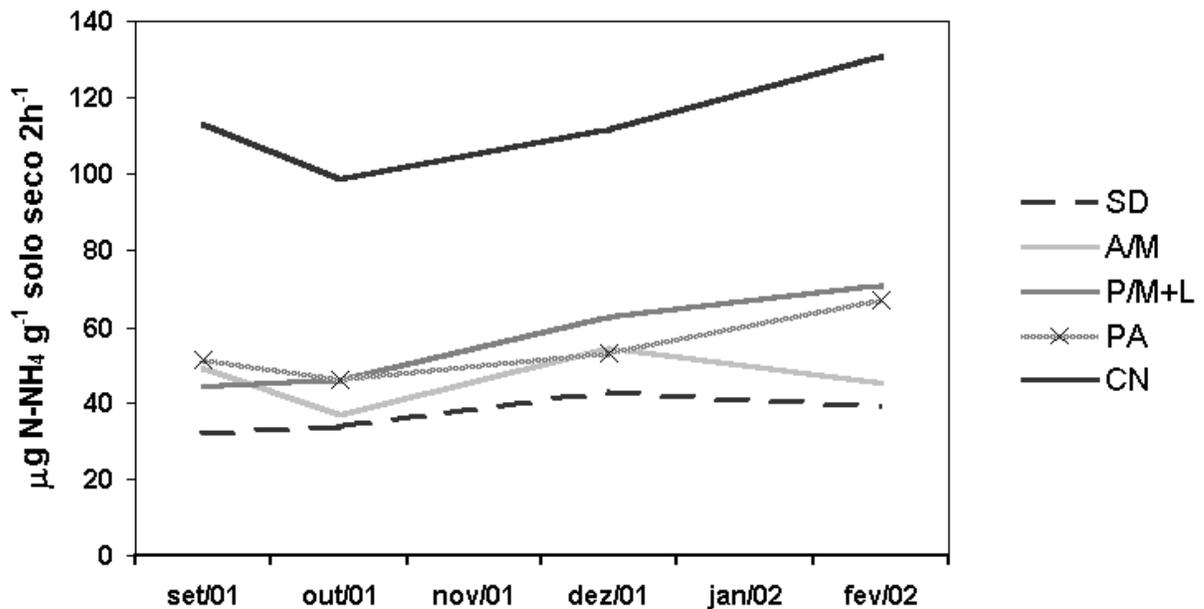
FIGURA 15. Atividade de β -glucosidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

Os comportamentos sazonais de atividade de β -glucosidase dos tratamentos de culturas também foram muito semelhantes entre si ao longo do período, provavelmente em função da presença em ambos da cultura do milho. Esta, com suas excreções radiculares, talvez tenha favorecido a atividade de microrganismos celulolíticos, ativando, conseqüentemente, a produção e a atividade desta enzima.

O tratamento P/M+L apresentou valores médios sempre mais elevados do que PA em relação à atividade desta enzima, ao longo do período, sendo estes valores estatisticamente distintos nos meses de dezembro e fevereiro (Apêndice 17). No mês de dezembro, os valores de atividade de β -glucosidase para P/M+L superaram inclusive os obtidos para CN, sendo que as prováveis causas deste comportamento estão relacionadas ao conteúdo mais elevado de N do material vegetal deste tratamento, conforme já foi discutido no estudo anterior.

Através da representação gráfica das médias das atividades de β -glucosidase da Figura 15, pode-se perceber que o tratamento PA apresenta valores bastante intermediários entre os tratamentos referência CN e SD ao longo de todo o período. Isto indica que a implantação de capim pangola sobre o solo degradado permitiu uma recuperação da atividade celulolítica do mesmo ao longo do tempo de condução do experimento, porém esta ainda não atingiu os níveis verificados no solo referência sob CN. Vale lembrar, no entanto, que os níveis de C_{org} no tratamento PA já foram igualados aos do CN (Apêndice 17).

Em relação à atividade da urease, o tratamento referência CN apresentou valores estatisticamente superiores e diferenciados dos demais ao longo de todo o período (Apêndice 18), repetindo o fenômeno observado no primeiro estudo. Por outro lado, o tratamento PA não se destacou dos tratamentos envolvendo culturas anuais (Figura 16), chegando mesmo a assemelhar estatisticamente seus valores para esta atividade aos do tratamento SD nos meses de outubro e dezembro. Mesmo mantendo uma cobertura vegetal ao longo de todo o ano, com um volume de raízes superior aos tratamentos de culturas e com teores de C_{org} e N total idênticos ou muito próximos de CN (Apêndice 25), este tratamento não foi capaz de recuperar a reatividade do solo aos níveis originais no que tange à atividade da urease,



capacidade de reciclagem de N.

FIGURA 16. Atividade de urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

A hipótese para este comportamento do tratamento PA é de que a simplificação do sistema solo-planta, com a presença de uma única espécie sobre o solo, provoque uma forte seleção sobre a biodiversidade nele presente, de forma que muitos dos organismos que desenvolvem-se no CN não encontram possibilidades de sobrevivência no ambiente ali formado, reduzindo, desta forma, também sua capacidade de produção de enzimas de solo. Assim, a menor atividade enzimática acima registrada seria o resultado de um nível de complexidade inferior do sistema solo-planta estabelecido no tratamento PA, em relação ao referência CN. Conforme Beare et al. (1995), a diversidade funcional de um solo pode ser grandemente ampliada em função da amplitude da diversidade de espécies nele presente. Estes autores afirmam que, através de uma hierarquia de interações que se estabelece entre as espécies, a biodiversidade presente nos ambientes acima e no interior do solo torna-se fundamental para o desenvolvimento e a manutenção de um mosaico diverso de microsítios e de recursos no mesmo. E esta maior diversidade, portanto, é a responsável por uma redundância funcional também mais elevada por parte da biota do solo.

O mesmo fenômeno pode ser observado em relação à atividade da amidase (Figura 17). Novamente o tratamento CN apresenta níveis destacados de atividade desta enzima, enquanto todos os demais tratamentos apresentam uma atividade bastante inferior. O tratamento PA, maior alvo deste estudo, passa a diferenciar seus valores de atividade para esta enzima dos do tratamento SD apenas na observação de fevereiro, assemelhando-os aos do tratamento P/M+L (Apêndice 19). A hipótese para a causa destes resultados é a mesma descrita para a atividade da urease.

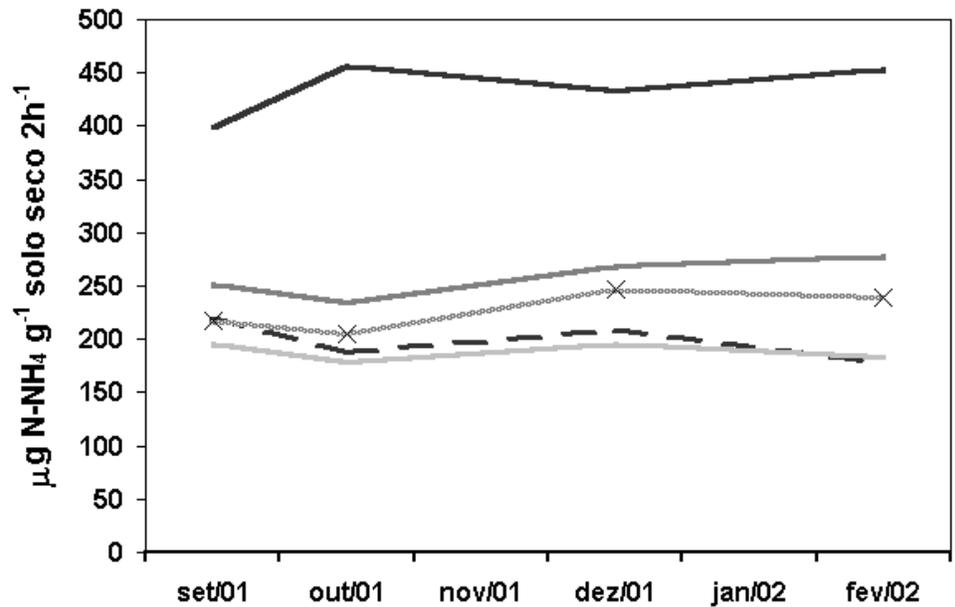


FIGURA 17. Atividade de amidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

O tratamento A/M apresentou resultados médios inferiores aos verificados em SD para a atividade da amidase, apesar de não haver se diferenciado estatisticamente do mesmo em nenhuma época (Apêndice 19). Este fato também pode ser observado em algumas épocas de observação no Estudo 1 (Apêndice 05). É possível que, além da redução da complexidade, aliem-se aqui a sazonalidade das culturas e a ausência de raízes em parte da área do solo, já que os mesmos são semeados em linha, e em parte do ano, pois os sistemas radiculares estabelecem-se gradativamente no solo. Prova disto é que os valores de atividade desta enzima para A/M só passam a superar numericamente os de SD no mês de fevereiro, quando o sistema radicular do milho está completamente estabelecido. O tratamento SD, apesar de ser mantido descoberto com o uso esporádico de herbicidas, apresenta um mínimo de vegetação pioneira, a qual, possivelmente em função mesmo desta sua característica, tem a capacidade de favorecer a produção de enzimas de solo, notadamente a amidase.

A Figura 18 apresenta o comportamento da atividade da fosfatase ácida para os tratamentos estudados durante o período. Verifica-se que, como no estudo anterior, há uma diferença marcante entre os níveis de atividade desta enzima para o tratamento referência CN com relação aos demais. Inicialmente, esperava-se verificar uma atividade mais elevada de fosfatase ácida no tratamento PA em

relação aos tratamentos de culturas, em função de seu maior conteúdo radicular, uma presença mais contínua de cobertura vegetal e menores teores de fósforo solúvel nele observados (14 mg L^{-1} de P) (Apêndice 22), já que as adições de fosfato sobre estas parcelas limitaram-se aos anos em que houve cultivo de milho sobre as mesmas (1988/89, 1993/94 e 1995/96). No entanto, como pode ser observado na Figura 18, este resultado não foi confirmado, tendo a atividade desta enzima para este tratamento se assemelhado aos obtidos para os tratamentos de culturas, em especial aos de P/M+L, ao longo do período (Apêndice 20). A hipótese para este comportamento é a mesma apresentada para o das atividades de urease e amidase, ou seja, a ausência de biodiversidade vegetal sobre o solo.

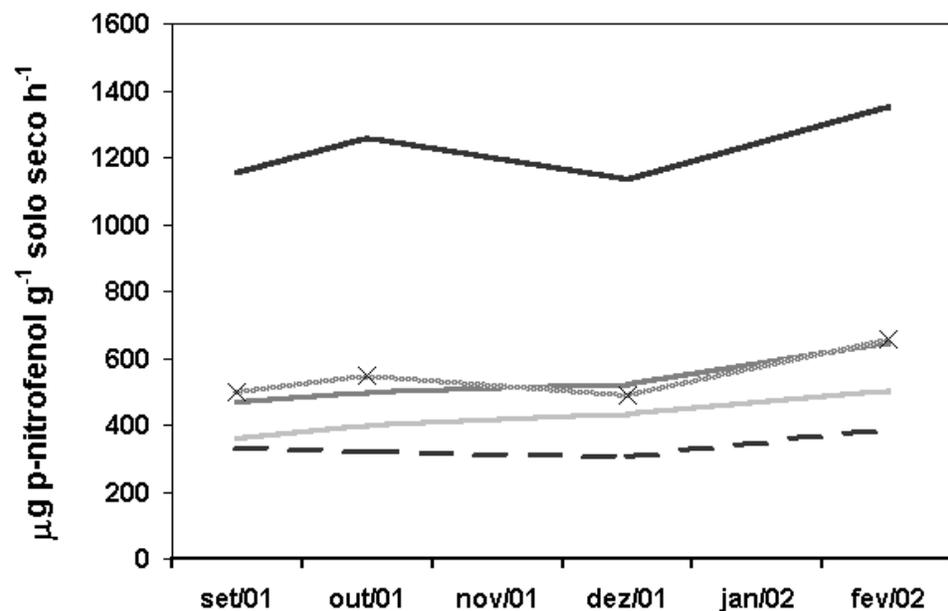


FIGURA 18. Atividade de fosfatase ácida na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

Quanto à atividade da aril-sulfatase, os resultados obtidos para todos os tratamentos foram muito homogêneos no período estudado (Figura 19). Outra vez o CN destaca-se estatisticamente dos demais, com valores de atividade bastante superiores (Apêndice 21). O tratamento PA e P/M+L apresentam valores intermediários de aril-sulfatase, não se diferenciando entre si ao longo de todo o período. Já para o tratamento A/M, foram observados valores intermediários entre

o grupo referido anteriormente e o tratamento SD para esta atividade enzimática, sendo que este comportamento também manteve-se o mesmo por todas as épocas de amostragem.

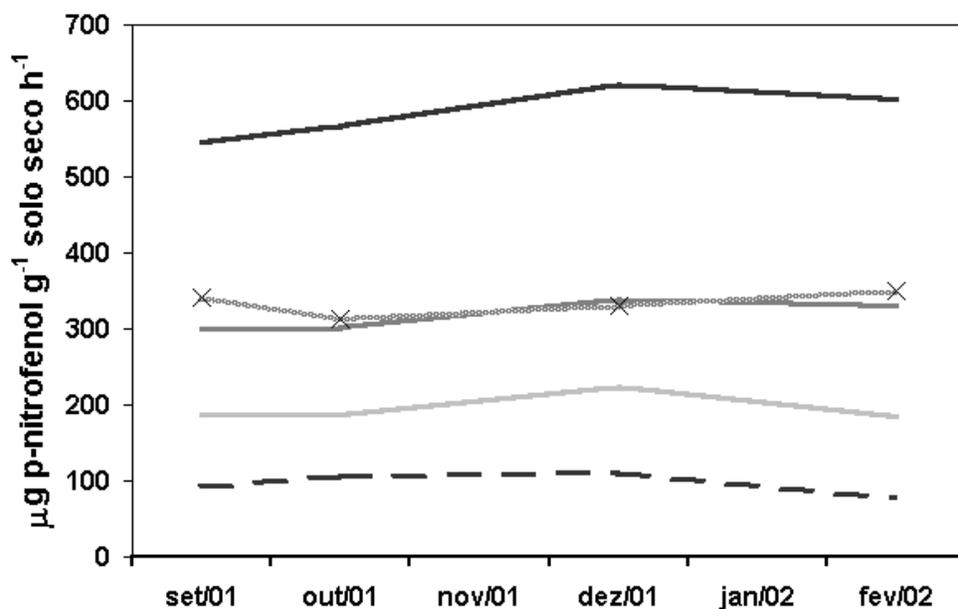


FIGURA 19. Atividade de aril-sulfatase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

Apesar de ser possível a observação de uma recuperação da capacidade de reciclagem de S do solo sob o tratamento PA, esta não foi suficiente para superar os valores dos tratamentos de culturas. Isto demonstra que a maior qualidade física observada para este tratamento por Silva e Mielniczuk (1998) e Vezzani (2001), também não se reflete em uma melhoria proporcional de qualidade no que se refere à ciclagem do S no solo.

Observando o gráfico integrativo dos indicadores biológicos da Figura 20, percebe-se que o tratamento PA favoreceu uma recuperação mais homogênea da qualidade do solo sob o ponto de vista biológico, em relação aos dois tratamentos com culturas anuais, como pode ser observado pelo baixo desvio padrão obtido para os valores deste tratamento e apresentado no Apêndice 27. É possível que isto tenha ocorrido devido ao comportamento deste tratamento ser muito similar ao do tratamento referência CN, em vista da presença mais constante de cobertura vegetal e devido a ambos serem dominados por gramíneas perenes com sistemas radiculares semelhantes. No entanto, de modo geral, esta recuperação não

acompanhou a recuperação física do solo verificada por Silva e Mielniczuk (1998) e Vezzani (2001).

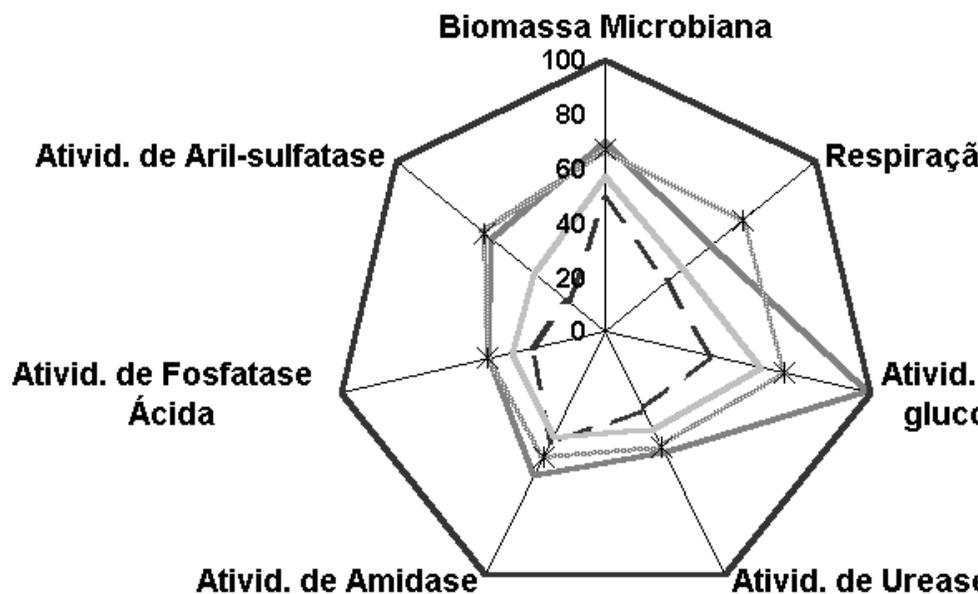


FIGURA 20. Representação integrativa dos indicadores biológicos na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

Desta maneira, como pode ser observado na Figura 21, o IBQS deste tratamento foi calculado em 54,5 %, valor muito semelhante ao obtido pelo tratamento P/M+L (55%) (Apêndice 27).

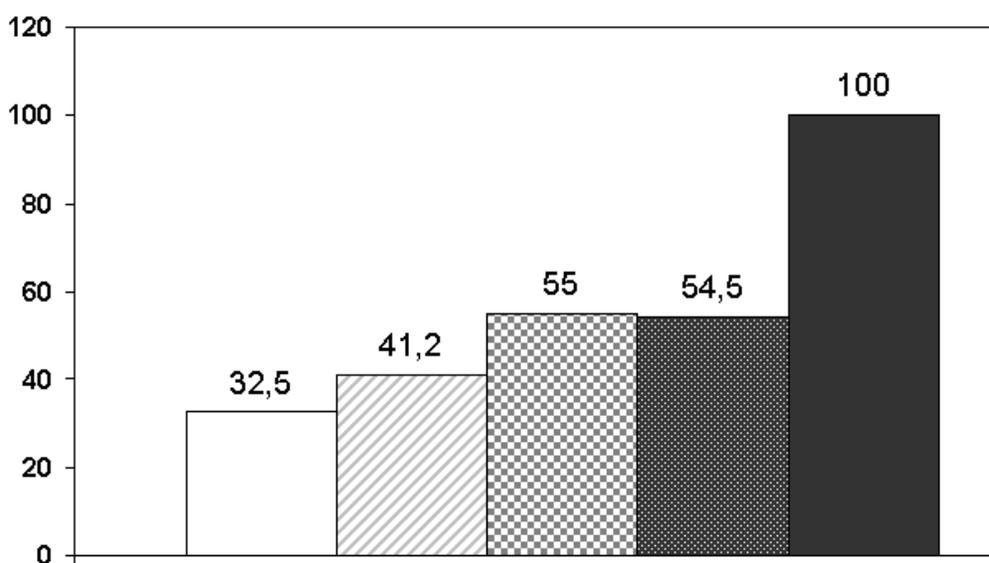


FIGURA 21. Índice biológico de qualidade do solo (IBQS), na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho típico descoberto, sob pastagem cultivada e sob dois sistemas de cultura de milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). O IBQS foi calculado pela fórmula: $IBQS_i = média_i \times [1 - (desvio\ padrão_i / 200)]$. SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

De uma forma geral, portanto, o tratamento PA não garantiu uma recuperação da vida do solo e de sua atividade da mesma forma que o fez com suas características físicas. Depreende-se daí que a qualidade do solo não pode limitar-se à análise de indicadores físicos ou químicos, sendo de fundamental importância a análise concomitante de indicadores biológicos, especialmente no que tange a sua capacidade de desempenhar funções essenciais, como é o caso da ciclagem de nutrientes. Por meio deste tipo de avaliação, parece ser possível determinar

novos métodos de recuperação de solos degradados, bem como avaliar, incrementar e garantir a sustentabilidade dos mais diversos agroecossistemas.

5.3. Estudo 3 - Qualidade de um solo sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de nitrogênio mineral em cobertura, em relação aos tratamentos referência sob campo nativo e solo descoberto, avaliada por indicadores biológicos

Este estudo foi realizado com o objetivo de verificar o efeito da adição de N, na forma de uréia, em cobertura na cultura do milho sobre a qualidade biológica do solo. A hipótese levantada neste estudo é de que a adição de N, seja na forma de adubação verde com leguminosas, ou na de fertilizantes nitrogenados minerais aumenta a ciclagem de C no solo, porém reduz sua capacidade biológica de ciclagem de outros nutrientes, como N, P e S, e, conseqüentemente, sua qualidade em termos biológicos. Apoiando esta hipótese, Aon e Colaneri (2001) verificaram que a atividade da urease decresceu sempre que os níveis de amônio e nitrato aumentaram no solo. Estes autores justificam este fato, citando Dick (1992), Bandick e Dick (1999) e Ajwa et al. (1999), que afirmam em seus trabalhos que adições de fertilizantes nitrogenados provocam decréscimos na habilidade do solo de produzir enzimas relacionadas à ciclagem de N, tais como a urease e a amidase. Segundo os primeiros autores, este mecanismo representa um *feedback* negativo na habilidade (não quantidade total degradada) do solo de degradar MO e fertilizantes adicionados. De forma semelhante, apesar de a comparação experimental não ser a mesma, caberia citar o trabalho de Bolton et al. (1985), os quais verificaram que a BM e as atividades de urease, fosfatase e desidrogenase presentes em um solo adicionado por longo tempo apenas com adubação verde com leguminosas apresentavam níveis significativamente mais altos do que os observados em um segundo sistema adubado por 30 anos com amônia anidra, P e S na forma mineral, demonstrando que o primeiro sistema apresentava uma maior e mais ativa microbiota do solo.

Por outro lado, acredita-se que, com a adição de N, tanto na forma orgânica, quanto mineral, deva ocorrer uma aceleração da degradação do C_{org} do solo, elevando também os níveis dos indicadores biológicos ligados ao ciclo do C, como a respiração e a atividade de β -glicosidase. Neste sentido, Ajwa et al. (1999) e Aon e Colaneri (2001) observaram que fertilizações nitrogenadas repetidas ao longo do tempo aumentaram significativamente a atividade desta enzima no solo. Em relação à BM, não houve diferenças significativas, tanto para a interação, quanto para os componentes principais no fatorial "sistemas de cultura x adição de N", nos dois primeiros meses de observação (Tabela 04). Apenas a partir de dezembro é que os dois sistemas de culturas passaram a diferenciar-se entre si, sendo que o tratamento P/M+L apresentou uma BM mais elevada do que A/M, confirmando o fato observado no Estudo 1 de que o consórcio do milho com leguminosas permite uma elevação da BM no solo. Estes resultados concordam com os obtidos por Angers et al. (1993), que afirmam que a presença de leguminosas, associada à redução do revolvimento do solo, promove o aumento da BM no solo.

TABELA 04. Biomassa microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Efeitos Principais		Biomassa Microbiana (μ g de C-CO ₂ g ⁻¹ solo seco)				Média Geral
		Set/01	Out/01	Dez/01	Fev/02	
Sistemas de Cultura	A/M ⁽¹⁾	305	354	360 b	230 b	312
	P/M+L	320	417	398 a	412 a	387
Adição de N	Sem	320	409	397	379 a	376
	Com	305	361	361	263 b	322
Efeito Sistemas de Cultura		NS	NS	*	**	
Efeito Adição de N		NS	NS	NS	*	
Interação		NS	NS	NS	NS	
Média		312	385	379	321	349
CV(%)		17,1	28,7	26,2	23,9	-

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

NS: não significativo

⁽¹⁾ A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; sem = 0 Kg ha⁻¹ de N em cobertura no milho; com = adição de 180 Kg ha⁻¹ de N na forma de uréia em cobertura no milho.

A adição de N em cobertura só foi estatisticamente diferenciável no fatorial no mês de fevereiro, quando verificou-se que a mesma reduziu a BM em relação à não adição (Tabela 04). De modo geral, como pode ser observado na Figura 22, a adição de N em cobertura no milho não aumentou a BM dos dois tratamentos de culturas. Kirchner et al. (1993), trabalhando com cultivo de milho com ou sem adição de N mineral e com adubação verde com leguminosas, constataram que a BM não foi afetada pela adição de N. Salinas-Garcia et al. (1997) também verificaram que a fertilização nitrogenada teve pouco efeito sobre a BM. Os autores sugerem que o principal fator limitante para a comunidade microbiana seja a disponibilidade de C. Desta forma, a influência da disponibilidade de N sobre o crescimento microbiano está também na dependência da disponibilidade de C.

No presente trabalho, esta adição provocou uma redução da BM nas médias do período avaliado (Tabela 04). Segundo Lovell et al. (1995), a adição continuada de N mineral às culturas pode, ao longo do tempo, resultar na redução de raízes e na conseqüente redução da BM.

Observa-se que, mesmo apesar do longo tempo de condução do experimento (18 anos), a adição de N em cobertura não favoreceu um incremento na BM dos

tratamentos de sistemas de culturas estudados, fazendo com que o tratamento A/M c/N apresentasse valores estatisticamente semelhantes aos do tratamento SD ao longo de todo o período estudado (Apêndice 28). Isto demonstra que este tratamento não é adequado para a recuperação da qualidade biológica do solo, no que diz respeito a sua BM.

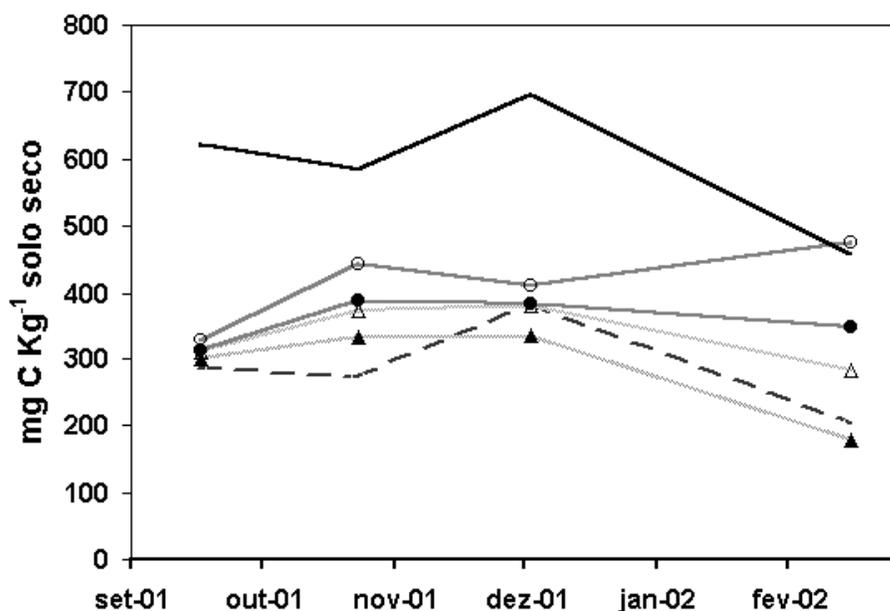


FIGURA 22. Biomassa microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002. SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no

verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo. As linhas tracejadas indicam as épocas das adições de N mineral.

O tratamento CN destacou-se dos demais nos meses de setembro e dezembro quanto a seus valores de BM, não se diferenciando, no entanto, dos tratamentos de culturas em outubro (Apêndice 28) em relação a este indicador. Em fevereiro, seus valores de BM foram semelhantes aos dos tratamentos P/M+L s/N e c/N e A/M s/N, porém diferenciaram-se estatisticamente dos observados para o tratamento A/M c/N.

Devido à grande variabilidade dos dados obtidos para a RM no período estudado, não houve diferenças significativas no fatorial "sistemas de cultura x adição de N" nos três primeiros meses de observação (Tabela 05). Apenas no mês de fevereiro foi possível diferenciar a RM entre os sistemas de cultura, de forma que P/M+L apresentou valores superiores de RM em relação a A/M, conforme já havia sido observado no Estudo 1. Também Vargas e Scholles (2000) observaram que a RM acumulada de 60 dias, na camada de 0-5 cm de profundidade, foi superior no solo sob a sucessão cultural aveia+vicia/milho+caupi em relação ao sob sucessão aveia/milho. Segundo os autores, a maior disponibilidade de N e de compostos solúveis presentes em leguminosas podem ter possibilitado esta maior atividade microbiana.

TABELA 05. Respiração microbiana (acumulado de 20 dias) na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Efeitos Principais		Respiração Microbiana (μ g de C-CO ₂ g ⁻¹ solo seco)				Média Geral
		Set/01	Out/01	Dez/01	Fev/02	
Sistemas de Cultura	A/M ⁽¹⁾	86	145	132	196 b	140
	P/M+L	111	183	153	300 a	187
Adição de N	Sem	90	166	134	217	152
	Com	107	162	152	279	175
Efeito Sistemas de Cultura		NS	NS	NS	**	
Efeito Adição de N		NS	NS	NS	NS	
Interação		NS	NS	NS	NS	
Média		98	164	143	248	164
CV(%)		19,9	21,8	19,0	18,9	-

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

NS: não significativo

⁽¹⁾ A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; sem = 0 Kg ha⁻¹ de N em cobertura no milho; com = adição de 180 Kg ha⁻¹ de N na forma de uréia em cobertura no milho.

Através da Figura 23, pode-se observar que, embora, em termos absolutos, a adição de N nos tratamentos de culturas tenha favorecido a RM, esta não permitiu um incremento real na atividade biológica do solo em relação aos resultados obtidos para o tratamento referência CN.

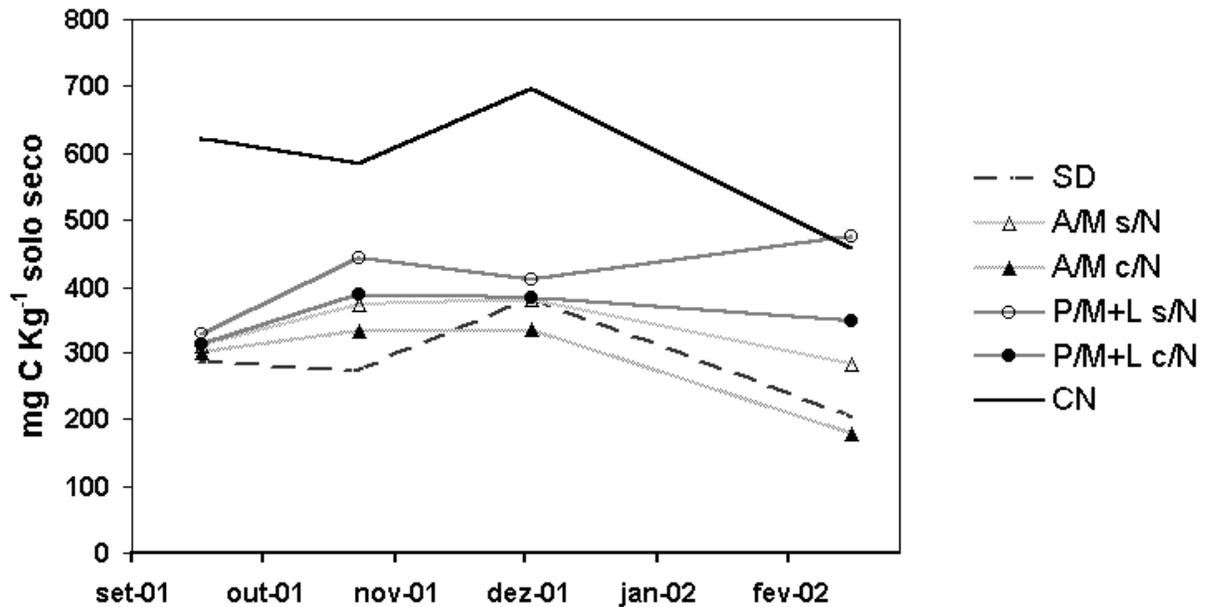


FIGURA 23. Respiração microbiana (acumulado de 20 dias) na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a

fevereiro de 2002. SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N CN = campo nativo. As linhas tracejadas indicam as épocas das adições de N mineral.

No mês de fevereiro, os tratamentos P/M+L c/N e s/N e A/M c/N assemelharam-se quanto a sua RM, sendo que P/M+L c/N diferenciou-se significativamente de A/M s/N e SD (Apêndice 29). O tratamento P/M+L s/N diferenciou-se apenas de SD, e os tratamentos A/M c/N e s/N não diferiram de SD, mesmo no mês de fevereiro quanto a seus valores de RM. Isto demonstra que, também em relação à RM, o tratamento A/M independentemente da adição de N em cobertura, não é eficiente para recuperar a qualidade do solo. Já a média dos valores de RM observados para o tratamento P/M+L c/N (350 mg de C-CO₂ Kg⁻¹ de solo seco) (Apêndice 29) parecem indicar um incremento na atividade heterotrófica geral neste solo em relação ao mesmo tratamento de cultura sem a adição de N. Isto indica um possível incremento na ciclagem do C_{org} do solo, favorecendo uma liberação mais rápida de nutrientes para as plantas.

Quanto à atividade de β -glucosidase, o fatorial "sistemas de cultura x adição de N" foi significativo para o efeito principal "sistemas de cultura" ao longo de todo o período estudado (Tabela 06), sendo que o sistema de cultura P/M+L foi sempre superior a A/M para esta atividade enzimática. Este efeito do sistema de cultura, decorrente da presença da leguminosa, já havia sido observado no Estudo 1. A adição de N, no entanto, só foi significativa no mês de fevereiro, quando verificou-se uma maior atividade da β -glucosidase nos tratamentos envolvendo a adição de N em relação aos sem esta adição. Neste período, a adição de N em cobertura favoreceu a degradação da celulose e, portanto, a ciclagem do C_{org} no solo. No entanto, esta diferença só pode ser verificada na observação de fevereiro, possivelmente em função do maior conteúdo de N presente nas plantas de milho adicionadas com este nutriente e já senescentes nesta época, o que favoreceu a degradação de resíduos orgânicos no solo, com o conseqüente incremento da produção desta enzima pelos microrganismos. Desta maneira, a adição de N às culturas influenciou a elevação da atividade desta enzima de forma indireta, ou seja, a partir da redução da relação C/N dos tecidos dos mesmos. Burle (1995), trabalhando com estes mesmos tratamentos de sistemas de culturas, comprovou a elevação dos teores de N na folha índice do milho após a adição de 120 kg ha⁻¹ de N em cobertura.

TABELA 06. Atividade de β -glucosidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Efeitos Principais		Atividade da β -glucosidase (μ g p-nitrofenol g ⁻¹ solo h ⁻¹)				Média Geral
		Set/01	Out/01	Dez/01	Fev/02	
Sistemas de Cultura	A/M ⁽¹⁾	80 b	104 b	104 b	106 b	98
	P/M+L	128 a	183 a	157 a	198 a	166
Adição de N	Sem	99	140	130	135 b	126
	Com	109	148	131	168 a	139
Efeito Sistemas de Cultura		*	**	**	**	
Efeito Adição de N		NS	NS	NS	**	
Interação		NS	NS	NS	NS	
Média		104	144	131	152	132
CV(%)		24,6	22,2	14,0	10,2	-

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

NS: não significativo

⁽¹⁾ A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; sem = 0 Kg ha⁻¹ de N em cobertura no milho; com = adição de 180 Kg ha⁻¹ de N na forma de uréia em cobertura no milho.

Através da Figura 24, pode-se observar, no entanto, que, após a primeira adição de N (outubro), o tratamento P/M+L c/N destaca-se de P/M+L s/N em termos de sua atividade de β -glucosidase, de tal forma que seus valores para esta atividade enzimática não se assemelham aos dos tratamentos de culturas A/M como acontece com este último (Apêndice 30). Isto ocorre, neste período, provavelmente pela aceleração da degradação do material senescente existente sobre o solo, devido à maior disponibilidade de N no meio, fornecido pela adição. Outro pico de atividade desta enzima ocorre neste tratamento no mês de fevereiro, quando também inicia-se a degradação dos materiais senescentes de ambas as cultura (milho e lablab), agora favorecida pela maior quantidade de N presente nos mesmos em função da adubação em cobertura.

FIGURA 24. Atividade da β -glucosidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico

sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002. SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo. As linhas tracejadas indicam as épocas das adições de N mineral.

Confirmando os dados observados no Estudo 1, os tratamentos de sistemas de culturas envolvendo P/M+L apresentaram atividade de β -glucosidase estatisticamente semelhantes ao tratamento referência CN, enquanto as atividades desta enzima correspondentes aos tratamentos envolvendo A/M foram estatisticamente semelhantes ao tratamento SD (Apêndice 30). Exceção a esta regra é a observação de dezembro, na qual o tratamento A/M c/N diferencia-se de SD quanto à atividade da β -glucosidase, sendo superior à deste último.

A adição de N no sistema de culturas A/M tem um efeito pouco expressivo sobre a atividade de β -glucosidase, ao contrário do esperado. É provável que, mesmo apresentando teores mais elevados de C_{org} e N total em relação a A/M s/N, o tratamento A/M c/N não se diferencie estatisticamente deste quanto a esta atividade enzimática, devido a sua reduzida BM, como visto antes.

Os tratamentos de sistemas de culturas analisados, independente da adição de N em cobertura, apresentaram valores de atividade de urease muito inferiores aos observados para o tratamento referência CN (Figura 25).

FIGURA 25. Atividade da urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002. SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo. As linhas tracejadas indicam as épocas das adições de N mineral.

Em vista da proximidade dos valores obtidos para os tratamentos, só foi possível verificar diferenças estatísticas para a interação "sistemas de cultura x adição de N" do fatorial na observação de fevereiro (Tabela 07). Nesta data, os tratamentos P/M+P c/N e s/N e A/M c/N apresentaram valores de atividade de urease semelhantes entre si, enquanto no tratamento A/M s/N foram observados valores inferiores aos demais (Tabela 08). Nos tratamentos de consórcio, é possível que esta diferença ocorra nesta época em função de um maior desenvolvimento da leguminosa lablab, a qual, através de seus exudatos radiculares, pode favorecer direta e indiretamente a produção desta enzima no solo. Já quanto ao tratamento A/M c/N, talvez a adição de uréia tenha proporcionado aos exudatos e folhas senescentes do milho uma relação C:N mais baixa nesta época do ano, em relação ao tratamento A/M s/N, o que permitiu um aumento da atividade dos microrganismos produtores desta enzima no solo.

TABELA 07. Atividade de urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Efeitos Principais		Atividade da Urease				Média Geral
		(μ g N-NH ₄ g ⁻¹ solo 2h ⁻¹)				
		Set/01	Out/01	Dez/01	Fev/02	
Sistemas de Cultura	A/M ⁽¹⁾	47	35	52	52 b	46
	P/M+L	47	46	62	66 a	55
Adição de N	Sem	46	42	59	58	51
	Com	48	39	55	60	50
Efeito Sistemas de Cultura		NS	NS	NS	**	
Efeito Adição de N		NS	NS	NS	NS	

Interação	NS	NS	NS	**	
Média	47	40	57	59	51
CV(%)	14,1	21,2	14,7	7,6	-

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

NS: não significativo

⁽¹⁾ A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; sem = 0 Kg ha⁻¹ de N em cobertura no milho; com = adição de 180 Kg ha⁻¹ de N na forma de uréia em cobertura no milho.

TABELA 08. Interação dos fatores "sistemas de cultura" e "adição de N" sobre a atividade de urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico em fevereiro de 2002.

Sistemas de Cultura	Adição de N	
	Sem ⁽²⁾	Com
A/M ⁽¹⁾	45 bB	59 aA
P/M+L	71 aA	62 aA

⁽¹⁾ A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão.

⁽²⁾ Sem = 0 Kg ha⁻¹ de N em cobertura no milho; Com = adição de 180 Kg ha⁻¹ de N na forma de uréia em cobertura no milho.

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Na comparação entre todos os tratamentos para o mês de dezembro, o tratamento P/M+L s/N não se assemelhou ao SD quanto à atividade de urease, ao contrário de todos os demais tratamentos com sistemas de culturas, e no mês de fevereiro, não se assemelhou a SD nem a A/M s/N, também ao contrário dos demais (Apêndice 31). Ou seja, o melhor desempenho deste tratamento quanto a esta atividade enzimática, neste período, apresenta a tendência de uma redução da mesma após a adição de N em cobertura neste sistema de cultura. Já os tratamentos envolvendo o tratamento A/M não se diferenciaram entre si quanto à atividade desta enzima ao longo de todo o período por este método de análise dos dados. Também não se diferenciaram do tratamento SD quanto a estes valores até a observação de dezembro. Em fevereiro, o tratamento A/M s/N continuou sendo semelhante a SD quanto a esta atividade, enquanto A/M c/N diferenciou-se deste último para os mesmos valores. Esta elevação da atividade da urease neste tratamento, já referida anteriormente, é muito pontual e não reflete uma melhoria real da capacidade de ciclagem de N no solo em função da adição de uréia em cobertura neste sistema cultural.

A Figura 26 mostra que a adição de N na forma de uréia aos cultivos de milho favoreceu expressivamente a atividade da amidase nos mesmos, em contradição aos dados de Ajwa et al. (1999), que encontraram redução desta atividade, quando da adição de fertilizantes nitrogenados sobre solos de pastagem.

FIGURA 26. Atividade da amidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002. SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo. As linhas tracejadas indicam as épocas das adições de N mineral.

Apesar de estatisticamente esta vantagem só ser observável após a segunda adição de uréia, ocorrida em novembro (Tabela 09), já em setembro observa-se uma superioridade expressiva dos tratamentos de sistemas de culturas com N em relação aos seus respectivos sem N (Figura 26) quanto à atividade desta enzima de solo. Isto indica que este efeito não é devido apenas à adição nitrogenada deste ano, mas também às adições anteriores e aos conteúdos mais elevados de C_{org} e N total presentes nos tratamentos com N em cobertura (Apêndice 37). Confirma estes indícios, o fato de que o tratamento P/M+L c/N apresenta valores semelhantes aos de CN no mês de setembro para esta atividade enzimática, ao contrário de P/M+L s/N (Apêndice 32).

TABELA 09. Atividade de amidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Efeitos Principais		Atividade da Amidase				Média Geral
		(μ g N-NH ₄ g ⁻¹ solo 2h ⁻¹)				
		Set/01	Out/01	Dez/01	Fev/02	
Sistemas de	A/M ⁽¹⁾	223	180 b	221 b	219 b	211

Cultura	P/M+L	294	272 a	291 a	293 a	288
Adição de N	Sem	222	208	232 b	231 b	223
	Com	294	244	281 a	281 a	275
Efeito Sistemas de Cultura		NS	*	**	**	
Efeito Adição de N		NS	NS	*	**	
Interação		NS	NS	NS	NS	
Média		258	226	256	256	249
CV(%)		23,5	21,9	9,5	6,5	-

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

NS: não significativo

⁽¹⁾ A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; sem = 0 Kg ha⁻¹ de N em cobertura no milho; com = adição de 180 Kg ha⁻¹ de N na forma de uréia em cobertura no milho.

Da mesma forma, a adição de N em cobertura ao longo dos anos no tratamento A/M permitiu que o mesmo apresentasse valores estatisticamente semelhantes aos tratamentos que incluem leguminosas, para esta atividade, ao longo de todo o período estudado, o que não aconteceu com o tratamento A/M s/N (Apêndice 32). Em vista destes resultados, pode-se dizer que a adição de N na forma de uréia em cobertura na cultura do milho permite uma recuperação parcial da capacidade de reciclagem de N no solo, uma vez que favorece a ciclagem de substâncias nitrogenadas na forma de amidas, porém não afeta significativamente a ciclagem de compostos contendo uréia nele presentes, como visto mais acima. Além da incorporação de leguminosas no sistema, a adição de N aos mesmos também demonstrou elevar os níveis de atividade da fosfatase ácida no solo (Figura 27).

FIGURA 27. Atividade da fosfatase ácida na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002. SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo. As linhas tracejadas indicam as épocas das adições de N mineral.

Conforme pode ser observado na Tabela 10, a superioridade do sistema P/M+L sobre A/M, em relação à atividade de fosfatase ácida no solo, já é verificável a partir da observação de setembro, porém a superioridade dos tratamentos com adição de N sobre os sem N é significativa apenas a partir de fevereiro para esta atividade enzimática. No entanto, da mesma forma que para a atividade analisada anteriormente, os valores médios para adição de N são superiores aos referentes à ausência desta adição já desde o mês de setembro. Isto indica que este efeito refere-se também ao acúmulo de C_{org} e N total no solo ao longo do tempo nestes tratamentos (Apêndice 37), proporcionado pela adição de N em cobertura, a qual favoreceu uma maior adição de material vegetal ao solo, como pode ser depreendido do elevado rendimento médio de grãos de milho obtido em ambos os tratamentos após esta adição (Apêndice 38). Estes teores mais elevados de C_{org} possivelmente favoreçam uma maior presença de P orgânico no solo, incrementando também sua ciclagem pelos microrganismos.

TABELA 10. Atividade de fosfatase ácida na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Efeitos Principais	Atividade da Fosfatase Ácida	Média
	(μ g p -nitrofenol g ⁻¹ solo h ⁻¹)	Geral

		Set/01	Out/01	Dez/01	Fev/02	
Sistemas de Cultura	A/M ⁽¹⁾	393 b	416 b	473	588 b	468
	P/M+L	534 a	558 a	564	796 a	613
Adição de N	Sem	416	449	479	575 b	480
	Com	512	526	558	809 a	601
Efeito Sistemas de Cultura		*	*	NS	**	
Efeito Adição de N		NS	NS	NS	**	
Interação		NS	NS	NS	NS	
Média		464	487	519	692	540
CV(%)		16,0	14,4	13,6	12,7	-

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

NS: não significativo

⁽¹⁾ A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; sem = 0 Kg ha⁻¹ de N em cobertura no milho; com = adição de 180 Kg ha⁻¹ de N na forma de uréia em cobertura no milho.

Observa-se a tendência de que a soma do efeito da leguminosa em consórcio com o milho ao da adição de N em cobertura tenha ampliado os níveis de atividade de fosfatase ácida no tratamento P/M+L c/N, já que seus valores superaram significativamente os obtidos pelos demais tratamentos de sistemas de culturas para esta atividade na observação de fevereiro (Apêndice 33). Este resultado indica que a combinação destes dois fatores pode ser uma prática adequada para a recuperação da capacidade de ciclagem de fósforo em solos sob cultivo.

No fatorial referente à atividade de aril-sulfatase, o efeito principal "sistemas de cultura" foi significativo ao longo de todo o período observado, sendo que o sistema consorciado de milho e leguminosa manteve-se sempre com valores significativamente mais elevados para esta atividade enzimática em relação aos verificados para A/M (Tabela 11). Quanto ao efeito principal "adição de N", só foi possível verificar diferenças significativas para esta atividade enzimática nas observações de dezembro, nas quais os tratamentos sem adição de N foram estatisticamente superiores aos com N.

TABELA 11. Atividade de aril-sulfatase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Efeitos Principais		Atividade da Aril-sulfatase				Média Geral
		(μg p-nitrofenol g ⁻¹ solo h ⁻¹)				
		Set/01	Out/01	Dez/01	Fev/02	
Sistemas de Cultura	A/M ⁽¹⁾	183 b	157 b	199 b	180 b	180
	P/M+L	261 a	273 a	300 a	332 a	292

Adição de N	Sem	243	244	282 a	258	257
	Com	200	185	216 b	254	214
Efeito Sistemas de Cultura		*	**	**	**	
Efeito Adição de N		NS	NS	*	NS	
Interação		NS	NS	NS	NS	
Média		222	215	249	256	236
CV(%)		16,9	21,1	13,2	17,8	-

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

NS: não significativo

⁽¹⁾ A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; sem = 0 Kg ha⁻¹ de N em cobertura no milho; com = adição de 180 Kg ha⁻¹ de N na forma de uréia em cobertura no milho.

Esta diferença só é comprovável estatisticamente neste momento das observações, porém confirma uma tendência apresentada pelos dados nos dois momentos de observação anteriores (Figura 28). Estes dados indicam a ocorrência de uma redução da atividade da aril-sulfatase, e conseqüentemente da ciclagem de S orgânico no solo, em função da adição de N em cobertura no milho. Este efeito pode estar ligado a uma redução da biomassa fúngica nos tratamentos adicionados de N mineral. Apoiando esta suposição, Bandick e Dick (1999) relatam uma alta correlação entre esta enzima e as populações de fungos no solo, tendo estes autores inclusive sugerido o uso desta atividade enzimática como um indicador da biomassa fúngica do solo, já que estes contêm ésteres de sulfato (substrato da aril-sulfatase), ao contrário das bactérias. Vargas (2002), por sua vez, observou que a adição de N em cobertura no milho favoreceu a população bacteriana do solo, enquanto sua população fúngica decresceu acentuadamente, no período imediatamente posterior à adição nitrogenada, o que confirma a possibilidade de que exista uma relação entre a biomassa fúngica e a atividade de aril-sulfatase no solo.

FIGURA 28. Atividade da aril-sulfatase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002. SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com

adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo. As linhas tracejadas indicam as épocas das adições de N mineral.

No entanto, este efeito supressivo da adição de N sobre a atividade de aril-sulfatase desapareceu na observação realizada em fevereiro. Nesta época, é provável que o efeito da referida adição já tivesse sido dissipado, permitindo uma possível recuperação da população fúngica nos solos sob este tratamento. Confirmando esta hipótese, Vargas (2002) observou um decréscimo da população bacteriana e um aumento da população fúngica, medidas pelas respectivas quantidades de rDNA no solo, aos 63 dias após a última aplicação de N em cobertura na cultura do milho.

De modo geral, no entanto, a adição de N em cobertura inibiu a atividade de aril-sulfatase durante o cultivo do milho, aumentando a diferença existente entre as atividades verificadas para os tratamentos de sistemas de culturas e o tratamento referência CN (Apêndice 34). Isto indica que esta adição pode estar desfavorecendo a recuperação do potencial de ciclagem de S orgânico nos solos cultivados, prejudicando, ao menos momentaneamente, sua qualidade.

No gráfico da Figura 29, é possível observar os polígonos formados pelos valores relativos dos diversos indicadores biológicos utilizados, para cada um dos tratamentos em relação ao tratamento referência CN.

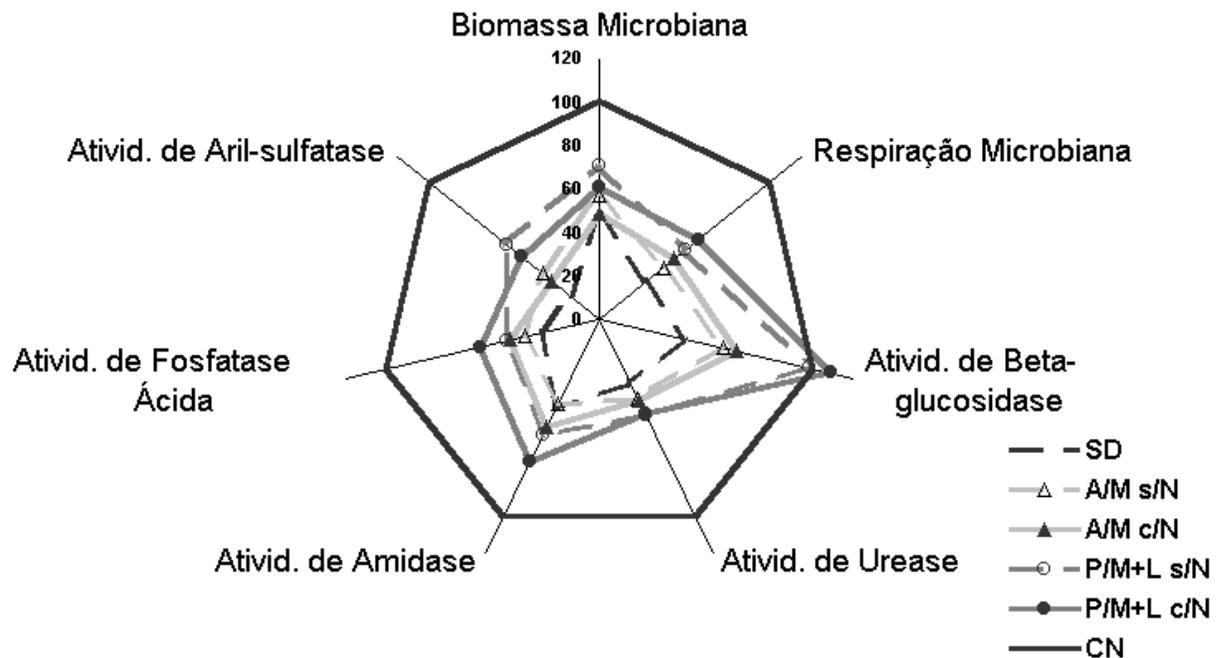


FIGURA 29. Representação integrativa dos indicadores biológicos na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N, comparados aos solos referência sob campo nativo e descoberto, no período de setembro de 2001 a fevereiro de 2002. SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo.

Neste gráfico, percebe-se que, com a adição de N no milho, houve um acréscimo na ciclagem de C, representada pelos valores relativos de RM e de atividade de β -glucosidase. No entanto, conforme a hipótese inicial, esperava-se uma redução das atividades das demais enzimas, responsáveis pela ciclagem de N, P e S. Esta redução deu-se de forma parcial, ou seja, houve realmente uma redução da BM e da atividade de aril-sulfatase nos tratamentos com adição de N e a ausência de diferenças entre estes e os sem N quanto à atividade de urease. Porém, contrariamente à hipótese inicial, para as atividades de amidase e fosfatase ácida, a adição de N em cobertura permitiu a elevação dos seus respectivos valores relativos em relação aos tratamentos sem N. Desta forma, percebe-se que aplicação de uréia em cobertura no milho agiu seletivamente sobre a vida e sua atividade no solo.

Por fim, utilizando a média das médias relativas de todos os indicadores utilizados e considerando também o desvio padrão das variações dos mesmos entre si para

cada tratamento, produziu-se um valor numérico – aqui denominado de IBQS (Índice Biológico de Qualidade do Solo) – o qual pretende quantificar, de maneira globalizante, a qualidade em termos biológicos, dos solos presentes sob cada um dos tratamentos observados. Desta forma, conforme pode ser observado na Figura 30, tanto no sistema A/M, quanto no P/M+L, houve um pequeno acréscimo de qualidade em função da adição de N em cobertura na cultura do milho. No entanto, este acréscimo foi bastante limitado, correspondendo a 2,2% e a 2,1%, quando esta adição foi realizada sobre os sistemas A/M e P/M+L, respectivamente.

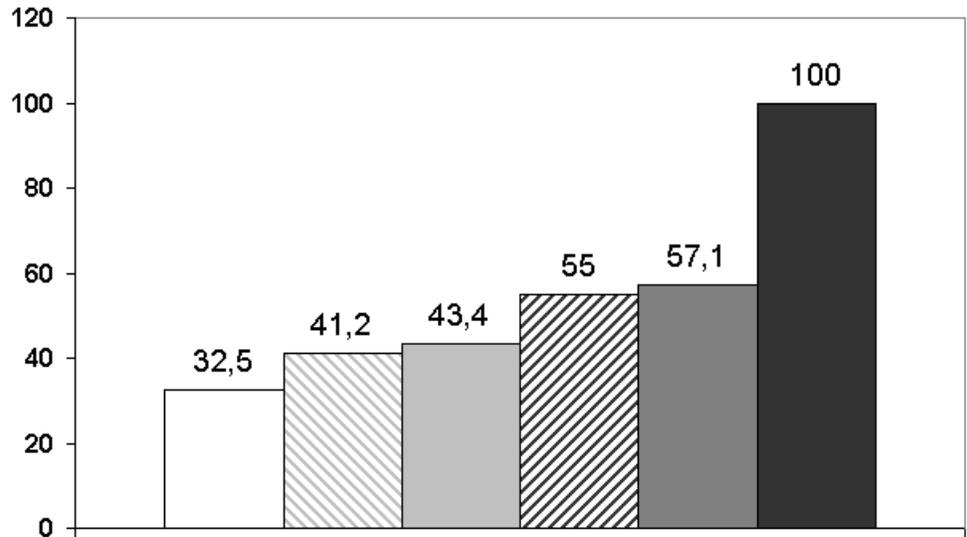


FIGURA 30. Índice biológico de qualidade do solo (IBQS), na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho, de setembro de 2001 a fevereiro de 2002. O IBQS foi calculado pela fórmula: $IBQS_i = média_i \times [1 - (desvio\ de\ médias_i / 200)]$. SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia / milho sem adição de N; A/M c/N = aveia / milho com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio / milho e lablab sem adição de N; P/M+L c/N = pousio / milho e lablab com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo.

É importante considerar também, no entanto, que os tratamentos com adição de N em cobertura apresentam teores mais elevados de C_{org} no solo em relação a suas testemunhas (Apêndice 37). Estes teores mais elevados favorecem níveis também mais elevados aos indicadores biológicos avaliados no presente trabalho, já que todos eles estão diretamente ligados aos conteúdos de C_{org} do solo. Porém, se estes valores forem tomados em relação aos respectivos teores de C_{org} do solo, conforme pode ser visto na Tabela 12, verifica-se que tanto a BM e a RM, quanto

a maioria das atividades enzimáticas avaliadas, inclusive a da β -glucosidase, sofrem reduções consideráveis nos tratamentos com adição de N em cobertura, em relação a suas testemunhas.

TABELA 12. Valores dos indicadores biológicos em relação ao conteúdo de C orgânico na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de cultura de milho, com e sem a adição de N em cobertura, em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Tratamentos	Indicadores Biológicos / C _{org}					
	BM / C _{org} (%)	RM / C _{org} (%)	B-glucosidase / C _{org} (mg g ⁻¹)	Urease / C _{org} (mg g ⁻¹)	Amidase / C _{org} (mg g ⁻¹)	Fosfata Ácida / (mg g ⁻¹)
SD	3,02	1,07	6,74	3,89	21,05	35,58
A/M s/N	3,04	1,16	8,47	4,14	17,03	38,29
A/M c/N	1,95	1,03	7,01	3,20	15,85	34,63
P/M+L s/N	2,46	1,03	9,35	3,31	15,27	31,60
P/M+L c/N	1,65	0,92	8,06	3,20	14,61	31,89
CN	3,51	2,08	9,52	5,25	25,95	72,98

Assim, a maior quantidade de C_{org} presente nos solos destes tratamentos garante níveis relativamente mais altos de BM e atividade metabólica aos mesmos. No entanto, os resultados da Tabela 12 mostram que a qualidade biológica do C_{org} destes solos é significativamente mais baixa do que nos solos sob os tratamentos sem adição de N em cobertura, pois, tanto sua BM, quanto sua atividade biológica foram reduzidas após a aplicação continuada de N na forma de uréia em cobertura na cultura do milho. Esta redução provavelmente ocorra devido à forte seleção que a adição de N mineral em cobertura exerce sobre a biota do solo, provocando uma acentuada redução da diversidade microrgânica e reduzindo, com isto, a redundância funcional nele existente. A partir destes dados, é possível inclusive

inferir que o próprio maior acúmulo de C_{org} verificado nos tratamentos com adição de N mineral não ocorra apenas em função de uma adição mais elevada de material vegetal ao solo ao longo dos anos, mas também em função de uma redução da atividade biológica relativa ao seu teor de C_{org} , provocada por esta mesma adição.

Assim, mesmo ocorrendo de forma continuada ao longo dos anos de cultivo, a adição de N em cobertura não provocou uma alteração significativa da qualidade do solo em termos biológicos. Sem dúvida, as vantagens dos teores mais elevados de C_{org} , em termos de qualidade física e química do solo, e dos ganhos de produtividade obtidos com esta prática são inquestionáveis. Porém os reduzidos resultados quanto a incrementos em termos de qualidade biológica do solo por ela obtidos e a constatação da redução da qualidade biológica de C_{org} presente nos tratamentos sob esta prática podem servir de alerta quanto a seu uso indiscriminado, ao mesmo tempo que sugerem a busca de práticas alternativas que possibilitem uma maximização também destes indicadores, tendo em vista a sustentabilidade produtiva dos solos.

6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, conclui-se que:

- A avaliação conjunta das variáveis biológicas analisadas (biomassa e respiração microbianas e atividades das enzimas β -glucosidase, urease,

amidase, fosfatase ácida e aril-sulfatase) mostrou-se adequada para a quantificação da qualidade do solo, permitindo uma satisfatória discriminação entre todos os tratamentos de coberturas vegetais.

- A possibilidade de diferenciação entre os sistemas de cultivo e formas de manejo adotados sobre o solo é maior no período mais quente do ano, sendo recomendadas para esta época as amostragens de solo com este objetivo.
- A avaliação da qualidade de solo, pelo método proposto e nas condições do solo estudado, torna imprescindível a amostragem concomitante do mesmo solo em situação natural (não perturbado ou perturbado antropicamente de forma mínima) para permitir a comparação dos respectivos níveis dos indicadores biológicos a serem analisados.
- O cultivo de pastagem perene de espécie única (*Digitaria decumbens*) não superou o efeito do cultivo de milho consorciado com leguminosa (*Lablab purpureus*) na recuperação da qualidade do solo em termos biológicos, recuperando-a apenas parcialmente.
- A adição de N mineral na forma de uréia em cobertura na cultura do milho, consorciado ou não com leguminosa (*Lablab purpureus*), agiu seletivamente sobre a vida microbiana e sua atividade no solo, não alterando significativamente sua qualidade em termos biológicos.
- A rotação e a consorciação de culturas são práticas recomendáveis para a recuperação e a manutenção da qualidade biológica dos solos cultivados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDISCOT, T.M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.46, n.2, p.161-168, 1992.
- ALEF, K.; BECK, T.; ZELLES, L.; KLEINER, D. A comparison of methods to estimate microbial biomass and N-mineralization in agricultural and

grassland soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.20, n.4, p.561-565, 1988.

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, 1995a. 576p.

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. β -glucosidase activity. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P.(eds.) **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, 1995b. p.350-352.

ALEF, K.; NANNIPIERI, P.; TRAZAR-CEPEDA, C. Phosphatase activity. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P.(eds.) **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, 1995. p.335-344.

ALEXANDER, M. **Introduction to soil microbiology**. 2nd. ed. New York: J.Wiley, 1977. 467 p.

AJWA, H.A.; DELL, C.J.; RICE, C.W. Changes in enzyme activities and microbial biomass of tall-grass Prairie soil as related to burning and nitrogen fertilization. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.31, n.8, p.769-777, 1999.

ANDERSON, J.P.E.; DOMSCH, K.H. Mineralization of bacteria and fungi in chloroform-fumigated soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.10, n.3, p.207-213, 1978.

ANGERS, D.A.; BISSONNETTE, N.; LÉGÈRE, A.; SAMSON, N. Microbial and biochemical changes induced by rotation and tillage in a soil under barley production. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.73, n.1, p.39-50, 1993.

ANGHINONI, I.; MAGALHÃES, J.R.; NARBER, S.A. Enzyme activity nitrogen uptake and corn growth as affected by ammonium concentration in soil solution. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.11, n.1, p.131-144, 1988.

AON, M.A.; CABELLO, M.N.; SARENA, D.E.; COLANERI, A.C.; FRANCO, M.G.; BURGOS, J.L.; CORTASSA, S. I. Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.18, n.3, p.239-254, 2001.

AON, M.A.; COLANERI, A.C. II. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.18, n.3, p.255-270, 2001.

APPIAH, M.R.; THOMAS, R.L. Inositol phosphate and organic phosphorus contents and phosphatase activity of some Canadian and Ghanaian soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.21, n.1, p.31-38, 1982.

ATLAS, R.M.; BARTHA, R. **Microbial ecology: fundamentals and applications**. 3^a ed. Redwood City: The Benjamin/Cummings, 1993. 505p.

BADIANE, N.N.Y.; CHOTTE, J.L.; PATE, E.; MASSE, D.; ROULAND, C. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.18, n.3, p.229-238, 2001.

BANDICK, A.K.; DICK, R.P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.31, n.11, p.1471-1479, 1999.

BANDICK, A.; MILLER, M.; DICK, R.P. Soil enzyme stability as an indicator of soil quality. **Agronomy Abstracts**, Madison, p.292, 1994.

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 240 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BEARE, M.H.; COLEMAN, D.C.; CROSSLEY Jr, D.A.; HENDRIX, P.F.; ODUM, E.P. A hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling. **Plant and Soil**, The Hague, v.170, n.1, p.5-22, 1995.

BERGAMASCHI, H.; GUADANIN, M.R. **Agroclima da estação experimental agrônômica**. Porto Alegre: Departamento de Plantas Forrageiras e Agrometeorologia da UFRGS, 1990. 96p.

BERGSTROM, D.W.; MONREAL, C.M. Increased soil enzyme activities under two row crops. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.62, n.5, p.1295-1302, 1998.

BERGSTROM, D.W.; MONREAL, C.M.; KING, D.J. Sensitivity of soil enzyme activities to conservation practices. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.62, n.5, p.1286-1295, 1998.

BERI, V.; GOSWAMI, K.P.; BRAR, S.S. Urease activity and its Michaelis constant for soil systems. **Plant and Soil**, The Hague, v.49, n.1, p.105-116, 1978.

BOLTON, H. Jr.; ELLIOT, L.F.; PAPENDICK, R.I.; BEZDICEK, D.F. Soil microbial biomass and selected soil enzyme activities: effect of fertilization and cropping practices. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.17, n.3, p.297-302, 1985.

BRAGAGNOLLO, N. **Efeito da cobertura do solo por resíduos de culturas sobre a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento do milho**. 1986. 119f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

BROHON, B.; DELOLME, C.; GOURDON, R. Complementarity of bioassays and microbial activity measurements for the evaluation of hydrocarbon-contaminated soils quality. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.33, n.7-8, p.883-891, 2001.

BURKET, J.Z.; DICK, R.P. Microbial and soil parameters in relation to N mineralization in soils of diverse genesis under differing management systems. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.27, n.4, p.430-438, 1998.

BURLE, M.L. **Efeito de sistemas de cultura em características químicas do solo**. 1995. 104f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

BURLE, M.L.; MIELNICZUK, J.; FOCCHI, S. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.190, n. 2, p.309-316, 1997.

BURNS, R.G. Enzyme activity in soil: location and a possible role in microbial ecology. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.14, n.3, p.423-427, 1982.

CALEGARI, A.; MONDARDO, A.; BULISANI, E.A.; WILDNER, L.P.; COSTA, M.B.B. (coord.). **Adubação verde no sul do Brasil**. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1992. 346p. il.

CAMPBELL, C.A.; BIEDERBECK, V.O.; ZENTNER, R.P.; LAFOND, G.P. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. **Canadian Journal of Soil Science**, Edmonton, v.71, n.3, p.363-376, 1991.

CAPRA, F. **A Teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos**. São Paulo: Cultrix, 1996.256p.

CARTER, M.R. Microbial biomass as an index for tillage-induced changes in soil biological properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.7, n.1-2, p.29-40, 1986.

CARTER, M.R. The influence of tillage on the proportion of organic carbon and nitrogen in the microbial biomass of medium-textured soils in a humid climate. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.11, n.1, p.135-139, 1991.

CASTELLANO, S.D.; DICK, R.P. Cropping and sulfur fertilization influence on sulfur transformations in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.54, n.1, p.114-121, 1990.

CASTELLANO, S.D.; DICK, R.P. Influence of cropping and sulfur fertilization on transformations of sulfur in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, n.1, p.283-285, 1991.

CASTILLO, X.; JOERGENSEN, R.G. Impact of ecological and conventional arable management systems on chemical and biological soil quality indices in Nicaragua. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.33, n.12-13, p.1591-1597, 2001.

CATTELAN, A.J. **Sistemas de culturas e os microorganismos do solo**. 1989. 152f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

CATTELAN, A.J.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo, em função de variações ambientais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, n. 1, p.133-142, 1990.

CHAER, G.M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microrbiológicos**. 2001. 116f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Microbiologia Agrícola, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

CHANDER, K.; BROOKES, P.C. Microbial biomass dynamics during the decomposition of glucose and maize in metal-contaminated and non-contaminated soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.23, n.10, p.917-925, 1991a.

CHANDER, K.; BROOKES, P.C. Effects of heavy metals from past application of sewage sludge on microbial biomass and organic matter accumulation in a sandy loam and a silty loam U.K. soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.23, n.10, p.927-932, 1991b.

CHANDER, K.; BROOKES, P.C. Residual effects of zinc, copper, and nickel in sewage sludge on microbial biomass in a sandy loam. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.25, n.9, p.1231-1239, 1993.

CHAVARRIA-CARVAJAL, J.A.; RODRIGUEZ-KABANA, R. Changes in soil enzymatic activity and control of *Meloidogyne incognita* using four organic amendments. **Nematropica**, Auburn, v.28, n.1, p.7-18, 1998.

COCHRAN, V.L.; ELLIOTT, L.F.; LEWIS, C.E. Soil microbial biomass and enzyme activity in subarctic agricultural and forest soils. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.7, n.3, p.283-288, 1989.

CONRAD, R.; WEBER, M.; SEILER, W. Kinetics and electron transport of soil hydrogenases catalyzing the oxidation of atmospheric hydrogen. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.15, n.2, p.167-176, 1983.

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.925-930, 2002.

CORRÊA, A. **Prejuízos com as perdas de solos nas áreas agrícolas**. Embrapa Solos – Coluna do Conservacionismo. Disponível em: http://www.cnps.embrapa.br/scarch/plancts/coluna14/coluna_14.html. Acesso em: 2000.

CORREIA, M.E.F.; ANDRADE, A.G. Formação de serrapilheira e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A. de O. (eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo : ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.197-225.

DALAL, R.C.; MAYER, R.J. Long term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.24, n.2, p.281-292, 1986.

DAVID, M.B.; MITCHELL, M.J.; NAKAS, J.P. Organic and inorganic sulfur constituents of a forest soil and their relationship to microbial activity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, n.4, p.847-852, 1982.

DEBOSZ, K.; RASMUNSEN, P.H.; PEDERSEN, A.R. Temporal variations in microbial biomass C and celullolytic enzyme activity in arable soils: effects of organic matter input. **Applied Soil Ecology**, v.13, n.3, p.209-218, 1999.

DEGENS, B.P.; SCHIPPER, L.A.; SPARLING, G.P.; DUNCAN, L.C. Is the microbial community in a soil with reduced catabolic diversity less resistant to stress or disturbance? **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.33, n.9, p.1143-1153, 2001.

DELUCA, T.H. Conventional row crop agriculture: putting America's soils on a white bread diet. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.5, n.3, p.262-263, 1995.

DE-POLLI, H.; GUERRA, J.G.M. Biomassa microbiana: perspectivas para o uso e manejo do solo. In: ALVAREZ, V.H.V.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F. (eds.) **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa : SBCS. UFV. DPS, 1996. p.551-564.

- DICK, R.P. A review: long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbiological parameters. **Agricultural Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.40, n.1, p.25-36, 1992.
- DICK, R.P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In: DORAN, J.W. et al. (eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA: ASA, 1994. p.107-124. (SSSA Special Publication, 35).
- DICK, R.P.; RASMUNSEN, P.E.; KERLE, E.A. Influence of long-term residue management on soil enzyme activities in relation to soil chemical properties of a wheat-fallow system. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.24, n.1, p.159-164, 1988.
- DICK, R.P.; BREACKWELL, D.P.; TURCO, R.F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (eds.) **Methods for assessing soil quality**. Madison: SSSA, 1996. p.247-271. (SSSA Special Publication, 49).
- DICK, W.A. Influence of long-term tillage and crop rotation combinations on soil enzyme activities. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, n.3, p.569-574, 1984.
- DICK, W.A.; TABATABAI, M.A. Activation of soil pyrophosphatase by metal ions. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.15, n.1, p.59-63, 1983.
- DICK, W.A.; TABATABAI, M.A. Kinetic parameters of phosphatases in soils and organic waste materials. **Soil Science**, Madison, v.137, n.1, p.7-15, 1984.
- DICK, W.A.; TABATABAI, M.A. Significance and potential uses of soil enzymes. In: METTING, F.B. (ed.) **Soil Microbial Ecology**, New York: Marcel Dekker, 1992. p.95-127.
- DICK, W.A.; TABATABAI, M.A. **Bioremediation of contaminated soils**. Madison: American Society of Agronomy: Crop Science Society of America: Soil Science Society of America, 1999. p.315-338. (Agronomy monograph, 37).
- DODD, J.C.; BURTON, C.C.; BURNS, R.G.; JEFFRIES, P. Phosphatases activity associated with the roots and the rhizosphere of plants infected with vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, Cambridge, v.107, p.163-172, 1987.
- DOMSCH, K.H.; JAGNOW, G.; ANDERSON, T.H. An ecological concept for the assessment of side-effects of agrochemicals on soil microorganisms. **Residue Reviews**, New York, v.86, n.1, p.65-105, 1983.
- DORAN, J.W. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.4, p.765-771, 1980.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W. et al. (eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA: ASA, 1994. p.3-21. (SSSA Special Publication, 35).
- DORAN, J.W.; SARRANTONIO, M.; JAURE, R. Strategies to promote soil quality and health. In: PANKHURST, C.E.; DOUBE, B.M.; GUPTA, V.V.S.R.; GRACE, P.R. (eds.) **Soil biota: management in sustainable farming systems**. Melbourne: CSIRO, 1994. p.230-237.

DORAN, J.W.; ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.15, n.1, p.3-11, 2000.

DORMAAR, J.F. Chemical properties of soil and water-stable aggregates after sixty-seven years of cropping to spring wheat. **Plant and Soil**, The Hague, v.75, n.1, p.51-61, 1983.

DUXBURY, J.M.; NKAMBULE, S.V. Assessment and significance of biologically active soil organic nitrogen. In: DORAN, J.W. et al. (eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA: ASA, 1994. p.125-146. (SSSA Special Publication, 35).

EHLERS, E. **Agricultura sustentável: origens e perspectivas de um novo paradigma**. 2. ed. Guaíba: Agropecuária, 1999. 157 p.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M.A. Phosphatases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.9, n.3, p.167-172, 1977.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 1999. 412p.il.

FARREL, E.R.; GUPTA, V.V.S.R.; GERMIDA, J.J. Effects of cultivation on the activity and kinetics of arylsulfatase in Saskatchewan soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.26, n.8, p.1033-1040, 1994.

FAUCI, M.F.; DICK, R.P. Microbial Biomass as an indicator of soil quality: effects of long-term management and recent soil amendments. In: DORAN, J.W. et al. (eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA: ASA, 1994. p.229-234. (SSSA Special Publication, 35).

FERNANDES, M.F.; FERNANDES, R.P.M.; ANJOS, J.L.; SOBRAL, L.F.; ARAÚJO, A.S. Efeito da saturação por bases sobre a atividade de fosfatases em um solo de tabuleiro costeiro cultivado com citros. II. Constantes cinéticas das enzimas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.403-409, 1998.

FRANKENBERGER Jr., W.T.; TABATABAI, M.A. Amidase activity in soils: I. Method of assay. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.1, p.282-287, 1980.

FRANKENBERGER Jr., W.T.; TABATABAI, M.A. Amidase activity in soils: III. Stability and distribution. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.45, n.2, p.333-338, 1981.

FRANKENBERGER, W.T.Jr.; TABATABAI, M.A. Characteristics of an amidase isolated from a soil bacterium. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.17, n.3, p.303-308, 1985.

FRANKENBERGER Jr., W.T.; TABATABAI, M.A. Amidase activity in soils. In: ALEF, K.; NANNIPIERI, P.(eds.) **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. London: Academic Press, 1995. p.321-324.

FRANKLIN, J.F. Preserving biodiversity: species, ecosystems, or landscapes? **Ecological Applications**, Tempe, v.3, n.2, p.202-205, 1993.

FREEMAN, C.; NEVISON, G.B.; HUGHES, S.; REYNOLDS, B.; HUDSON, J. Enzymic involvement in the biogeochemical responses of a Welsh peatland to a rainfall enhancement manipulation. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.27, n.2, p.173-178, 1998.

GAMA-RODRIGUES, E.F. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A. de O. (eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo** : ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Gênese, 1999. p.227-243.

GAMA-RODRIGUES, E.F.; DE-POLLI, H. Biomassa na ciclagem de nutrientes. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 14, 2000, Santa Maria. **Resumos Expandidos ...** Santa Maria: SBCS, 2000. CD-ROM.

GARCÍA, C.; HERNÁNDEZ, T.; ROLDAN, A.; ALBALADEJO, J. Biological and biochemical quality of a semiarid soil after induced devegetation. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.26, n.4, p.1116-1122, 1997a.

GARCÍA, C.; ROLDAN, A.; HERNÁNDEZ, T. Changes in microbial activity after abandonment of cultivation in a semiarid mediterranean environment. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.26, n.1, p.285-291, 1997b.

GARCIA, C.; HERNANDEZ, T.; ROLDAN, A.; MARTIN, A. Effect of plant cover decline on chemical and microbiological parameters under Mediterranean climate. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.34, n.5, p.635-642, 2002.

GERENDÁS, J.; SATTELMACHER, B. Significance of N source (urea vs. NH_4NO_3) and Ni supply for growth, urease activity and nitrogen metabolism of zucchini (*Cucurbita pepo* convar. *giromontina*). **Plant and Soil**, The Hague, v.196, n.2, p.217-222, 1997.

GIANFREDA, L; BOLLAG, J-M. Influence of natural and antropogenic factors on enzyme activity in soil. In: STOTZKY, G.; BOLLAG, J.M. Eds. **Soil Biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1996. v.9, p.123-193.

GLOVER, J.D.; REGANOLD, J.P.; ANDREWS, P.K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. **Agricultural Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.80, n.1, p.29-45, 2000.

GOLDSTEIN, A.H.; DANON, A.; BAERTLEIN, D.A.; McDANIEL, R.G. Phosphate starvation inducible metabolism in *Lycopersicon esculentum*. II. Characterization of the phosphate starvation inducible excreted acid phosphatase. **Plant Physiology**, Lancaster, v.87, n.3, p.716-720, 1988.

GOMEZ, A.A.; KELLY, D.E.S.; SYERS, J.K.; COUGHLAND, K.J. Measuring sustainability of agriculture systems at the farm level. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madisson: SSSA, 1996. p.401-409 . (SSSA Special Publication, 49)

GREENLAND, D.J.; WILD, A.; ADAMS, D. Organic matter dynamics in soil of the tropics – from myth to complex reality. In: LAL, R; SANCHEZ, P.A. (Eds.) **Myths and science of soils of the tropics**. Madison: Soil Science Society of America, 1992. p.17-33. (Special Publication, 29)

GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; MONREAL, C.M.; ELLERT, B.H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.74, n.4, p.367-385, 1994.

GRIFFITH, D.R.; KLADIRKO, E.J.; MANNERING, J.V.; WEST, T.D.; PARSONS, S.D. Long-term tillage and rotation effects on corn growth and yield on hig and low organic matter, poorly drained soil. **Agronomy Journal**, Madison, v.80, n.4, p.599-605, 1988.

GUPTA, V.V.S.R.; GERMIDA, J.J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.20, n.6, p.777-786, 1988.

HARRISON, A.F. Relations between intensity of phosphatase activity and physico-chemical properties in woodland soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.15, n.1, p.93-99, 1983.

HARTER, R.D.; STOTZKY, G. Formation of clay-protein complexes. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.35, n.3, p.383-398, 1971.

HAYANO, K.; TUBAKI, K. Origin and properties of β -glucosidase activity of tomato-field soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.17, n.4, p.553-557, 1985.

HAYNES, R.J.; SWIFT, R.S. Effect of lime and phosphate addition on changes in enzyme activities, microbial biomass and levels of extractable nitrogen, sulfur and phosphorus in an acid soil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.6, n.1, p.153-158, 1988.

HAYNES, R.J.; SWIFT, R.S. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. **Journal of Soil Science**, London, v.41, n.1, p.73-83, 1990.

INSAM, H. Are the soil microbial biomass and basal respiration governed by the climatic regime? **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.22, n.4, p.525-532, 1990.

INSAM, H.; PARKINSON, D.; DOMSCH, K.H. Influence of macroclimate on soil microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.21, n.2, p.211-221, 1989.

ISLAM, K.R.; WEILL, R.R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agricultural Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.79, n.1, p.9-16, 2000.

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.

JENKINSON, D.S.; POWLSON, D.S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil – V.A method for measuring soil biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.11, n.3, p.193-199, 1976.

JOHNSON, D.L.; AMBROSE, S.H. BASSET, T.J. et al. Meaning of environmental terms. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.26, n.2, p.581-589, 1997.

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F.; SCHMAN, G.E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.1, p.4-10, 1997.

KANDELER, E.; PAULI, S.; STEMMER, M.; GERZABEK, M.H. Tillage changes microbial biomass and enzyme activities in particle-size fractions of a haplic Chernozem. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.31, n.12, p.1253-1264, 1999a.

KANDELER, E.; STEMMER, M.; KLIMANEK, E.M. Response of soil microbial biomass, urease and xylanase within particle size fractions to

long-term management. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.31, n.2, p.261-273, 1999b.

KANDELER, E.; TSCHERKO, D.; SPIEGEL, H. Long-term monitoring of microbial biomass, N mineralization and enzyme activities of a Chernozem under different tillage management. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.28, n.3, p.343-351, 1999c.

KENNEDY, A.C.; PAPENDICK, R.I. Microbial characteristics of soil quality. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.50, n.3, p.243-248, 1995.

KENNEDY, A.C.; SMITH, K.L. Soil microbial diversity and the sustainability of agricultural soils. **Plant and Soil**, The Hague, v.170, n.1, p.75-86, 1995.

KHAN, S.U. Enzymatic activity in a gray wooded soil as influenced by cropping systems and fertilizers. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.2, n.2, p.137-139, 1970.

KHATOUNIAN, C.A. **Produção de alimentos para consumo doméstico no Paraná: caracterização e culturas alternativas**. Londrina: IAPAR, 1994. 193p. il. (IAPAR. Circular, 81)

KING, G.M.; KLUG, M.J. Sulfohydrolase activity in sediment of Wistergreen lake, Kalamazoo Country, Michigan. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v.29, p.950-956, 1980.

KIRCHNER, M.J.; WOLLUM II, A.G.; KING, L.D. Soil microbial populations and activities in reduced chemical input agroecosystems. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.57, n.1, p.1289-1295, 1993.

KISS, S. DRAGAN-BULARDA, M.; RADULESCU, D. Biological significance of enzymes accumulated in soil. **Advances in Agronomy**, New York, v.27, p.25-87, 1975.

KLEIN, T.M.; KOTHS, J.S. Urease, protease and acid phosphatase in soil continuously cropped to corn by conventional or no-tillage methods. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.12, n.7, p.765-771, 1980.

KLOSE, S.; TABATABAI, M.A. Arylsulfatase activity of microbial biomass in soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.63, n.3, p.569-574, 1999.

KULINSKA, D.; CAMARGO, V.L.L.; DROZDOWICZ, A. Enzyme activities in "Cerrado" soils in Brazil. **Pedobiologia**, Jena, v.24, n.1, p.101-107., 1982.

KUPERMAN, R.G.; CARREIRO, M.M. Soil heavy metal concentrations, microbial biomass and enzyme activities in a contaminated grassland ecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.29, n.2, p.179-190, 1997.

LADD, J.N.; BUTLER, J.H. Humus-enzyme systems and synthetic, organic polymer-enzyme analogs, In: PAUL, E.A.; McLAREN, A.D. (eds.). **Soil biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1975. v.4, p.143-194.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. the dynamic of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.37-51. (Special Publication, 35)

LEIRÓS, M.C.; TRASAR-CEPEDA, C.; SEOANE, S.; GIL-SOTRES, F. Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic oakwood) in na area of the European temperate-humic zone (Galicia, NW Spain): general parameters. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.32, n.7, p.733-745, 2000.

LOVELL, R.D.; JARVIS, S.C.; BARDGETT, R.D. Soil microbial biomass and activity in long-term grassland: effects of management changes. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.27, n. 7, p.969-975, 1995.

LOVELOCK, J. E. **Gaia: a new look at life on earth**. New York: Oxford University Press, 1979.

MARGULIS, L. **O planeta simbiótico: uma nova perspectiva da evolução**. Rio de Janeiro: Rocco, 2001. 137p.

MARTENS, D.A.; JOHANSON, J.B. FRANKENBERGER, W.T.Jr. Production and persistence of soil enzymes with repeated addition of organic residues. **Soil Science**, Baltimore, v.153, n.1, p.53-61, 1992.

MARY, B.; RECOUS, S.; DARWIS, D.; ROBIN, D. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. **Plant and Soil**, The Hague, v.181, n.1, p.71-82, 1996.

MATURANA, H.R.; VARELA, F.G. **A árvore do conhecimento: as bases biológicas do entendimento humano**. Campinas : Psy II, 1995. 281p.il.

MEDEIROS, J.C. **Sistemas de culturas adaptados a produtividade, recuperação e conservação do solo**. 1985. 89f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

MELE, P.M.; CARTER, M.R. Effect of climatic factors on the use of microbial biomass as an indicator of changes in soil organic matter. In: MULONGOY, K.; MERCKX, R. (Eds.) **Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture**. New York: John Wiley & Sons, 1993. p.57-64.

MENDES, I.C.; CARNEIRO, R.G.; CARVALHO, A.M.; VIVALDI, L.; VARGAS, M.A.T. **Biomassa-C e atividade microbiana em solos de cerrado sob plantio direto e plantio convencional**. Planaltina : Embrapa Cerrados, 1999. 5p. (Embrapa Cerrados. Pesquisa em Andamento, 5).

MENDES, I.C.; VIVALDI, L.A. Dinâmica da biomassa e atividade microbiana em uma área sob Mata de Galeria na região do Distrito Federal. In: RIBEIRO, J.F.; FONSECA, C.E.L.; SOUZA-SILVA, J.C. (eds.). **Cerrado: caracterização e recuperação de matas de galeria**. Planaltina : Embrapa Cerrados, 2001. p.665-687.

MENGEL, K. Turnover of nitrogen in soil and its availability to crops. **Plant and Soil**, The Hague, v.181, n.1, p.83-93, 1996.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre : Gênese, 1999. p.1-8.

MONREAL, C.M.; BERGSTROM, D.W. Soil enzymatic factors expressing the influence of land use, tillage system and texture on soil biochemical

quality. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.80, n.3, p.419-428, 2000.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras : UFLA, 2002. 626 p.: il.

MULLEN, M.D.; MELHORN, C.G.; TYLER, D.D.; DUCK, B.N. Biological and biochemical soil properties in no-till corn with different cover crops. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.53, n.3, p.219-224, 1998.

MURAGE, E.W.; KARANJA, N.K.; SMITHSON, P.C.; WOOMER, P.L. Diagnostic indicators of soil quality in productive and non-productive smallholders' field of Kenya's Central Highlands. **Agricultural Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.79, n.1, p.1-8, 2000.

NAHAS, E.; CENTURION, J.F.; ASSIS, L.C. Efeito das características químicas dos solos sobre os microrganismos solubilizadores de fosfato e produtores de fosfatases. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.18, n.1, p.49-53, 1994.

NANNIPIERI, P.; JOHNSON, L.R.; PAUL, E.A. Criteria for measurement of microbial growth and activity in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.10, n.3, p.223-229, 1978.

NANNIPIERI, P.; GRECO, S.; CECCANTI, B. Ecological significance of the biological activity on soil. In: STOTZKY, G.; BOLLAG, J.-M. (eds.) **Soil biochemistry**. New York : Marcel Dekker, 1990. v.6, p.79-122.

NASEBY, D.C.; LYNCH, J.M. Rhizosphere soil enzymes as indicators of perturbations caused by enzyme substrate addition and inoculation of a genetically modified strain of *Pseudomonas fluorescens* on wheat seed. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.29, n. 9-10, p.1353-1362, 1997.

NEAL, J.L.Jr. Influence of selected grasses and forbs on soil phosphatase activity. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.53, n.1, p.119-121, 1973.

OLDERMAN, L.R. The global extent of soil degradation. In: Greenland, D.J.; Szabolcs, I. (eds.) **Soil resilience and sustainable land use**. Wallingford: CAB International, 1994. p.99-118.

PALADINI, F.L.S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.15, n.2, p.135-140, 1991.

PANCHOLY, S.K.; RICE, E. Soil enzymes in relation to old field succession: amilase, celulase, invertase, dehydrogenase, and urease. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.37, n.1, p.47-50, 1973.

PARKIN, T.B.; DORAN, J.W.; FRANCO-VIZCAÍNO, E. Field and laboratory tests of soil respiration. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J. (eds.) **Methods for assessing soil quality**. Madison: SSSA, 1996. p.231-245. (SSSA Special Publications, 49)

PARKINSON, D.; COLEMAN, D.C. Methods for assessing soil microbial populations, activity and biomass – Microbial communities, activity and biomass. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.34, n.1, p.3-33, 1991.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, n.5, p.1173-1179, 1987.

PASCUAL, J.A.; GARCIA, C.; HERNANDEZ, T.; MORENO, J.L.; ROS, M. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.32, n.12, p.1877-1883, 2000.

PAUL, E.A. Dynamics of organic matter in soils. **Plant and Soil**, The Hague, v.76, n.2, p.275-285, 1984.

PAUL, E.A.; CLARK, F.E. **Soil microbiology and biochemistry**. San Diego: Academic Press, 1996. 340p.

PAUSTIAN, K.; PARTON, W.J.; PERSSON, J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen fertilized long-term plots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, n.2, p.476-488, 1992.

PAVINATO, A. **Teores de carbono e nitrogênio do solo e produtividade de milho afetados por sistemas de culturas**. 1993. 122f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

PEDRAZZINI, F.R.; McKEE, K.L. Effect of flooding on activities of soil dehydrogenases and alcohol dehydrogenase in rice (*Oryza sativa* L.) roots. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.30, n.4, p.359-366.

PETERJOHN, W.T. Denitrification: enzyme content and activity in desert soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.23, n.9, p.845-855, 1991.

POWLSON, D.S.; BROOKES, P.C. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.19, n.2, p.159-164, 1987.

PRICE, W.P. An overview of organismal interactions in ecosystems in evolutionary and ecological time. **Agricultural Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.2, n.4, p.369-377, 1988.

PRIGOGINE, I. **O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza**. São Paulo: UNESP, 1996. 199p.

PULFORD, I.D.; TABATABAI, M.A. Effect of waterlogging on enzyme activities in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.20, n.2, p.215-219, 1988.

RASTIN, N.; ROSENPLANTER, K.; HUTTERMANN, A. Seasonal variation of enzyme activity and their dependence on certain soil factors in a beech forest soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.20, n.5, p.637-642, 1988.

RICE, C.W.; MOORMAN, T.B.; BEARE, M. Role of microbial biomass carbon and nitrogen in soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (eds.) **Methods for assessing soil quality**. Madison: SSSA, 1996. p.203-215. (SSSA Special Publications, 49)

ROBERTSON, E.B.; SARIG, S.; FIRESTONE, M.K. Cover crop management of polysaccharide-mediated aggregation in an orchard soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.55, n.3, p.734-739, 1991.

ROSS, D.J.; HUTT, L.; ROBERTS, H.S. Biochemical activities in a soil profile under hard beech forest. 1. Invertase and amylase activities and

relationships with other properties. **New Zealand Journal of Science**, Wellington, v.16, n.2, p.209-224, 1973.

ROSS, D.J. Studies on a climosequence of soils in tussock grasslands. 5. Invertase and amylase activities of topsoils and their relationships with other properties. **New Zealand Journal of Science**, Wellington, v.18, n.5, p.511-518, 1975.

ROSADO, A.S.; DUARTE, G.F.; SELDIN, L.; VAN ELSAS, J.D. Molecular microbial ecology: a minireview. **Revista de Microbiologia**, São Paulo, v.28, n.1, p.135-147, 1997.

ROSADO, A.S. Diversidade microbiana e qualidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28, Brasília, 1999. **Resumos Expandidos ...** Rio de Janeiro: SBCS, 1999. CD-ROM

ROVIRA, A.D. Microbiology of pasture soil and some effects of microorganisms on pasture plants. In: WILSON, J. R. (ed.) **Plant relations in pastures**. Melbourne: CSIRO, 1978. p.95-110.

RUGGIERO, P.; DEC, J.; BOLLAG, J.-M. Soil as a catalytic system. In: STOTZKY, G.; BOLLAG, J.-M. (eds.) **Soil biochemistry**. New York : Marcel Dekker, 1996. v.9, p.79-122.

SALINAS-GARCIA, J.R.; HONS, F.M.; MATOCHA, J.E. Long-term effects of tillage and fertilization on soil organic matter dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.1, p.152-159, 1997.

SANTANA, D.P.; BAHIA FILHO, A.F.C. Indicadores de qualidade do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28, Brasília, 1999. **Resumos Expandidos ...** Rio de Janeiro: SBCS, 1999. CD-ROM

SATCHELL, J.E.; MARTIN, K. Phosphatase activity in earthworm faeces. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.16, n.2, p.191-194, 1984.

SCHÄFFER, A. Pesticide effects on enzyme activities in the soil ecosystem. In: BOLLAG, J.M.; STOTZKY, G. (eds.) **Soil Biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1994. v.8, p.273-340.

SELBACH, P. A. **Optimization of a DNA extraction procedure for phylogenetic probe analysis of soil microbial communities**. Wisconsin : Graduate School, 1998. 127 f. Dissertation (Doctor of Philosophy). Graduate School, University of Wisconsin, Wisconsin, 1998.

SILVA, I.F. **Formação, estabilidade e qualidade de agregados do solo afetados pelo uso agrícola**. 1993. 126f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.1, p.313-319, 1997.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.2, p.311-317, 1998.

SINSABAUGH, R.L.; MOORHEAD, D.L. Resource allocation to extracellular enzyme production: a model for nitrogen and phosphorus control of litter decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.26, n.10, p.1305-1311, 1994.

SKOPP, J. LAWSON, M.D.; DORAN, J.W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.54, n.6, p.1619-1625, 1990.

SPARLING, G.P.; EILAND, F. A comparison of methods for measuring ATP and microbial biomass in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.15, n.2, p.227-229, 1983.

SPEIR, T.W.; LEE, R.; PANSIER, E.A.; CAIRNS, A. A comparison of sulphatase, urease and protease activities in planted and in fallow soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.12, n.3, p.281-291, 1980.

SPEIR, T.W.; ROSS, D.J. Temporal stability of enzymes in a peatland soil profile. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.22, n.7, p.1003-1005, 1990.

STABEN, M.L.; BEZDICEK, D.F.; SMITH, J.L.; FAUCI, M.F. Assessment of soil quality in conservation reserve program and wheat-fallow soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.1, p.124-130, 1997.

STAMATIADIS, S.; DORAN, J.W.; KETTLER, T. Field and laboratory evaluation of soil quality changes resulting from injection of liquid sewage sludge. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.12, n.3, p.263-272, 1999a.

STAMATIADIS, J.W.; WERNER, M.; BUCHANAN, M. Field assessment of soil quality as affected by compost and fertilizer application in a broccoli field (San Benito County, California). **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.12, n.3, p.217-225, 1999b.

STENBERG, B. Monitoring soil quality of arable land: microbial indicators. **Soil and Plant Science**, Copenhagen, v.49, n.1, p.1-24, 1999.

STEWART, J.W.B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biochemistry**, Washington, v.4, n.1, p.41-60, 1987.

STOTZKY, G. Microbial respiration. In: BLACK, C.A. (ed.) **Methods of Soil Analysis**. Madison: ASA, 1965. v.2, cap.113, p.1550-1572,

SWIFT, M.J. Soil fertility, plant nutrition and soil biology relationships: consolidating a paradigm. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 13, Caxambú, 1998. **Resumos...** Caxambú : Universidade Federal de Lavras, 1998. p.11.

TABATABAI, M.A. Effects of trace elements on urease activity in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.9., n.1, p.9-13, 1977.

TABATABAI, M.A. Soil enzymes. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Eds.) **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: ASA, 1982. p.903-943, (Agronomy, 9)

TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. Arylsulfatase activity of soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Ann Arbor, v.34, n.2, p.225-229, 1970.

TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. Assay of urease activity in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.4., n.4, p.479-487, 1972.

TABATABAI, M.A.; FU, M. Extraction of enzymes from soils. In: STOTZKY, G.; BOLLAG, J.-M. (eds.) **Soil biochemistry**. New York : Marcel Dekker, 1992. v.7, p.197-227.

TADANO, T.; OZOWA, K.; SATAI, M.; OSAKI, M. MATSUI, H. Secretion of acid phosphatase by the roots of crop plants under phosphorus-deficient

conditions and some properties of the enzyme secreted by lupine roots. **Plant and Soil**, The Hague, v.155-156, n.1, p.95-98, 1993.

TARAFDAR, J.C.; JUNGK, A. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.3, n.2, p.199-204, 1987.

TATE, K.R.; ROSS, D.J.; FELTHAM, C.W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: Effects of experimental variables and some different calibration procedures. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.20, n.3, p.329-335, 1988.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, J.S. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre : Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia, UFRGS, 1995. 174p.(Boletim Técnico de Solos, 5).

TEIXEIRA, L.A.J. **Fornecimento de nitrogênio ao milho por sistemas de culturas**. 1988. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

TESTA, V.M. **Características químicas de um Podzólico Vermelho-escuro, nutrição e rendimento do milho afetados por sistemas de culturas**. 1989. 134f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

TIEDJE, J.M.; CHO, J.; MURRAY, A.; TREVES, D.; XIA, B.; ZHOU, J. Soil teeming with life: new frontiers for soil science. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 14, 2000, Santa Maria. **Resumos Expandidos ...** Santa Maria : SBCS, 2000. CD-ROM

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, London, v.33, n.2, p.141-163, 1982.

TRASAR-CEPEDA, C.; GIL-SOTRES, F. Phosphatase activity in acid high organic matter soils in Galicia (NW Spain). **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.19, n.3, p.281-287, 1987.

TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, C.; GIL-SOTRES, F.; SEOANE, S. Towards a biochemical quality index for soils: an expression relating several biological and biochemical properties. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.26, n.2, p.100-106, 1998.

TURCO, R.F.; BLUME, E. Indicators of soil quality. In: SIQUEIRA, J.O. [et al.] (eds.) **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas. Soil fertility, soil biology, and nutrition interrelationships**. Viçosa : SBCS; Lavras : UFLA/DCS, 1999. p.529-550.

TURCO, R.F.; KENNEDY, A.C.; JAWSON, M.D. Microbial indicators of soil quality. In: DORAN, J.W. et al. (eds) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA: ASA, 1994. p.73-90. (SSSA Special Publication, 35).

TURNER, B.L.; HOPKINS, D.W.; HAYGARTH, P.M.; OSTLE, N. β - Glucosidase activity in pasture soils. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.20, n.2, p.157-162, 2002.

- VANCE, E.D.; BROOKES, P.C; JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.19, n.6, p.703-707, 1987.
- VARGAS, L.K.; SCHOLLES, D. Biomassa microbiana e produção de C-CO₂ e N mineral de um Podzólico Vermelho-Escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.1, p.35-42, 2000.
- VARGAS, L.K. **Composição da comunidade microbiana do solo e sua relação com a disponibilidade de nitrogênio para a cultura do milho**. 2002. 103f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- VEPSÄLÄINEN, M.; KUKKONEN, S.; VESTBERG, M.; SIRVIÖ, H.; NIEMI, R.M. Application of soil enzyme activity test kit in a field experiment. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.33, n.12-13, p.1665-1672, 2001.
- VERSTRAETE, W.; VOETS, J.P. Soil microbial and biochemical characteristics in relation to soil management and fertility. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.19, n.4, p.251-258, 1977.
- VEZZANI, F.M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- VORONEY,R.P.; PAUL, E.A. Determination of k_c and k_n in situ for calibration of the chloroform fumigation-incubation method. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.16, n.1, p.9-14, 1984.
- WICK, B.; KÜHNE, R.F.; VLEK, P.L.G. Soil microbiological parameters as indicators of soil quality under improved fallow management systems in south-western Nigeria. **Plant and Soil**, The Hague, v.202, n.1, p.97-107, 1998.
- WICK, B.; TIESSEN, H.; MENEZES, R.S.C. Land quality changes following the conversion of the natural vegetation into silvo-pastoral systems in semi-arid NE Brazil. **Plant and Soil**, The Hague, v.222, n. 1-2, p.59-70, 2000.

8. APÊNDICES

APÊNDICE 01. Biomassa microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho

distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000-2001).

Tratamentos	Biomassa Microbiana										
	(mg de C-CO ₂ kg ⁻¹ solo seco)										
	Meses										
	Set/00**	Out/00**	Nov/00**	Dez/00**	Jan/01*	Fev/01**	Mar/01**	Abr/01**	Mai/01**	Jun/01**	Jul/01**
SD⁽¹⁾	169 c*	330 c	333 b	263 c	326 b	240 c	237 c	289 d	203 d	285 d	187 d
P/M	210 c	352 bc	313 b	261 c	362 b	325 bc	311 bc	343 d	229 d	292 d	222 d
A/M	286 b	410 bc	331 b	314 bc	393 b	448 abc	368 bc	381 cd	271 cd	320 cd	258 d
P/M+L	276 b	453 b	357 b	351 b	405 ab	422 abc	342 bc	476 bc	362 bc	452 b	333 d
A+V/M+C	326 b	469 b	391 ab	308 bc	438 ab	421 abc	427 ab	456 bc	328 bc	398 bc	366 d
G/G+M	315 b	428 bc	366 b	348 b	447 ab	462 ab	432 ab	483 b	362 b	424 b	390 d
CN	404 a	592a	452 a	474 a	553 a	646 a	537 a	841 a	510 a	603 a	557 d
Média	284	433	363	331	418	420	379	467	324	396	329
CV(%)	12,23	10,05	8,36	8,43	13,8	20,9	14,9	8,0	9,7	9,8	10,0

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

APÊNDICE 02. Respiração microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000-2001).

Tratamentos	Respiração Microbiana										
	(mg de C-CO ₂ kg ⁻¹ solo seco)										
	Meses										
	Set/00**	Out/00	Nov/00	Dez/00	Jan/01	Fev/01 ^{NS}	Mar/01**	Abr/01**	Mai/01**	Jun/01**	Jul/01**

SD ⁽¹⁾	49 d	60 d	71 c	49 d	66 d	119	109 c	54 d	47 c	55 d	17
P/M	55 d	76 cd	69 c	75 cd	106 c	126	94 c	69 cd	60 c	65 cd	46
A/M	96 bc	100 bcd	126 bc	99 bcd	120 c	120	97 c	79 bcd	69 c	74 cd	35
P/M+L	103 bc	131 bc	123 bc	121 bc	152 b	230	195 ab	140 b	136 ab	140 ab	61
A+V/M+C	79 cd	135 b	132 bc	153 ab	144 b	216	140 bc	117 bc	109 b	103 bc	81
G/G+M	127 ab	154 ab	157 b	122 bc	161 b	242	178 b	141 b	129 ab	102 bc	67
CN	161 a	207 a	226 a	201 a	194 a	283	243 a	211 a	169 a	173 a	115
Média	96	123	129	116	135	191	151	116	103	102	60
CV(%)	21,5	17,2	18,1	19,6	7,2	34,8	15,0	19,7	15,1	15,6	21,

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

NS: não significativo

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

APÊNDICE 03. Atividade da β -glucosidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001), medida pela liberação de ρ -nitrofenol em uma unidade de tempo.

Tratamentos	Atividade da β -glucosidase (μ g ρ -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1})							
	Meses							Média Anual
	Set/00**	Out/00**	Dez/00**	Fev/01**	Abr/01**	Jun/01**	Ago/01**	
SD ⁽¹⁾	74 d	71 c	75 f	76 c	47 b	68 d	49 c	66
P/M	81d	89 c	114 e	95 c	71 b	77 cd	71 bc	85
A/M	105 cd	97 c	129 de	114 c	77 b	89 cd	75 abc	98
P/M+L	167 a	170 a	209 a	238 a	140 a	189 a	157 a	181
A+V/M+C	113 c	135 b	154 cd	154 b	119 a	113 bc	135 ab	132
G/M+G	144 ab	146 ab	174 bc	165 b	117 a	108 bcd	121abc	139
CN	122 bc	133 b	200ab	172 b	140 a	132 b	151 ab	150

Médias	115	120	151	145	102	111	108	122
CV(%)	14,5	11,6	11,5	14,6	18,5	14,1	28,4	-

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

APÊNDICE 04. Atividade da urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001), medida pela liberação de N-NH₄ em uma unidade de tempo.

Tratamentos	Atividade da Urease						
	(μ g N-NH₄ g⁻¹ solo 2h⁻¹)						
	Meses						Média Anual
Out/00**	Dez/00**	Fev/01**	Abr/01**	Jun/01**	Ago/01**		
SD⁽¹⁾	37 bc	36 e	47 d	34 b	32 b	35 b	37
P/M	31 c	40 de	56 d	35 b	34 b	36 b	39
A/M	40 bc	53 cd	66 cd	39 b	37 b	37 b	45
P/M+L	45 bc	70 b	89 b	52 b	52 b	49 b	60
A+V/M+C	51 b	68 bc	80 bc	51 b	50 b	47 b	58
G/M+G	53 b	61 bc	90 b	56 b	45 b	50 b	59
CN	101a	138 a	164 a	120 a	94 a	104a	120
Médias	51	67	85	55	49	51	60
CV(%)	12,7	8,9	8,7	16,3	16,3	21,7	-

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

APÊNDICE 05. Atividade da amidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001), medida pela liberação de N-NH₄ em uma unidade de tempo.

Tratamentos	Atividade da Amidase
	(μ g N-NH₄ g⁻¹ solo 2h⁻¹)

	Meses							Média Anual
	Set/00**	Out/00**	Dez/00**	Fev/01**	Abr/01**	Jun/01**	Ago/01**	
SD⁽¹⁾	179 c	171 c	146 c	200 c	205 b	197 cd	148 c	178
P/M	178 c	170 c	136 c	181 c	162 b	183 cd	188 bc	171
A/M	190 c	199 bc	161 c	195 c	187 b	163 d	170 bc	181
P/M+L	245 b	261 b	236 b	269 b	226 b	279 b	232 bc	250
A+V/M+C	254 b	228 bc	231 b	264 b	246 b	281 b	206 bc	244
G/M+G	279ab	267 b	244 b	277 b	253 b	251 bc	256 b	261
CN	318a	355a	372a	363a	370a	362a	372a	359
Médias	235	115	120	151	145	102	111	108
CV(%)	9,4	12,7	9,1	6,1	14,2	12,4	17,2	-

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vicia no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo

APÊNDICE 06. Atividade da fosfatase ácida na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001), medida pela liberação de ρ - nitrofenol em uma unidade de tempo.

Tratamentos	Atividade da Fosfatase ácida							Média Anual
	$(\mu \text{ g } \rho \text{-nitrofenol g}^{-1} \text{ solo h}^{-1})$							
	Meses							
	Set/00**	Out/00**	Dez/00**	Fev/01**	Abr/01**	Jun/01**	Ago/01**	
SD⁽¹⁾	327 c	296 f	249 e	316 e	262 c	368 d	264 d	297
P/M	351 c	344 ef	321 de	372 de	335 bc	390 d	293 cd	344
A/M	449 b	404 de	380 d	426 d	365 bc	450 cd	309 bcd	398
P/M+L	480 b	490 cd	477 b	594 b	435 bc	579 bc	413 bc	495
A+V/M+C	455 b	518 c	450 c	510 c	446 b	513 bcd	429 bc	474
G/M+G	526 b	617 b	536 b	614 b	504 b	636 ab	440 b	553
CN	853 a	1072 a	1078 a	1058 a	918 a	749 a	752 a	925
Médias	492	535	499	556	466	526	414	498
CV(%)	8,6	6,7	9,7	6,0	14,3	11,7	12,3	-

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

APÊNDICE 07. Atividade da aril-sulfatase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001), medida pela liberação de ρ - nitrofenol em uma unidade de tempo.

Tratamentos	Atividade da Aril-sulfatase (μ g ρ -nitrofenol g^{-1} solo h^{-1})							
	Meses							Média Anual
	Set/00**	Out/00**	Dez/00**	Fev/01**	Abr/01**	Jun/01**	Ago/01**	
SD ⁽¹⁾	43 e	70 e	66 e	73 f	58 c	77 d	72 d	66
P/M	89 de	107 de	121 d	128 ef	121 bc	117 d	115 cd	114
A/M	110 cd	134 cd	150 cd	173 dc	126 bc	141 cd	150 cd	141
P/M+L	204 b	207 b	253 b	278 bc	222 b	314a	285 b	252
A+V/M+C	137 c	169 bc	197 c	209 cd	203 b	197 bc	210 bc	189
G/M+G	215 b	209 b	255 b	304ab	216 b	234 b	268 b	243
CN	299a	319a	376a	364a	388a	370a	412a	361
Médias	158	174	203	218	191	207	216	195
CV(%)	16,4	8,7	10,5	13,9	22,4	12,4	20,2	-

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

APÊNDICE 08. Coeficientes de correlação linear (r) entre os indicadores de fertilidade química, indicadores físicos e de produtividade e os indicadores biológicos de qualidade do solo testados.

	Biomassa Microbiana	Respiração Microbiana	β glucosidase -	Urease	Amidase	Fosfatase Ácida	Aril-sulfatase
pH	0,169 ^{NS (19)}	0,058 ^{NS (19)}	0,300 ^{NS (19)}	0,163 ^{NS (19)}	0,085 ^{NS (19)}	0,173 ^{NS (19)}	0,325 ^{NS (19)}
P	-0,363 ^{NS (19)}	-0,363 ^{NS (19)}	0,064 ^{NS (19)}	-0,541* (19)	-0,514 ^{NS (19)}	-0,446 ^{NS (19)}	-0,354 ^{NS (19)}
K	0,322 ^{NS (19)}	0,351 ^{NS (19)}	0,688** (19)	0,182 ^{NS (19)}	0,295 ^{NS (19)}	0,262 ^{NS (19)}	0,485 ^{NS (19)}
Umidade gravimétrica	0,555** (82)	0,428** (82)	0,468** (47)	0,568** (40)	0,560** (47)	0,535** (47)	0,643** (47)
Densidade do solo	- 0,276 ^{NS (5)}	- 0,216 ^{NS (5)}	0,086 ^{NS (5)}	- 0,179 ^{NS (5)}	- 0,256 ^{NS (5)}	- 0,274 ^{NS (5)}	- 0,200 ^{NS (5)}
Peso agreg. > 2mm	0,914** (16)	0,816** (16)	0,596* (16)	0,754** (16)	0,759** (16)	0,807** (16)	0,828** (16)
C adic. parte aérea	0,982** (4)	0,959** (4)	0,777 ^{NS (4)}	0,943* (4)	0,913* (4)	0,943* (4)	0,888* (4)
Rend. médio milho	0,951** (4)	0,991** (4)	0,887* (4)	0,982** (4)	0,989** (4)	0,978** (4)	0,952** (4)
Biomassa microb.	-	0,713** (82)	0,478** (47)	0,654** (40)	0,793** (47)	0,766** (47)	0,824** (47)
Respiração. microb.		-	0,685** (47)	0,849** (40)	0,748** (47)	0,746** (47)	0,730** (47)
Ativid. β-glucosidase			-	0,635** (40)	0,626** (47)	0,589** (47)	0,760** (47)
Ativid. Urease				-	0,846** (40)	0,896** (40)	0,820** (40)
Ativid. Amidase					-	0,908** (47)	0,899** (47)
Ativid. Fosfatase ác.						-	0,851** (47)
Ativid. Aril-sulfatase							-
C orgânico							
N total							

NS = não significativo.

* = significativo a um nível de confiança de 5%.

** = significativo a um nível de confiança de 1%.

() = Número de graus de liberdade usados na correlação, sendo GL = n - 2.

Observações :

- Os dados referentes ao C adicionado pela parte aérea em dez anos de cultivo foram retirados de Burle et al. (1997). O tratamento CN (campo nativo) não foi incluído.

- Os dados de rendimento médio de milho referem-se aos últimos seis anos, para os tratamentos de cultivo, e aos anos de 88/89, 93/94 e 95/96, para o tratamento SD (solo descoberto). O tratamento CN (campo nativo) não foi incluído, por nunca ter sido cultivado.

- Foram utilizados apenas os dados de análise de solo que apresentaram diferenças entre os tratamentos com significância superior a 1% (Apêndice 08).

APÊNDICE 09. Análises químicas da camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais. Média de três amostras compostas coletadas em 07/09/2000.

Tratamentos	pH (H ₂ O)	Índice SMP	P (mg L ⁻¹)	K (mmol _c L ⁻¹)	MO (%)	Al (cmol _c L ⁻¹)	Ca (cmol _c L ⁻¹)	Mg (cmol _c L ⁻¹)	Al+H (cmol _c L ⁻¹)	CT (cmol _c L ⁻¹)
SD ⁽¹⁾	4,8 bc**	5,7 b*	9 c**	117 c**	1,8 d**	0,2 ^{NS}	3,5 ^{NS}	1,8 ^{NS}	4,7 a*	10,2
P/M	5,0 ab	5,9 a	41ab	163 bc	1,8 d	0,1	4,2	2,1	3,8 b	10,5
A/M	5,0 ab	5,8 ab	54a	197 bc	2,2 cd	0,2	3,7	1,8	4,3 ab	10,3
P/M+L	5,2 a	6,0 a	32 b	316 a	2,8 ab	0,1	4,7	2,5	3,7 b	11,7
A+V/M+C	4,6 c	5,6 b	33 b	138 bc	2,5 bc	0,4	3,7	2,6	5,0 a	10,8
G/M+G	4,8 bc	5,7 b	36ab	229 ab	3,0 a	0,2	5,2	2,5	4,7 a	12,9
CN	5,0 ab	5,7 b	2 c	195 bc	3,0 a	0,2	4,1	1,9	4,7 a	11,1
Média	4,9	5,8	30	194	2,5	0,2	4,1	2,0	4,4	11,1
CV (%)	2,3	1,8	24,0	19,0	8,4	53,3	15,8	18,9	9,1	8,9

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

NS – Diferenças não significativas pelo teste de análise de variância.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno; milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vicia no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

APÊNDICE 10. Teores médios de umidade gravimétrica (kg kg⁻¹) na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais, ao longo de um ano de cultivo (2000/2001).

Tratamentos	Meses de Amostragem										
	Set/00	Out/00	Nov/00	Dez/00	Jan/01	Fev/01	Mar/01	Abr/01	Mai/01	Jun/01	Jul/01
SD ⁽¹⁾	0,103	0,120	0,099	0,131	0,129	0,150	0,133	0,157	0,124	0,104	0,104
P/M	0,109	0,127	0,107	0,125	0,142	0,156	0,142	0,163	0,144	0,119	0,119
A/M	0,158	0,159	0,120	0,147	0,159	0,171	0,161	0,170	0,160	0,127	0,127

P/M+L	0,172	0,168	0,127	0,140	0,158	0,160	0,150	0,191	0,179	0,170	0,170
A+V/M+C	0,145	0,170	0,127	0,143	0,162	0,175	0,154	0,185	0,188	0,136	0,136
G/G+M	0,184	0,178	0,152	0,142	0,163	0,178	0,143	0,181	0,174	0,158	0,158
CN	0,185	0,184	0,139	0,167	0,140	0,180	0,182	0,200	0,205	0,167	0,167
Médias Mensais	0,151	0,158	0,124	0,142	0,150	0,167	0,152	0,178	0,168	0,140	0,140

(1) SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

APÊNDICE 11. Propriedades físicas da camada de 0 – 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais.

Tratamentos	Propriedades Físicas		
	Argila ⁽²⁾ (g kg ⁻¹)	Densidade do Solo ⁽³⁾ (kg dm ⁻³)	Peso de Agregados > 2mm ⁽⁴⁾ (g)
SD⁽¹⁾	290	1,54	8,1
P/M	270	1,56	-
A/M	250	1,56	19,0
P/M+L	280	1,62	17,0
A+V/M+C	270	1,58	20,0
G/M+G	280	1,42	19,0
CN	240	1,52	25,8
Média	270	1,54	18,2

(1) SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

(2) Média de três amostras compostas coletadas em 07/09/2000.

(3) Adaptado de Bayer, 1996.

(4) Adaptado de Vezzani, 2001

APÊNDICE 12. Carbono orgânico e nitrogênio total de um Argissolo Vermelho distrófico típico na camada de 0 a 10 cm sob diferentes coberturas vegetais.

Tratamentos	Carbono Orgânico (g Kg ⁻¹)				Nitrogênio Total (g Kg ⁻¹)			
	Blocos			Média	Blocos			Média
	I	II	III		I	II	III	
SD⁽¹⁾	9,8	9,6	9,0	9,5	0,92	0,92	0,89	0,91
P/M	10,2	10,0	8,8	9,7	0,84	0,98	0,92	0,91
A/M	12,9	9,6	10,8	11,1	1,10	1,02	1,08	1,07
P/M+L	17,2	16,8	16,8	16,9	1,62	1,58	1,56	1,59
A+V/M+C	13,0	14,4	13,4	13,6	1,16	1,30	1,30	1,25
G/M+G	16,9	13,6	16,0	15,5	1,52	1,26	1,42	1,40
CN	16,3	17,6	16,4	16,8	1,42	1,44	1,42	1,43
Média	13,8	13,1	13,0	13,3	1,23	1,21	1,23	1,22

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

APÊNDICE 13. Indicadores de produtividade de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob diferentes coberturas vegetais: quantidade de carbono (C) adicionado pela parte aérea de espécies de inverno e verão em um período de 10 anos e rendimento médio de grãos de milho (média dos seis últimos anos de cultivo).

Tratamentos	Indicadores de Produtividade do Solo	
	C adicionado pela parte aérea em 10 anos ⁽²⁾ (Mg ha ⁻¹)	Rendimento médio de grãos de milho ⁽³⁾ (Mg ha ⁻¹)
SD⁽¹⁾	5,1	1,87
P/M	13,6	2,25
A/M	33,6	2,79
P/M+L	47,2	5,48
A+V/M+C	61,2	5,27
G/M+G	68,4	6,17

Média	38,2	3,97
--------------	-------------	-------------

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

⁽²⁾ Fonte: Burle et al. (1997).

⁽³⁾ Os dados referem-se aos últimos seis anos, para os tratamentos de cultivo, e aos anos de 88/89, 93/94 e 95/96, para o tratamento SD (solo descoberto). O tratamento CN (campo nativo) não foi incluído, por nunca ter sido cultivado.

APÊNDICE 14. Resultados relativos (%) dos indicadores biológicos para o período de um ano de cultivo (2000/2001), tendo os resultados de CN como referência, média e desvio de médias dos mesmos e índice biológico de qualidade do solo (IBQS). O IBQS é calculado pela fórmula: $IBQS_i = média_i [1 - (desvio\ padrão_i / 200)]$.

Tratamentos	Indicadores Biológicos (%)							Média
	Biomassa Microbiana	Respiração Microbiana	Beta-glucosidase	Urease	Amidase	Fosfatase Ácida	Aril-sulfatase	Geral
SD⁽¹⁾	46,0	30,5	44,0	30,8	49,6	32,1	18,3	35,9
P/M	51,7	37,0	56,7	32,5	47,6	37,2	31,6	42,0
A/M	60,9	44,0	65,3	37,5	50,4	43,0	39,1	48,6
P/M+L	68,7	66,5	120,7	50,0	69,6	53,5	69,8	71,3

A+V/M+C	70,2	63,0	88,0	48,3	68,0	51,2	52,4	63,0
G/M+G	72,3	70,0	92,7	49,2	72,7	59,8	67,3	69,1
CN	100	100	100	100	100	100	100	100,0

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; P/M = pousio no inverno / milho no verão; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; A+V/M+C = aveia e vica no inverno / milho e caupi no verão; G/M+G = guandu no inverno / milho e guandu no verão; CN = campo nativo.

APÊNDICE 15. Biomassa microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de culturas, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002).

Tratamentos	Biomassa Microbiana (mg de C-CO ₂ kg ⁻¹ solo seco)				
	Meses				Média Geral
	Set/01**	Out/01**	Dez/01**	Fev/02 ^{NS}	
SD⁽¹⁾	289 b	272 c	384 b	203	287
A/M	311 b	374 bc	381 b	282	337
P/M+L	330 b	444 b	412 b	475	415
PA	360 b	385 bc	467 b	366	395
CN	622 a	584 a	695 a	457	590
Médias	382	412	468	341	405
CV (%)	11,5	15,5	11,6	31,1	-

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

NS : não significativo.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

APÊNDICE 16. Respiração microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho

distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de culturas, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002).

Tratamentos	Respiração Microbiana				
	(mg de C-CO ₂ kg ⁻¹ solo seco)				
	Meses				Média Geral
Set/01**	Out/01**	Dez/01*	Fev/02**		
SD ⁽¹⁾	67 b	115 b	112 c	115 c	102
A/M	85 b	140 b	129 c	162 c	129
P/M+L	95 b	191 b	138 bc	272 b	174
PA	127 b	289 b	177 ab	317 b	228
CN	232 a	470 a	201 a	497 a	350
Médias	121	241	152	272	197
CV (%)	26,6	38,3	16,1	19,2	-

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = Capim pangola; CN = campo nativo.

APÊNDICE 17. Atividade da β -glucosidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de culturas, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002), medida pela liberação de p -nitrofenol em uma unidade de tempo.

Tratamentos	Atividade da β -glucosidase				
	(μ g p -nitrofenol g ⁻¹ solo h ⁻¹)				
	Meses				Média Geral
Set/01 ^{NS}	Out/01*	Dez/01**	Fev/02**		
SD ⁽¹⁾	63	79 c	57 d	58 c	64

A/M	70	107 bc	100 bc	98 bc	94
P/M+L	128	173 ab	160 a	171 a	158
PA	86	129 abc	88 c	127 b	108
CN	140	186 a	123 b	191 a	160
Médias	97	135	106	129	117
CV (%)	31,7	26,6	15,5	16,5	-

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

NS: não significativo.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão;

PA = Capim pangola; CN = campo nativo.

APÊNDICE 18. Atividade da urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de culturas, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002), medida pela liberação de N-NH₄ em uma unidade de tempo.

Tratamentos	Atividade da Urease (μ g N-NH ₄ g ⁻¹ solo 2h ⁻¹)				
	Meses				Média Geral
	Set/01**	Out/01**	Dez/01**	Fev/02**	
SD⁽¹⁾	32 c	34 b	43 c	39 c	37
A/M	49 b	37 b	54 bc	45 c	46
P/M+L	44 b	46 b	63 b	71 b	56
PA	51 b	46 b	53 bc	67 b	54
CN	113 a	99 a	112 a	131a	114
Médias	58	53	65	71	61
CV (%)	6,7	16,3	9,2	10,3	-

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão;

PA = Capim pangola; CN = campo nativo.

APÊNDICE 19. Atividade da amidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de culturas, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002), medida pela liberação de N-NH₄ em uma unidade de tempo.

Tratamentos	Atividade da Amidase (μ g N-NH ₄ g ⁻¹ solo 2h ⁻¹)				
	Meses				Média Geral
	Set/01**	Out/01**	Dez/01**	Fev/02**	
SD ⁽¹⁾	221 b	188 b	210 cd	179 c	200
A/M	195 b	179 b	196 d	184 c	188
P/M+L	251 b	235 b	268 b	278 b	258
PA	217 b	205 b	247 bc	239 b	227
CN	399 a	457 a	433 a	453 a	436
Médias	256	253	271	267	262
CV (%)	12,8	17,7	9,5	9,9	-

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = Capim pangola; CN = campo nativo.

APÊNDICE 20. Atividade da fosfatase ácida na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de culturas, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002), medida pela liberação de p -nitrofenol em uma unidade de tempo.

Tratamentos	Atividade da Fosfatase Ácida (μ g p -nitrofenol g ⁻¹ solo h ⁻¹)
-------------	--

	Meses				Média Geral
	Set/01**	Out/01**	Dez/01**	Fev/02**	
SD ⁽¹⁾	338 d	321 c	306 c	388 c	338
A/M	362 cd	400 bc	434 bc	505 c	425
P/M+L	470 bc	498 b	524 b	645 b	534
PA	500 b	549 b	489 b	655 b	548
CN	1154 a	1261 a	1136 a	1351 a	1226
Médias	564	606	577	709	512
CV (%)	10,6	14,1	12,1	9,3	-

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = Capim pangola; CN = campo nativo.

APÊNDICE 21. Atividade da aril-sulfatase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de culturas, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002), medida pela liberação de ρ -nitrofenol em uma unidade de tempo.

Tratamentos	Atividade da Aril-sulfatase				
	(μ g ρ -nitrofenol g ⁻¹ solo h ⁻¹)				
	Meses				Média Geral
Set/01**	Out/01**	Dez/01**	Fev/02**		
SD ⁽¹⁾	94 d	107 d	110 d	79 d	98
A/M	187 c	186 c	225 c	185 c	196
P/M+L	299 b	303 b	340 b	331 b	318
PA	341 b	314 b	331 b	351 b	334
CN	546 a	568 a	622 a	603 a	585
Médias	293	296	325	310	306
CV (%)	11,5	10,2	11,1	9,0	-

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = Capim pangola; CN = campo nativo.

APÊNDICE 22. Análises químicas da camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de culturas, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002). Média de três amostras compostas coletadas.

Tratamentos	pH (H ₂ O)	Índice SMP	P (mg L ⁻¹)	K (mg L ⁻¹)	MO (%)	Al (cmol _c L ⁻¹)	Ca (cmol _c L ⁻¹)	Mg (cmol _c L ⁻¹)	Al+H (cmol _c L ⁻¹)	CT (cmol _c L ⁻¹)
SD⁽¹⁾	4,8	5,7	9	117	1,8	0,2	3,5	1,8	4,7	10,2
A/M	5,0	5,8	54	197	2,2	0,2	3,7	1,8	4,3	10,3

P/M+L	5,2	6,0	32	316	2,8	0,1	4,7	2,5	3,7	11,7
PA	4,9	6,2	14	171	2,8	1,2	3,6	2,1	3,0	9,1
CN	5,0	5,7	2	195	3,0	0,2	4,1	1,9	4,7	11,1
Médias	5,0	5,9	22	199	2,5	0,4	3,9	2,0	4,1	10,5

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno; milho e lablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

APÊNDICE 23. Teores médios de umidade gravimétrica (kg kg^{-1}) na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de culturas, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002).

Tratamentos	Umidade gravimétrica (kg kg^{-1})				
	Meses				Média Geral
	Set/01	Out/01	Dez/01	Fev/02	
SD⁽¹⁾	0,130	0,076	0,142	0,087	0,109
A/M	0,167	0,098	0,172	0,130	0,142
P/M+L	0,187	0,114	0,178	0,122	0,150
PA	0,173	0,134	0,175	0,132	0,154
CN	0,208	0,139	0,173	0,140	0,165
Médias	0,173	0,112	0,168	0,122	0,144

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

APÊNDICE 24. Propriedades físicas da camada de 0 – 10,0 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de culturas, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002).

Tratamentos	Propriedades Físicas		
	Argila ⁽²⁾ (g kg ⁻¹)	Densidade do Solo ⁽³⁾ (kg dm ⁻³)	Peso de Agregados > 2mm ⁽⁴⁾ (g)
SD⁽¹⁾	290	1,54	8,1
A/M	250	1,56	19,0
P/M+L	280	1,62	17,0
PA	330	1,41	24,6
CN	240	1,52	25,8
Média	226	1,53	18,9

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e tablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

⁽²⁾ Média de três amostras compostas coletadas em 07/09/2000.

⁽³⁾ Adaptado de Bayer, 1996.

⁽⁴⁾ Adaptado de Vezzani, 2001

APÊNDICE 25. Carbono orgânico e nitrogênio total de um Argissolo Vermelho distrófico típico na camada de 0 a 10 cm sob pastagem cultivada e dois sistemas de culturas, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002).

Tratamentos	Carbono Orgânico (g kg ⁻¹)				Nitrogênio Total (g kg ⁻¹)			
	Blocos			Média	Blocos			Média
	I	II	III		I	II	III	
SD⁽¹⁾	9,8	9,6	9,0	9,5	0,92	0,92	0,89	0,91
A/M	12,9	9,6	10,8	11,1	1,10	1,02	1,08	1,07
P/M+L	17,2	16,8	16,8	16,9	1,62	1,58	1,56	1,59
PA	15,4	15,1	17,8	16,1	1,20	1,28	1,36	1,28
CN	16,3	17,6	16,4	16,8	1,42	1,44	1,42	1,43
Média	14,3	13,7	14,2	14,1	1,25	1,25	1,26	1,26

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e tablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

APÊNDICE 26. Indicadores de produtividade de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob pastagem cultivada e dois sistemas de culturas, comparados ao tratamento referência "solo descoberto": quantidade de carbono (C) adicionado pela parte aérea de espécies de inverno e verão em um período de 10 anos e rendimento médio de grãos de milho (média dos seis últimos anos de cultivo).

Tratamentos	Indicadores de Produtividade do Solo	
	C adicionado pela parte aérea em 10 anos ⁽²⁾ (Mg ha ⁻¹)	Rendimento médio de grãos de milho ⁽³⁾ (Mg ha ⁻¹)
SD⁽¹⁾	5,1	1,87
A/M	33,6	2,79
P/M+L	47,2	5,48
PA	41,8	2,20
Média	31,9	3,09

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola.

⁽²⁾ Fonte: Burle et al. (1997).

⁽³⁾ Os dados referem-se aos últimos seis anos, para os tratamentos de cultivo, e aos anos de 88/89, 93/94 e 95/96, para os tratamentos SD e PA. O tratamento CN (campo nativo) não foi incluído, por nunca ter sido cultivado.

APÊNDICE 27. Resultados relativos (%) dos indicadores biológicos para um solo sob pastagem cultivada e dois sistemas de cultivo, comparados aos tratamentos referência "campo nativo" e "solo descoberto", ao longo do cultivo do milho (setembro de 2001 a fevereiro de 2002)., tendo os resultados de CN como referência, média e desvio padrão dos mesmos e índice biológico de qualidade do solo (IBQS). O IBQS é calculado pela fórmula: $IBQS_i = média_i [1 - (desvio de médias_i / 200)]$.

Tratamentos	Indicadores Biológicos (%)						Média Geral
	Biomassa Microbiana	Respiração Microbiana	Beta-glucosidase	Urease	Amidase	Fosfatase Ácida	

SD⁽¹⁾	48,6	29,1	40,0	32,5	46,0	27,6	16,8	34,4
A/M	57,1	36,9	58,8	40,4	43,1	34,7	33,5	43,5
P/M+L	70,3	49,7	98,8	49,1	59,2	43,6	54,4	60,7
PA	66,9	65,1	67,5	47,4	52,1	44,7	57,1	57,2
CN	100	100	100	100	100	100	100	100,0

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M = aveia no inverno / milho no verão; P/M+L = pousio no inverno / milho e lablab no verão; PA = capim pangola; CN = campo nativo.

APÊNDICE 28. Biomassa microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois manejos de cobertura, com e sem adição de N em cobertura no milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Tratamentos	Biomassa Microbiana (mg de C-CO ₂ kg ⁻¹ solo seco)				Média Geral
	Meses de observação				
	Set/01**	Out/01*	Dez/01**	Fev/02**	
SD⁽¹⁾	288 b	272 b	384 b	203 b	287
A/M s/N	310 b	374 ab	381 b	282 ab	337
A/M c/N	299 b	334 ab	338 b	178 b	287
P/M+L s/N	329 b	444 ab	412 b	475 a	415
P/M+L c/N	311 b	389 ab	383 b	349 ab	358
CN	622 a	584 a	695 a	457 a	590
Médias	360	400	432	324	379
CV (%)	12,9	23,6	7,9	24,4	

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo.

APÊNDICE 29. Respiração microbiana na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois manejos de cobertura, com e sem adição de N em cobertura no milho, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Tratamentos	Respiração Microbiana (mg de C-CO ₂ kg ⁻¹ solo seco)				Média Geral
	Meses de observação				
	Set/01**	Out/01**	Dez/01*	Fev/02**	
SD ⁽¹⁾	67 b	115 b	112 b	115 d	102
A/M s/N	85 b	140 b	129 ab	162 cd	129
A/M c/N	87 b	149 b	136 ab	230 bcd	151
P/M+L s/N	95 b	191 b	138 ab	272 bc	174
P/M+L c/N	127 b	175 b	167 ab	329 b	200
CN	232 a	470 a	201 a	497 a	350
Médias	115	207	147	267	184
CV (%)	23,8	16,7	17,8	19,1	

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo.

APÊNDICE 30. Atividade de β -glucosidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de culturas de milho, com e sem adição de N em cobertura, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Tratamentos	Atividade da β -glucosidase (μ g p -nitrofenol g ⁻¹ solo h ⁻¹)	Média Geral
	Meses de observação	

	Set/01*	Out/01**	Dez/01**	Fev/02**	
SD⁽¹⁾	63 b	79 d	57 d	58 c	64
A/M s/N	70 ab	107 bcd	100 cd	98 c	94
A/M c/N	89 ab	102 cd	109 bc	113 bc	103
P/M+L s/N	128 ab	173 abc	160 a	171 ab	158
P/M+L c/N	128 ab	194 a	154 ab	224 a	175
CN	140 a	186 ab	123 abc	191 a	160
Médias	103	140	117	143	126
CV (%)	29,1	20,3	15,4	17,4	

*Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5%.

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo.

APÊNDICE 31. Atividade de urease na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de culturas de milho, com e sem adição de N em cobertura, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Tratamentos	Atividade da Urease (μ g N-NH ₄ g ⁻¹ solo 2h ⁻¹)				Média Geral
	Meses de observação				
	Set/01**	Out/01**	Dez/01**	Fev/02**	
SD⁽¹⁾	32 c	34 b	43 c	39 d	37
A/M s/N	49 bc	37 b	54 bc	45 cd	46
A/M c/N	46 bc	34 b	50 bc	59 bc	47
P/M+L s/N	44 bc	46 b	63 b	71 b	56
P/M+L c/N	50 b	45 b	60 bc	62 bc	54
CN	113 a	99 a	112 a	131 a	114
Médias	55	49	64	68	59
CV (%)	11,1	16,0	11,1	9,1	

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo.

APÊNDICE 32. Atividade de amidase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de culturas de milho, com e sem adição de N em cobertura, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Tratamentos	Atividade da Amidase (μ g N-NH ₄ g ⁻¹ solo 2h ⁻¹)				Média Geral
	Meses de observação				
	Set/01**	Out/01**	Dez/01**	Fev/02**	
SD ⁽¹⁾	221 bc	188 b	210 cd	179 c	200
A/M s/N	195 c	179 b	196 d	184 c	189
A/M c/N	251 bc	181 b	247 bcd	254 bc	233
P/M+L s/N	250 bc	236 b	268 bc	278 b	258
P/M+L c/N	338 ab	307 b	315 b	307 b	317
CN	399 a	457 a	433 a	453 a	436
Médias	276	258	278	276	272
CV (%)	17,8	18,0	8,6	9,8	

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo.

APÊNDICE 33. Atividade de fosfatase ácida na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de culturas de milho, com e sem adição de N em cobertura, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Tratamentos	Atividade da Fosfatase Ácida	Média Geral
	(μ g p-nitrofenol g ⁻¹ solo h ⁻¹)	

	Meses de observação				
	Set/01**	Out/01**	Dez/01**	Fev/02**	
SD⁽¹⁾	338 c	321 c	306 c	388 d	338
A/M s/N	362 c	400 c	434 bc	505 cd	425
A/M c/N	425 bc	432 bc	510 b	670 c	509
P/M+L s/N	470 bc	498 bc	524 b	645 c	534
P/M+L c/N	598 b	619 b	604 b	947 b	692
CN	1154 a	1261 a	1136 a	1351 a	1226
Médias	558	588	586	751	621
CV (%)	12,9	11,2	11,8	11,2	

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo.

APÊNDICE 34. Atividade de aril-sulfatase na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de culturas de milho, com e sem adição de N em cobertura, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Tratamentos	Atividade da Aril-sulfatase ($\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}\text{ solo h}^{-1}$)				Média Geral
	Meses de observação				
	Set/01**	Out/01**	Dez/01**	Fev/02**	
SD⁽¹⁾	94 d	107 d	110 d	79 c	98
A/M s/N	187 bcd	186 cd	225 c	185 c	196
A/M c/N	178 cd	128 d	173 cd	175 c	164
P/M+L s/N	299 b	303 b	340 b	331 b	318
P/M+L c/N	223 bc	242 bc	260 bc	334 b	265
CN	546 a	568 a	622 a	603 a	585
Médias	255	256	288	284	271

CV (%)	15,5	14,3	12,1	16,1	
---------------	------	------	------	------	--

**Médias seguidas de mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Duncan a 1%.

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo.

APÊNDICE 35. Análises químicas da camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de culturas de milho, com e sem adição de N em cobertura, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo". Média de três amostras compostas.

Tratamentos	pH (H ₂ O)	Índice SMP	P (mg L ⁻¹)	K (mg L ⁻¹)	MO (%)	Al (cmol _c L ⁻¹)	Ca (cmol _c L ⁻¹)	Mg (cmol _c L ⁻¹)	Al+H (cmol _c L ⁻¹)	CT (cmol _c L ⁻¹)
SD⁽¹⁾	4,8	5,7	9	117	1,8	0,2	3,5	1,8	4,7	10,2
A/M	5,0	5,8	54	197	2,2	0,2	3,7	1,8	4,3	10,3

s/N										
A/M c/N	4,2	5,7	29	154	2,7	0,9	2,5	1,2	4,9	8,9
P/M+L s/N	5,2	6,0	32	316	2,8	0,1	4,7	2,5	3,7	11,7
P/M+L c/N	4,5	6,0	40	208	3,4	0,5	3,8	1,8	4,2	10,3
CN	5,0	5,7	2	195	3,0	0,2	4,1	1,9	4,7	11,1
Média	4,8	5,8	28	198	2,7	0,4	3,7	1,8	4,4	10,4

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo.

APÊNDICE 36. Teores médios de umidade gravimétrica (kg kg⁻¹) na camada de 0 a 10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois sistemas de culturas de milho, com e sem adição de N em cobertura, comparados aos tratamentos referência "solo descoberto" e "campo nativo", em quatro épocas de observação ao longo do período estival (2001/2002).

Tratamentos	Umidade Gravimétrica (kg kg ⁻¹)				Média Geral
	Set/01	Out/01	Dez/01	Fev/02	
SD⁽¹⁾	0,130	0,076	0,142	0,087	0,109
A/M s/N	0,167	0,098	0,172	0,130	0,142
A/M c/N	0,170	0,120	0,172	0,149	0,153
P/M+L s/N	0,187	0,114	0,178	0,122	0,150
P/M+L c/N	0,201	0,160	0,183	0,158	0,176
CN	0,208	0,139	0,173	0,140	0,165

SD⁽¹⁾	9,8	9,6	9,0	9,5	0,92	0,92	0,89	0,91
A/M s/N	12,9	9,6	10,8	11,1	1,10	1,02	1,08	1,07
A/M c/N	15,6	14,2	14,2	14,7	1,28	1,28	1,21	1,26
P/M+L s/N	17,2	16,8	16,8	16,9	1,62	1,58	1,56	1,59
P/M+L c/N	22,4	23,1	19,6	21,7	1,78	2,05	1,64	1,82
CN	16,3	17,6	16,4	16,8	1,42	1,44	1,42	1,43
Média	15,7	15,2	14,5	15,1	1,35	1,38	1,30	1,35

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão de 180 Kg ha⁻¹ de N; CN = campo nativo.

APÊNDICE 39. Indicadores de produtividade de um Argissolo Vermelho distrófico típico sob dois manejos de cobertura, com e sem adição de N em cobertura no milho, comparados ao tratamento referência "solo descoberto".

Tratamentos	Indicadores de Produtividade do Solo	
	C adicionado pela parte aérea em 10 anos⁽²⁾ (Mg ha ⁻¹)	Rendimento médio de grãos de milho⁽³⁾ (Mg ha ⁻¹)
SD⁽¹⁾	5,1	1,87
A/M s/N	33,6	2,79
A/M c/N	-	9,14
P/M+L s/N	47,2	5,48
P/M+L c/N	-	9,00
Média	-	5,66

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de N; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de N; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de N; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão de 180 Kg ha⁻¹ de N na forma de uréia.

⁽²⁾ Fonte: Burle et al. (1997).

⁽³⁾ Os dados referem-se aos últimos seis anos, para os tratamentos de cultivo, e aos anos de 88/89, 93/94 e 95/96, para o tratamento SD (solo descoberto). O tratamento CN (campo nativo) não foi incluído, por nunca ter sido cultivado.

APÊNDICE 40. Resultados relativos (%) dos indicadores biológicos para o período de um ano (2000/2001), tendo os resultados de CN como referência, média e desvio de médias dos

mesmos e índice biológico de qualidade do solo (IBQS). O IBQS é calculado pela fórmula: $IBQS_i = média_i [1 - (desvio\ de\ médias_i / 200)]$.

Tratamentos	Indicadores Biológicos (%)							Média Geral
	Biomassa Microbiana	Respiração Microbiana	Beta-glucosidase	Urease	Amidase	Fosfatase Ácida	Aril-sulfatase	
SD⁽¹⁾	48,6	29,1	40,0	32,5	45,9	27,6	16,8	34,4
A/M s/N	57,2	36,8	58,8	40,4	43,1	34,7	33,5	43,5
A/M c/N	48,7	43,1	64,4	41,2	54,8	41,5	28,0	46,0
P/M+L s/N	70,4	49,7	98,8	49,1	59,2	43,6	54,4	60,7
P/M+L c/N	60,6	57,1	109,4	47,4	72,7	56,4	45,3	64,1
CN	100	100	100	100	100	100	100	100,0

⁽¹⁾ SD = solo descoberto; A/M s/N = aveia no inverno / milho no verão sem adição de nitrogênio; A/M c/N = aveia no inverno / milho no verão com adição de 180 Kg ha⁻¹ de nitrogênio; P/M+L s/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão sem adição de nitrogênio; P/M+L c/N = pousio no inverno / milho e lablab no verão de 180 Kg ha⁻¹ de nitrogênio; CN = campo nativo.