

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**PEDOGÊNESE E MATÉRIA ORGÂNICA DE SOLOS
HIDROMÓRFICOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO
ALEGRE**

**Luís de França da Silva Neto
(Tese de Doutorado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**PEDOGÊNESE E MATÉRIA ORGÂNICA DE SOLOS HIDROMÓRFICOS DA
REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE**

LUÍS DE FRANÇA DA SILVA NETO
Engenheiro-Agrônomo (UFPB)
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

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

Porto Alegre (RS) Brasil
Setembro de 2010

LUÍS DE FRANÇA DA SILVA NETO
Engenheiro Agrônomo (UFPB)
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de

DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Banca Examinadora:

ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR

Professor Orientador
PPG-Ciência do Solo/UFRGS

JAIME ANTONIO DE ALMEIDA

PPG-Manejo do Solo, UDESC

DEBORAH PINHEIRO DICK

PPG-Ciência do Solo/UFRGS

JULIANA GOMES

Doutora em Ciência do Solo/UFRGS

AGRADECIMENTOS

A Deus, onipresente em minha caminhada.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do curso de doutorado. À CAPES e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos e à FAPERGS pelo financiamento inicial do projeto.

Ao meu orientador, professor Alberto Vasconcellos Inda Junior, com grande admiração, por todos os ensinamentos e dedicação durante todos esses anos. Ao meu co-orientador, professor Paulo César do Nascimento, pela partilha de conhecimentos. Ao professor Élvio Giasson, pela amizade.

Ao professor Cimélio Bayer, por providenciar minha saída para o estágio na Embrapa Instrumentação Agropecuária, em São Carlos-SP. À pesquisadora Débora Marcondes Bastos Pereira Milori, pelo meu aceite e orientação durante o estágio. Aos técnicos Wilson Tadeu e Marcelo Simões pelo auxílio nas análises de Ressonância Magnética Nuclear. Aos colegas da Embrapa, em especial ao Cléber e à Camila, pela amizade firmada.

Aos professores do Departamento de Solos da UFRGS, em especial à professora Deborah Dick, pelos valiosos ensinamentos. Ao professor Jacques Marré, pela lição de paciência e humildade.

Aos funcionários Jader Amaro, Luiz Antônio (Tonho) e Adão Luiz, pela presteza e competência profissional.

À Michely Tomazi pela amizade e auxílio no fracionamento físico da matéria orgânica do solo e tratamento com HF.

Aos colegas do Departamento de Solos, de modo especial ao Osmar, Tatiane, Flávio e Paula pela amizade e agradável convivência.

À minha esposa Damiana, meu porto-seguro, pelo amor, companheirismo e apoio constantes. À minha família, de modo especial aos meus pais Ivandro e Lourdinha, pelos exemplos de caráter e entusiasmo.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização desse trabalho, minha profunda gratidão.

SOLOS HIDROMÓRFICOS SOB USOS DISTINTOS ^{1/}

Autor: Luís de França da Silva Neto

Orientador: Prof. Dr. Alberto Vasconcellos Inda Junior

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo César do Nascimento

RESUMO

Na Região Metropolitana de Porto Alegre, os solos hidromórficos são utilizados intensivamente na atividade agropecuária, constituindo um recurso de importância social, econômica e ambiental. Este estudo teve por objetivo discutir aspectos pedogenéticos e de uso e manejo de solos hidromórficos, pela avaliação de características morfológicas, físicas e químicas dos solos, bem como da composição estrutural e das frações físicas e químicas da matéria orgânica do solo (MOS). Foram coletadas amostras de seis perfis de solos hidromórficos, sendo quatro sob dois tipos de uso ou manejo. No primeiro estudo foram estudados quanto às suas características morfológicas, físicas e químicas, incluindo o ataque sulfúrico e dissolução seletiva de óxidos de ferro. No segundo estudo foram determinados o carbono orgânico total (COT), o C presente em frações físicas e químicas da MOS, e a composição estrutural e o grau de humificação da MOS pelas técnicas espectroscópicas de fluorescência induzida por laser (FIL), infra-vermelho com transformada de Fourier (FTIR) e ressonância magnética nuclear do ¹³C (RMN ¹³C CP-MAS). Os solos hidromórficos mostraram diferenças devido à pedogênese e variações devido à alteração de manejo dos solos. A alta relação silte/argila, argila de atividade alta em subsuperfície e valores de Ki elevados indicaram um baixo grau de intemperismo dos solos. O pH, teor de COT, saturação por bases, grau de hidromorfismo, e distribuição granulométrica foram mais sensíveis às alterações induzidas pelo uso e manejo, influenciando na classificação final dos solos. O teor de COT foi inferior em solos sob usos mais intensivos, representando, em alguns casos, impacto na qualidade dos solos e no meio ambiente. A distribuição das frações físicas da MOS foi alterada pelo uso e manejo do solo, sendo o carbono orgânico particulado associado ao cultivo com arroz. A distribuição das frações químicas da MOS mostrou um predomínio de humina em todos os solos, e abundância de frações orgânicas de baixo peso molecular e ácidos húmicos em solos sob uso mais intensivo. Os resultados revelaram forte associação dos aspectos estruturais da MOS com a pedogênese. Dentro de um mesmo solo diferentes formas de utilização (tipo de cobertura vegetal, sistema de manejo e práticas de fertilização) alteraram a composição estrutural da MO dos solos hidromórficos. O grau de humificação da MOS avaliado pela técnica de FIL e o índice de decomposição avaliado por RMN ¹³C CP-MAS, variaram de acordo com os pedoambientes avaliados, sendo maiores nos perfis sob uso mais intensivo.

^{1/} Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (109 p.) Setembro, 2010. Trabalho realizado com apoio financeiro da CAPES, do CNPq e da FAPERGS.

PADDY SOILS UNDER DIFFERENT USES ^{1/}

Author: Luís de França da Silva Neto

Advisor: Prof. Dr. Alberto Vasconcellos In da Junior

Co-advisor: Prof. Dr. Paulo César do Nascimento

ABSTRACT

Paddy soils of Porto Alegre region are intensively used in agriculture, showing social, economic and environmental importance. The aim of this work was study pedogenetic and management aspects of paddy soils by the evaluation of morphological, physical and chemical soil characteristics, structural composition and physical and chemical fractions of soil organic matter (SOM). We collected samples of six paddy soil profiles, four of these with two distinct use or management. In the first study we study morphological, physical and chemical soil characteristics, including sulfuric acid attack and iron oxides selective dissolutions. In the second study, were determined the total organic carbon (TOC), carbon of physical and chemical SOM fractions, and the structural composition and humification degree of SOM through laser induced fluorescence spectroscopy (LIF), Fourier transformed infra-red (FTIR) and solid state ¹³C nuclear magnetic resonance spectroscopy (¹³C NMR). Paddy soils showed differences due to pedogenetic and variations due to management processes. The high value of silt/clay, subsurface high activity clay and high *k_i* indicated a low soil weathering degree. The pH, TOC, base saturation, hidromorfic degree and particle-size distribution were more sensible to soil management induced alterations, influencing the soil classification. The TOC content was inferior in intensive managed soils, constituting an impact in soil quality and environment. The SOM physical fractions distribution was altered by the soil management, with particulate organic carbon associated to rice cultivation. The SOM chemical fractions distribution showed humin predominance in all the soils, and low weight carbon and humic acids in intensive managed soils. The results showed great association of SOM structural aspects with pedogenesis. Within the same soil, different uses (cover crop, management system and fertilization practices) changed the structural composition of SOM. The humification degree evaluate by LIF and the index of decomposition by ¹³C NMR varied according environment of soil, and were higher in intensive managed paddy soils.

^{1/} Doctoral thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (109 p.) September, 2010. Financial support by CAPES, CNPq and FAPERGS.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 CAPÍTULO I: GÊNESE DE SOLOS HIDROMÓRFICOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE	3
2.1 Introdução	3
2.2 Revisão bibliográfica	4
2.2.1 Aspectos pedogenéticos	4
2.2.2 Uso de indicadores pedoambientais na caracterização de solos hidromórficos	7
2.2.3 Distribuição e formas de utilização dos solos hidromórficos na Região Metropolitana de Porto Alegre	10
2.3 Hipóteses	13
2.4 Objetivos	14
2.4.1 Geral	14
2.4.2 Específicos	14
2.5 Material e métodos	15
2.5.1 Solos e amostragem	15
2.5.2 Preparo de amostras	17
2.5.3 Caracterização dos solos	17
2.5.3.1 Análises físicas	18
2.5.3.2 Análises químicas	19
2.5.3.2.1 Análises de pH e elementos do complexo sortivo	19
2.5.3.2.2 Carbono orgânico total	19
2.5.3.2.3 Características químicas indicadoras da mineralogia	19
2.6 Resultados e discussão	21
2.6.1 Características morfológicas	21
2.6.2 Características físicas	26
2.6.3 Características químicas	31
2.6.4 Características químicas indicativas da mineralogia	35
2.7 Conclusões	39

3	CAPÍTULO II. ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA DE SOLOS HIDROMÓRFICOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE	40
3.1	Introdução	40
3.2	Revisão bibliográfica	41
3.2.1	Importância do estudo da matéria orgânica	41
3.2.2	Fracionamentos físico e químico da matéria orgânica do solo	43
3.2.3	Aplicação de técnicas espectroscópicas em estudos da matéria orgânica de solos hidromórficos	46
3.3	Hipóteses	50
3.4	Objetivos	51
3.4.1	Geral	51
3.4.2	Específicos	51
3.5	Material e Métodos	52
3.5.1	Carbono Orgânico Total	52
3.5.2	Fracionamento Físico Granulométrico da MOS	52
3.5.3	Fracionamento Químico da MOS	53
3.5.4	Espectroscopia de Fluorescência Induzida por Laser (FIL)	54
3.5.5	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	55
3.5.6	Obtenção da MOS concentrada com solução de HF	55
3.5.7	Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear de ¹³ C CP-MAS	55
3.6	Resultados e Discussão	57
3.6.1	Teores de Carbono Orgânico Total	57
3.6.2	Compartimentos Físicos e Húmicos da MOS	59
3.6.3	Índice de Humificação por Fluorescência Induzida por Laser (FIL)	61
3.6.4	Composição química da MOS determinada por FTIR	65
3.6.5	Composição química da MOS determinada por Ressonância Magnética Nuclear de ¹³ C CP-MAS	68
3.6.6	Discussão sobre a MOS e ambientes de ocorrência dos solos hidromórficos	72
3.7	Conclusões	78
4	CONCLUSÕES GERAIS	79

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
6 APÊNDICES	96

RELAÇÃO DE QUADROS

Quadro 1 – Identificação de perfis e respectivas localidades, classificação dos solos (Embrapa, 2006) e formas de uso e de manejo.	Erro! Indicador não definido.
Quadro 2 – Descrição morfológica dos perfis estudados.....	22
Quadro 3 – Principais características físicas dos perfis estudados.	27
Quadro 4 – Principais características químicas dos perfis estudados.	32
Quadro 5 – Valores de K_i e K_r , elementos do ataque sulfúrico e teores de ferro relativo aos óxidos cristalinos e de baixa cristalinidade.	36
Quadro 6 – Teores de carbono orgânico total determinados por Walkley e Black (COT_{WB}) e combustão seca (COT_{CS}), e teores de carbono presente nas frações físicas (COP , CAM) e proporções físicas e húmicas (C_{HCl} , C_{AF} , C_{AH} , C_{SH} , C_{HU}) do CO de solos hidromórficos sob usos distintos.	58
Quadro 7 – Distribuição relativa das principais regiões de integração do espectro de RMN ^{13}C CP-MAS e Índice de decomposição (A/A-O) de amostras de solos hidromórficos sob usos distintos tratadas com HF 10%.	71

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1 – Espectros de emissão de fluorescência induzida por laser (FIL) em amostras de TFSA de solos hidromórficos sob usos distintos.....	62
Figura 2 – Índice de humificação H_{FIL} (unidades arbitrárias) para horizontes Ap e A dos perfis de solos hidromórficos sob usos distintos.....	63
Figura 3 – Espectros de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) de amostras de TFSA de solos hidromórficos sob usos distintos em pastilhas de KBr (1:100).	66
Figura 4 – Espectros de RMN ^{13}C CP-MAS de amostras de solos hidromórficos sob usos distintos tratadas com HF 10%.....	70

RELAÇÃO DE APÊNDICES

Apêndice 1 – Descrição morfológica dos perfis de solos hidromórficos	97
Apêndice 2 - fotos dos ambientes de coleta dos solos.	104
Foto 1: ambiente do P2 e P2a, durante a descrição morfológica e coleta de solo.	104
Foto 2: trincheira do P2 sob pousio (cortesia do professor Humberto Bohnen).	104
Foto 3: Ambiente de coleta do P3.....	104
Foto 4: Ambiente de coleta do P4.....	105
Foto 5: Trincheira aberta do P4 por ocasião da descrição morfológica e coleta de solo.	105
Foto 6: ambiente do P5 (arroz) e P5a (eucalipto) por ocasião da descrição morfológica e coleta de solo.	105

1 INTRODUÇÃO GERAL

A Região Metropolitana de Porto Alegre possui cerca de 60 % de área ocupada por solos hidromórficos, os quais têm sido utilizados intensivamente na atividade agropecuária. É importante que o uso e manejo desses solos leve em consideração suas peculiaridades pedogenéticas, físicas e químicas, garantindo a sustentabilidade da atividade e a conservação dos recursos naturais.

A descrição morfológica, associada à caracterização física e química dos solos fornece informações detalhadas, que são fundamentais para a classificação dos solos, o planejamento de uso desse recurso natural e para a avaliação ambiental. Toda forma de utilização do solo pressupõe mudanças na dinâmica pedoambiental, as quais, conforme a intensidade podem acarretar impactos de proporções variáveis ao meio ambiente. A drenagem de solos hidromórficos é um exemplo de interferência antrópica capaz de mudar radicalmente a sua dinâmica. A presença do oxigênio num ambiente previamente reduzido implica em reações químicas específicas como a oxidação das formas de ferro e de enxofre, e cria condições propícias para o metabolismo de microrganismos aeróbios. As operações de preparo do solo, como a aração e a gradagem contribuem para oxidar e homogeneizar os materiais orgânicos e minerais depositados sobre a camada superficial dos solos hidromórficos. Diante do exposto, os estudos pedológicos, ao contemplarem indicadores pedoambientais e de processos pedogenéticos sensíveis às alterações induzidas pelo uso do solo, fornecem diagnóstico mais preciso sobre a dinâmica e a qualidade dos solos hidromórficos.

A matéria orgânica do solo tem sido um dos principais indicadores de mudanças pedoambientais a curto, médio e longo prazo, utilizados na ciência do solo. A gama de metodologias e técnicas analíticas disponíveis para a avaliação da matéria orgânica do solo é bastante difundida. É possível avaliar

as perdas e incrementos de matéria orgânica através dos teores absolutos de carbono orgânico total; aspectos funcionais e reativos da matéria orgânica do solo através dos teores de carbono presentes em compartimentos físicos e químicos; bem como a sua composição estrutural e grau de humificação através de técnicas espectroscópicas. Apesar dessas vantagens, a maioria dos estudos sobre matéria orgânica do solo tem sido realizada em solos bem drenados, sendo escassos, mas ao mesmo tempo necessários estudos sobre a matéria orgânica de solos hidromórficos, cuja dinâmica é bastante distinta da observada em solos bem drenados.

A interdisciplinaridade à que se propõe esta pesquisa oferece uma avaliação mais completa do solo na medida em que faz uso de observações visuais, tácteis e intuitivas comuns à morfologia e classificação do solo, bem como de técnicas e análises físicas, químicas e espectroscópicas do solo. A compreensão do ambiente passa pelo entendimento das interações entre os resultados obtidos, sendo que essas interações contribuem para uma representação mais próxima da realidade, avaliada nesta pesquisa.

Assim, a pesquisa foi desenvolvida em dois estudos representados por capítulos. O primeiro capítulo, “Gênese de solos hidromórficos da Região Metropolitana de Porto Alegre”, foi realizado com o objetivo de avaliar as diferenças pedogenéticas dos diferentes tipos de solos hidromórficos, e a relação com os diferentes sistemas de uso e manejo, por meio da utilização de características indicadoras morfológicas, físicas e químicas. O segundo capítulo, “Estudo da matéria orgânica de solos hidromórficos da Região Metropolitana de Porto Alegre”, foi realizado com o objetivo de avaliar o teor, a composição e o grau de humificação da matéria orgânica de solos hidromórficos, estabelecendo relações com a pedogênese e diferentes formas de uso e manejo dos solos.

2 CAPÍTULO I: GÊNESE DE SOLOS HIDROMÓRFICOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE

2.1 Introdução

Os solos hidromórficos apresentam como condição principal a saturação permanente ou na maior parte do tempo com água, resultando em características específicas decorrentes do processo de gleização. Estas condições ambientais estão associadas a áreas de baixada ou depressões localizadas, que apresentam má drenagem decorrente da presença de um lençol freático permanente ou oscilante. Os processos pedogenéticos como a gleização, a ferrólise e a paludização determinam no solo características morfológicas, físicas, químicas, biológicas e mineralógicas específicas, que podem variar de acordo com o grau de hidromorfismo, material de origem, granulometria e com o uso e manejo dos solos.

Na Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA) os solos hidromórficos representam cerca de 60 % da área total (UFRGS, 2005). Estes solos têm sido utilizados para o cultivo de arroz, pastagens, milho, feijão e hortaliças (Azambuja et al., 2004), se constituindo, portanto, em um recurso natural de importância econômica e social. Geograficamente, os solos hidromórficos integram ecossistemas intermediários entre as terras altas e os ecossistemas aquáticos, apresentando importância ambiental, pela conservação de recursos hídricos e pela manutenção da fauna e da flora. A especificidade de alguns ambientes, como no caso dos solos orgânicos presentes na localidade de Itapoã (município de Viamão), os torna relevantes para o manejo e a conservação de solos.

A utilização sustentável do solo exige o conhecimento prévio de suas características e limitações, as quais são obtidas através de

levantamentos pedológicos e de aspectos do meio físico, gerando informações adequadas para a sua classificação. De uma maneira geral, a utilização do solo pressupõe alterações significativas em suas características originais (Nunes et al., 2002; Pauletto et al., 2004), por isso é fundamental que se busquem indicadores sensíveis que melhor expressem a qualidade do solo, a fim de subsidiar o planejamento de atividades que impliquem na utilização deste recurso, com menor impacto possível sobre os ecossistemas.

A utilização de solos hidromórficos pelo homem tem determinado mudanças pedoambientais, variáveis conforme o uso e manejo adotados. É possível que as mudanças no ambiente desses solos condicionem alterações nas características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas. Este estudo propõe avaliar o impacto das mudanças pedoambientais induzidas pelas formas de uso nos solos hidromórficos e as suas implicações no âmbito da gênese, morfologia, classificação de solos, e do manejo e conservação de solos.

2.2 Revisão bibliográfica

2.2.1 Aspectos pedogenéticos

Os solos hidromórficos se caracterizam por uma condição hidrológica diferenciada em relação aos solos bem drenados. Nos primeiros, o relevo e a inserção na paisagem proporcionam maior tempo de residência da água nestes solos, devido a restrições de drenagem. Como consequência desenvolvem-se características morfológicas, físicas, químicas, biológicas e mineralógicas específicas, relacionadas ao processo pedogenético de hidromorfismo ou gleização (Ponnamperuma, 1972; Fanning e Fanning, 1989; Buol et al., 1997).

Sob condição alagada, devido à baixa difusão do O_2 na água (cerca de 10.000 vezes mais lenta do que no ar), o suprimento de oxigênio torna-se lento e escasso em função de sua utilização por microrganismos aeróbios. A demanda por compostos oxidantes aceptores de elétrons nas reações de decomposição da MO, passa a ser atendida por nitratos (NO_3^-), formas oxidadas de manganês (Mn) e ferro (Fe), e em condição de redução mais acentuada, o enxofre, que passa da forma de sulfatos (SO_4^{-2}) para outras

formas mais reduzidas, como enxofre elementar e sulfetos. Quando todos os aceptores inorgânicos são reduzidos, predominam as reações de fermentação em que tanto elétron doador e acceptor são compostos orgânicos.

A população microbiana, representada por bactérias, actinomicetos, fungos e protozoários, também passa por alterações representadas pela alternância de populações com metabolismos microbianos que determinam reações e processos bioquímicos específicos. Predomina em primeiro estágio a população aeróbia, cujos microrganismos utilizam a energia liberada da oxidação do carbono orgânico a CO_2 e O_2 como acceptor de elétrons, que é reduzido à água. Em estágio seguinte, a população anaeróbia facultativa utiliza compostos inorgânicos como aceptores de elétrons, e em estágio final a população fermentativa que se caracteriza pela menor geração de CO_2 e pela formação de compostos orgânicos de cadeia curta e baixo peso molecular, que por sua vez serão reduzidos a CH_4 (Ponnamperuma, 1972; Patrick e Reedy, 1978). Outro fator importante é que heterogeneidade nas condições de oxirredução em solos hidromórficos faz com que os metabolismos aeróbio e anaeróbio possam ocorrer simultaneamente.

As características do material de origem exercem influência direta nas características físicas, químicas e mineralógicas dos solos hidromórficos, uma vez que o ambiente é pouco propício a outros processos intensos de intemperismo. Não obstante, o hidromorfismo não impede a ocorrência de processos pedogenéticos marcantes, influenciando tanto nas características físicas, químicas e mineralógicas, como nas morfológicas. Estes aspectos são considerados em sistemas de classificação de solos, classes de aptidão e uso agrícola e quanto ao potencial de impacto ambiental (Nascimento, 2004; Nascimento et al, 2010).

Solos hidromórficos, especificamente os depósitos de origem litorânea, podem apresentar altas taxas de enxofre de águas oceânicas e acúmulo de material sulfídrico, principalmente a pirita (FeS_2). Este material é altamente susceptível ao processo de oxidação induzido pela drenagem artificial, podendo formar ácido sulfúrico (H_2SO_4) e ocasionar acidificação extrema do solo com impactos ambientais drásticos e alto potencial de disseminação (Van Breemen e Pons, 1978), devido à proximidade destes solos com os cursos de água, como rios e lagoas.

Segundo Fagéria et al. (1994), solos hidromórficos de diferentes estados brasileiros possuem naturalmente uma ampla variação em atributos como teor de matéria orgânica, pH e saturação por bases, a qual é atribuída por Klamt et al. (1985) às diferenças na composição granulométrica e mineralógica dos sedimentos originários destes solos. Marques Júnior & Lepsh (2000), afirmam que uma maior variabilidade de propriedades físicas, químicas e mineralógicas é característica de solos pedogeneticamente menos evoluídos. Assim, aspectos mineralógicos também podem contribuir na análise e interpretação das condições de formação dos solos hidromórficos. Um exemplo é o baixo teor de Al como substituto isomórfico do Fe em goethitas de solos hidromórficos, que pode ser um indicativo de que os sedimentos de origem são recentes (Schwertmann, 1985; Coelho e Vidal-Torrado, 2003).

Montanari et al. (2005) atribuem a variabilidade nas características de solos hidromórficos à questão da pedoforma, onde a pedoforma côncava propicia aumento de matéria orgânica do solo (MOS), da capacidade de troca de cátions (T) e do conteúdo de argila, bem como diminui a densidade do solo e o teor de areia, comportamento este atribuído à drenagem e inclinação do declive.

Quando o relevo favorece condições hidrológicas de permanente hidromorfismo, o ambiente pode apresentar restrição à decomposição de matéria orgânica (MO). O acúmulo de MO, típico de ambientes com hidromorfismo acentuado, está relacionado à adição de biomassa, caracterizada por uma sucessão de espécies vegetais à medida que camadas de material orgânico são acumuladas, bem como à reduzida intensidade de transformação devido à anaerobiose (Andriessse, 1984). A drenagem parcial destas camadas de material orgânico permite um ambiente físico aerado, mas com capacidade de armazenamento de água. Todos esses fatores favorecem a paludização, processo pedogenético que origina as turfeiras ou solos orgânicos, representados no SiBCS pela classe dos Organossolos (Embrapa, 2006). Diferentemente dos solos minerais, os Organossolos tem sua origem a partir de materiais orgânicos, que determinam suas propriedades morfológicas, físicas e químicas (Anjos et al., 2008).

Na planície costeira do Rio Grande do Sul (RS), os solos orgânicos foram formados a partir de séries de transgressões e regressões marinhas

ocorridas durante o tércio-quadernário, evoluindo para sedimentação típica de turfeiras. Estes solos estão localizados numa região plana de altitudes inferiores a 5 m, próximas à borda norte da Lagoa dos Patos, com espessura orgânica média de 1,4 m e máxima de 3,6 m (Villwock, 1972). Atualmente estes solos têm sido drenados para o cultivo de arroz, pastagens e, em menor escala, hortaliças. Apesar de seu papel econômico e social para a região, a degradação destes solos é visível, principalmente naqueles drenados em excesso e cultivados intensivamente. Estas ações levam à intensa subsidência do material orgânico com consequente redução da massa de solo (Witte, 1990). Esta perda pode ser associada diretamente à oxidação excessiva do material orgânico, com consequente emissão de CO₂ e outros gases de efeito estufa, como o N₂O e CH₄, para a atmosfera.

De acordo com Montagne et al. (2009), a drenagem artificial é um exemplo da influência antrópica na pedogênese recente. Como prática singular, a drenagem diminui a intensidade de erosão, aumenta a intensidade dos processos de lixiviação e eluviação, afeta a dinâmica do ferro e do manganês e induz heterogeneidade na evolução do solo.

A pedogênese ocorre em escalas de tempo de centenas a milhares de anos, entretanto, a intervenção antrópica tem influenciado este processo de maneira intensa e acelerada causando mudanças na dinâmica natural do solo (Witte, 1990). Em questão de décadas ou anos, as formas de utilização do solo podem influenciar em atributos relacionados diretamente aos seus processos pedogenéticos. Por esta razão, o emprego de indicadores sensíveis destas alterações no solo pode contribuir como metodologia adequada para inferir sobre aspectos de interesse da gênese, morfologia e classificação de solos.

2.2.2 Uso de indicadores pedoambientais na caracterização de solos hidromórficos

Os óxidos (óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos) de ferro constituem importantes indicadores pedoambientais, em virtude de sua ampla distribuição em solos do mundo inteiro e a relativa facilidade com que os mesmos são identificados, quantificados e caracterizados (Inda Junior, 2002). O teor e a proporção dos diferentes tipos de óxidos de ferro imprimem variadas cores aos solos, que têm sido comumente empregadas na descrição morfológica e na

classificação de solos. Em adição, a caracterização química (dissolução seletiva das formas de Fe) e mineralógica (DRX, grau de substituição isomórfica) dos óxidos de ferro auxilia na interpretação da pedogênese, do intemperismo e biogeoquímica do ferro de solos de variados ambientes, inclusive ambientes sob influência de hidromorfismo.

Na gênese dos óxidos de ferro estão envolvidas condições específicas de temperatura, umidade, pH, Eh e MO, que por sua vez são dependentes dos fatores de formação do solo (Schwertmann e Taylor, 1989). Kampf & Curi (2000) afirmam que após a formação dos óxidos de ferro, sua composição e a distribuição estão sujeitas às contínuas modificações em busca do equilíbrio com as mudanças do ambiente do solo. Estes processos compreendem as reações de dissolução/neoformação de óxidos de ferro.

A dissolução redutiva ocorre em pedoambientes saturados com água (ausência de O_2) a partir da transferência enzimática de elétrons pelos microrganismos (principalmente bactérias anaeróbicas) para o Fe^{3+} da superfície dos óxidos de ferro. A redução do Fe^{3+} para Fe^{2+} gera uma desestabilização estrutural e, conseqüentemente, o deslocamento do Fe^{2+} para a solução do solo. Na solução do solo, a concentração de Fe^{2+} varia em função do pH, do teor de MO e do conteúdo e reatividade dos óxidos de ferro, porém é controlada pela área superficial dos óxidos (Roden, 2003) e pela solubilidade termodinâmica (Bonneville et al., 2004).

O processo seguinte, a neoformação dos óxidos de ferro, ocorre quando o O_2 é re-introduzido no pedoambiente, e o Fe^{2+} é rapidamente oxidado para Fe^{3+} . Os óxidos de ferro neoformados podem apresentar diferenças em termos de cristalinidade e área superficial específica, em comparação aos óxidos de ferro de outrora. A cristalinidade dos óxidos de ferro tem sido relacionada aos ambientes de formação e as diferenças de área superficial específica contribuem para o entendimento da reatividade destes minerais no solo e das interações com fertilizantes (sorção de fósforo) e com a MO, uma vez que uma maior área superficial específica corresponde diretamente a uma maior quantidade de sítios capazes de reagir na interface solo-solução.

Os diferentes tipos de óxidos de ferro refletem os processos pedogenéticos, que ocorrem sob intensidades específicas dos fatores de formação do solo. Assim, em pedoambientes mais oxidantes predominam

óxidos de ferro cristalinos como a goethita (α -FeOOH), a hematita (α -Fe₂O₃) e a magnetita (Fe₃O₄), que imprimem no solo cores amareladas e avermelhadas, e apresentam uma melhor ordenação cristalina e menor área superficial específica. Ambientes sob influência da umidade e matéria orgânica, como os solos hidromórficos, favorecem a formação de óxidos de ferro menos cristalinos como a ferrihidrita (Fe₅(OH)₈ · 4H₂O), cujo menor ordenamento cristalino determina maior área superficial específica (Kämpf e Curi, 2000).

Em condições de alagamento sazonal, como no caso de solos hidromórficos cultivados com arroz é comum a presença de mosqueados e plintitas, feições morfológicas que são reflexos dos processos de dissolução e neoformação de óxidos de ferro. A plintita é uma formação constituída de uma mistura de argila rica em óxido de ferro segregada em ciclos de umedecimento e secagem do solo. Ela pode ser destacada do solo como uma formação firme, porém não endurecida (como no caso da petroplintita). A presença de plintita descrita em levantamentos de solos auxilia nas inferências sobre a intensidade dos processos de oxi-redução. Em alguns casos a presença expressiva desta feição pode resultar na formação de horizonte plíntico, que é utilizado no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) para enquadrar solos na ordem dos Plintossolos.

Nos estudos com óxidos de ferro tem sido amplamente empregada a relação Fe_o/Fe_d, onde Fe_o corresponde à quantidade de ferro extraída da fração argila por meio de oxalato de amônio, fração esta referente aos óxidos de ferro menos cristalinos (Schwertmann, 1964), e Fe_d a quantidade de ferro extraída por ditionito citrato bicarbonato de sódio, que constitui a totalidade dos óxidos de ferro pedogênicos (cristalinos e de baixa cristalinidade) (Mehra e Jackson, 1960). O aumento desta relação é correspondente à diminuição da cristalinidade dos óxidos de ferro pedogênicos, que é análoga à reatividade destes minerais e confere uma idéia da dinâmica mineralógica no ambiente. Isto é importante, pois a relação Fe_o/Fe_d pode ser utilizada para estimar o grau de hidromorfismo de um solo. Quando o hidromorfismo é expressivo (maior Eh) pode-se esperar maiores valores da relação Fe_o/Fe_d, uma vez que neste ambiente prevalecem óxidos de ferro menos cristalinos (ferrihidrita). Por outro lado, menores valores da relação Fe_o/Fe_d decorrem da predominância de óxidos de maior cristalinidade formados sob condições mais oxidantes (menor

Eh).

Solos com menor grau de hidromorfismo podem apresentar maior desenvolvimento pedogenético, o qual pode ser constatado pela maior diferenciação de horizontes, maior desenvolvimento de estruturas em blocos ou prismática e participação de outros processos pedogenéticos como a lessivagem.

Em solos com hidromorfismo permanente, ou naqueles com lençol freático oscilante, a redução dos compostos de ferro tem sido considerada a mais importante alteração química, em virtude do aumento da atividade deste elemento na solução do solo (Abreu et al, 2007), com influência na interação com outros nutrientes (como o fósforo) e no surgimento e variações das feições morfológicas dos solos. No pedoambiente hidromórfico, a oxidação do ferro e do manganês em consequência da drenagem, resulta num aumento da acidez que é proporcional ao teor destes elementos, especialmente o ferro (Ponnamperuma, 1972; Kampf, 1987).

Variações na distribuição granulométrica, como por exemplo, na relação silte/argila indicam diferentes graus de intemperismo dos solos, sendo aqueles mais siltosos considerados, em geral, menos intemperizados. As relações moleculares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (índice Ki), $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (índice Kr), $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ e Fe_d/Fe_t têm sido utilizadas na avaliação do grau de intemperismo dos solos (Embrapa, 2006), permitindo também inferências sobre a mineralogia dos solos. A abundância de determinados elementos químicos também pode ser um indicativo de ambientes específicos, como por exemplo, teores elevados de Na e S em áreas com influência litorânea ou lacunar.

No presente estudo, o uso de indicadores pedoambientais busca não apenas a avaliação da pedogênese, mas também a distinção de ambientes e o entendimento dos impactos da interferência antrópica nestes solos, considerando os diferentes materiais de origem dos solos, tipos de manejo e a variação dos períodos de alagamento.

2.2.3 Distribuição e formas de utilização dos solos hidromórficos na Região Metropolitana de Porto Alegre

A Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA) está inserida nas

regiões geomorfológicas da Depressão Central Gaúcha e da Planície Litorânea (RADAMBRASIL, 1986). O levantamento de solos do município de Porto Alegre mostra que de um total de 480 km², cerca de 60% é constituída por unidades de mapeamento formadas por solos com influência de processos de hidromorfismo (UFRGS, 2005). Parte destes solos tem sido utilizada principalmente para o cultivo de arroz, pastagens, milho, feijão e hortaliças (Klamt et al., 1985; Azambuja et al., 2004).

A RMPA conta com levantamentos de solos em pequena escala (Hasenack et al., 2004), onde a distribuição de ocorrência dos solos tem sua apresentação limitada pelas restrições de escala e de procedimentos executados no levantamento. Estudos de caracterização pedogenética, ainda que não se constituam em trabalho de levantamento e mapeamento de solos, podem contribuir para o detalhamento da distribuição de ocorrência dos diferentes tipos de solos da região estudada, principalmente por meio do aprimoramento dos estudos da relação dos solos com os ambientes de ocorrência.

Para fins de classificação, é importante o estabelecimento de critérios para a distinção de classes de solos relacionadas a estes ambientes de ocorrência, como por exemplo, na distinção das ordens de Gleissolos e Planossolos, atualmente feita pela forma de transição entre os horizontes superficial e subsuperficial. Estas informações podem contribuir para o desenvolvimento do SiBCS em níveis categóricos inferiores do sistema (Embrapa, 2006).

Parte dos Organossolos da RMPA tem sido utilizada para o cultivo de arroz, pastagem e hortaliças, que naturalmente exigem um aporte de insumos, principalmente adubos minerais e defensivos químicos. É possível que, na ausência de recomendação técnica, estes insumos sejam aplicados em quantidades superiores às recomendadas, resultando em maior possibilidade de contaminação do solo e lençol freático. Conforme a drenagem destes solos é plausível considerar o risco ambiental que a utilização mal planejada destes solos pode trazer. Portanto, o monitoramento das alterações impostas no solo pelas mudanças pedoambientais induzidas pode indicar a dinâmica que o solo tem seguido e permitir inferências importantes para a conservação do ambiente em concordância com a sustentabilidade da atividade agrícola. Ao mesmo

tempo, mudanças no pedoambiente podem induzir alterações em atributos morfológicos, físicos e químicos dos Organossolos, com possíveis reflexos na classificação desses solos.

Numa mesma região de estudo, isto é, num ambiente delimitado, o fator de formação clima pode apresentar menor expressão na variabilidade dos atributos de solos hidromórficos, neste caso esta variabilidade estaria mais associada a fatores como o relevo ou o material de origem, relacionados com a distribuição dos solos na paisagem.

A caracterização pedológica deve considerar também as formas de utilização desses solos, que podem, de acordo com a intensidade, influenciar na gênese dos solos hidromórficos como fator interferente antrópico.

2.3 Hipóteses

Conforme a abordagem, formularam-se as seguintes hipóteses:

a) A variabilidade dos ambientes e das características dos solos hidromórficos da região metropolitana de Porto Alegre implicam em graus diferentes de susceptibilidade a impactos ambientais, bem como diferentes aptidões para o uso agrícola;

b) Características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas, como por exemplo, textura, bases trocáveis e índices pedogênicos utilizados para solos bem drenados, são também sensíveis às alterações decorrentes dos fatores de formação, do histórico de uso e dos sistemas de manejo adotados para os solos hidromórficos, constituindo-se em indicadores sensíveis da qualidade, aptidão e do grau de degradação dos mesmos.

2.4 Objetivos

Em função das hipóteses formuladas, os objetivos desta pesquisa foram:

2.4.1 Geral

Avaliar as diferenças pedogenéticas dos diferentes tipos de solos hidromórficos, e a relação com os diferentes sistemas de uso e manejo, por meio da utilização de características indicadoras de alterações induzidas pela ação antrópica, possibilitando estimar a susceptibilidade e o potencial de uso destes.

2.4.2 Específicos

Caracterizar, de forma comparativa, solos hidromórficos de diversas classes e localidades da região estudada, em algumas situações incluídos numa mesma unidade de mapeamento em levantamentos de pequena escala, permitindo a verificação e a compreensão de variações nos seus atributos, resultantes da interação entre os solos e seus ambientes de ocorrência.

Detectar alterações relacionadas a impactos produzidos por sistemas de uso e manejo, avaliando a sensibilidade e acessibilidade da utilização de características indicadoras (cor, densidade do solo, teores de cátions, índices pedogênicos, entre outras).

2.5 Material e métodos

2.5.1 Solos e amostragem

A região de execução do trabalho está inserida entre as coordenadas 29° 45' e 30° 15' S (latitude), e 50°30' a 51°30' W (longitude). Segundo Brasil (1973), a classificação climática pelo Sistema de Köppen é "Cfa" (clima subtropical úmido sem estiagem) com temperatura média do mês mais quente acima de 22 °C, e do mês mais frio entre 3 e 18 °C. A precipitação anual varia entre 1.100 e 1.700 mm ano⁻¹, sem estação seca definida.

A vegetação das áreas de várzea tem a influência das Florestas Aluviais e Florestas de Terras Baixas, formações da região fitoecológica da Floresta Estacional Semidecidual; e das áreas de banhados (permanentemente alagadas), com influência lagunar e aluvial, pertencentes à região fitoecológica das Formações Pioneiras. As principais formações geológicas são a Itapoã e a Chuí do Pleistoceno, relacionadas ao Grupo Patos, constituídas por arenitos pouco consolidados, de coloração vermelha a amarelada, com maior participação de sedimentos silto-argilosos e materiais ferruginosos e depósitos turfáceos Holocênicos na primeira. Ao norte da área de estudo, são encontrados remanescentes das Formações Rio do Rasto, do Grupo Passa Dois, e das Formações Caturrita, Sanga do Cabral e Santa Maria, do período Triássico, relacionadas ao Grupo Rosário do Sul, formadas por arenitos, siltitos e lamitos, de colorações vermelhas, amarelas ou acinzentadas, com participação de arcóseo, na primeira, e de materiais micáceos e calcíferos, na segunda (RADAMBRASIL, 1986).

Esta pesquisa conta com 6 perfis de solos hidromórficos da Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA), localizados nos municípios de Porto Alegre, Cachoeirinha, Eldorado do Sul e Viamão. A identificação dos perfis, classificações taxonômicas dos solos conforme Embrapa (2006) e usos e manejos encontram-se no quadro 1. Os perfis 1, 2, 5 e 6 constituem solos hidromórficos sob mais de uma forma de uso ou manejo, sendo avaliados quanto aos impactos induzidos pela atividade antrópica no pedoambiente. Os perfis 3 e 4, por sua vez, foram avaliados com enfoque pedogenético, variações geográficas, variações no material de origem e grau de

hidromorfismo.

Quadro 1 – Identificação de perfis e respectivas localidades, classificação dos solos (Embrapa, 2006) e formas de uso e de manejo.

Perfil e localidade	Classificação do solo	Uso e manejo
P1 - Belém Novo, (Porto Alegre)	Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico	Pastagem seguida de pousio
P1a	Planossolo Háplico Eutrófico solódico	Arroz, sob sistema de preparo convencional (PC) (8 anos)
P2 - IRGA, (Cachoeirinha)	Gleissolo Háplico Ta Distrófico típico	Arroz (PC), seguido de pousio (8 anos)
P2a	Gleissolo Háplico Ta Distrófico típico	Arroz, sob sistema de plantio direto (12 anos)
P3 - Ponta Grossa, (Porto Alegre)	Gleissolo Háplico Ta Eutrófico neofluvisólico	Área em pousio
P4 - Ponta Grossa, (Porto Alegre)	Planossolo Háplico Eutrófico solódico	Pastagem de baixa lotação
P5 - Agropecuária Pesqueiro (Eldorado do Sul)	Planossolo Háplico Distrófico plíntico	Arroz (PC), em sistema de cultivo pré-germinado (10 anos)
P5a	Planossolo Háplico Alítico plíntico	Reflorestamento com eucalipto (15 anos)
P6 - Itapuã, (Viamão)	Organossolo Tiomórfico Sáprico típico	Pastagem de baixa lotação (10 anos)
P6a	Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico	Arroz (PC)(8 anos), e pousio (2 anos)

Amostras dos principais horizontes pedogenéticos foram coletadas diretamente das trincheiras abertas para as descrições morfológicas. Outra parte das amostras (complementares que serviram como repetições) foi coletada em pontos próximos (aproximadamente 100 metros), de ocorrência de um mesmo polipodon. Em alguns destes pontos de coleta, observaram-se ainda diferenças no histórico de uso e manejo da terra. Após uma descrição morfológica expedita a fim de verificar semelhanças morfológicas com o perfil original coletado, procederam-se coletas de amostras dos horizontes diagnósticos superficial e subsuperficial. Estes últimos perfis foram relacionados aos perfis originais coletados, acrescidos da letra “a” após o número (quadro 1).

As amostras de solos dos perfis 1, 3 e 4 foram coletadas na cidade de Porto Alegre, mais precisamente nos distritos de Belém Novo (perfil 1) e Ponta Grossa (perfis 3 e 4). As amostras do perfil 2 foram coletadas em área experimental do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), localizado no município de Cachoeirinha. As amostras de solo do perfil 5 foram coletadas em área pertencente à empresa agropecuária Pesqueiro, localizada no município de Eldorado. Por sua vez, as amostras de solos do perfil 6 foram coletadas em

área da colônia japonesa de Itapuã, próxima à Lagoa dos Patos, no município de Viamão.

A caracterização morfológica foi realizada conforme Santos et al. (2005). A classificação dos perfis foi feita segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), da Embrapa (2006), levando em consideração os aspectos morfológicos e os resultados obtidos nas análises de laboratório.

2.5.2 Preparo de amostras

As amostras devidamente identificadas foram transportadas do campo ao laboratório em sacos plásticos. Foi realizada a secagem das amostras em casa de vegetação e posteriormente, o destorroamento e a passagem em peneira de malha 2,0 mm para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA).

Para as análises mineralógicas e de área superficial específica foi realizada a separação das frações minerais areia, silte e argila. Para tanto, alíquotas de 50 g das amostras foram dispersadas quimicamente com NaOH 1 mol L⁻¹, sendo a fração areia coletada por peneiramento úmido (malha 0,053 mm) e a fração argila coletada por sifonamento em provetas de 1 L após a sedimentação da fração silte, conforme a Lei de Stokes. A fração argila coletada em suspensão foi floculada com HCl 1 mol L⁻¹, lavada com solução etanol/água na proporção 1:1, seca em estufa a 60 °C e moída. A fração silte remanescente nas provetas de 1 L, após processos de lavagem e sifonamento sucessivos (para descarte da água com resquícios de argila) foi coletada e seca em estufa a 60 °C. Todas as frações minerais foram armazenadas em frascos plásticos.

Parte das amostras do perfil 6 e 6a, cujos teores de COT foram superiores a 50 g kg⁻¹, foram previamente tratadas com peróxido de hidrogênio para oxidação e eliminação do excesso de MO, a fim de possibilitar análises mineralógicas.

2.5.3 Caracterização dos solos

Este primeiro capítulo inclui as análises morfológicas, físicas e

químicas, a fim de caracterizar os solos em estudo. Todas as análises presentes neste capítulo foram conduzidas nos Laboratórios de Física do Solo, Química do Solo e Mineralogia do Solo, pertencentes ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS.

2.5.3.1 Análises físicas

As análises físicas constituíram-se de: granulometria da fração TFSA; argila dispersa em água; densidade do solo e densidades das partículas, pelos métodos compilados por Embrapa (1997).

A área superficial específica (ASE, $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$) foi determinada na fração argila moída pelo método da água por pesagens da amostra após secagem e após re-adsorção de água em dessecador, conforme procedimento descrito a seguir (Quirck, 1955).

Pesou-se o vidro com a tampa (quatro casas após a vírgula, usando luvas para não depositar gordura dos dedos nos vidros) e posteriormente o conjunto com a respectiva amostra de argila (1,0000 g). Os vidros com as amostras foram colocados destampados em dessecadores com atmosfera de 0 % de umidade, obtida colocando-se uma placa de porcelana na base do dessecador com Pentóxido de Fósforo espalhado. Após um período de repouso de 12 dias, os dessecadores foram abertos e os vidros foram imediatamente tampados. Pesaram-se os vidros tampados com as amostras e em seguida colocaram-se os vidros com as amostras destampados em dessecadores, desta vez com atmosfera de 20%, alcançada colocando-se na base do dessecador uma placa de porcelana com solução saturada de acetato de potássio. Após um período de repouso de 12 dias, os dessecadores foram novamente abertos e os vidros foram imediatamente tampados e o conjunto vidro+tampa+amostra re-hidratada pesados.

Considerando que 1 molécula de água recobre $0,108 \text{ nm}^2$, calculou-se:

$$\text{ASE } \text{m}^2 \text{ g}^{-1} = n^\circ \text{ Avogadro } (6,02214 \times 10^{23}) \times 0,108 \text{ nm}^2 \times (\text{g } \text{ \u00e1gua adsorvida/g amostra})$$

2.5.3.2 Análises químicas

2.5.3.2.1 Análises de pH e elementos do complexo sortivo

As análises químicas de rotina incluíram: pH em água e em KCl (Embrapa, 1997); teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} extraídos por KCl 1mol L^{-1} e determinados por espectroscopia de absorção atômica; teores de Na^+ , K^+ e fósforo disponível, extraídos por Mehlich-1; sendo a quantificação de Na^+ e K^+ feita em espectrofotômetro de chama, e teor de P em colorímetro; acidez a pH 7 (H^+ e Al^{3+}), extraída com acetato de cálcio a pH 7 e determinada por titulação; condutividade elétrica da pasta saturada. A partir destes resultados, foram calculados a Capacidade de Troca de Cátions (T); Soma de Bases (SB), Saturação por Bases (V), Saturação por Alumínio (m) e Percentagem de Sódio trocável (PST).

2.5.3.2.2 Carbono orgânico total

A determinação do carbono orgânico total (COT) do solo foi realizada em amostras de 0,3 g de TFSA, em triplicata, após moagem em gral de ágata ($\varnothing < 0,1 \text{ mm}$), por combustão seca em analisador de carbono SHIMADZU 500 (TOC), onde o CO_2 gerado é quantificado em detector de infravermelho.

2.5.3.2.3 Características químicas indicadoras da mineralogia

Foram realizadas dissoluções seletivas dos minerais óxidos de ferro. Os teores de ferro relativos a totalidade dos óxidos de ferro pedogênicos (Fed) foram extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio a $80 \text{ }^\circ\text{C}$, em duas extrações sucessivas (Mehra e Jackson, 1960; Inda Junior e Kämpf, 2003). Os teores de ferro referente aos óxidos de baixa cristalinidade (Feo) foram extraídos com solução de oxalato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 3, no escuro (Schwertmann, 1964). Ambos extratos solubilizados de ferro foram determinados por espectroscopia de absorção atômica. A partir dos

resultados dos teores de ferro dos óxidos, foi calculado o índice de cristalinidade dos óxidos de ferro através da relação Fe_o/Fed , utilizado como indicador pedoambiental.

Os elementos do ataque sulfúrico, como os teores de SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , K_2O , P_2O_5 e MnO_2 foram extraídos por meio de ataque sulfúrico e determinados por espectroscopia de absorção atômica (Mn, Fe e Al), espectrofotometria de chama (K) e colorimetria (Si e P). De posse destes resultados, foram calculados os índices K_i (SiO_2/Al_2O_3), K_r ($SiO_2/Al_2O_3 + Fe_2O_3$) e Fe_o/Fe_t , indicadores do grau de intemperismo e da mineralogia da fração argila dos solos.

Todas estas análises foram realizadas na fração TFSA dos solos.

2.6 Resultados e discussão

A descrição morfológica dos solos, juntamente com os resultados das análises físicas e químicas, permitiu a classificação dos perfis de solo conforme o SiBCS (Embrapa, 2006) (Quadro 1). No caso do P6 (Organossolo Tiomórfico Sáprico típico), sua classificação no segundo nível categórico foi realizada com base no forte odor de gás sulfídrico, indicativo da presença de enxofre, e na acidez acentuada, embora não tenham sido realizadas análises para definição de ocorrência de material sulfídrico. Não se pode descartar que a classificação destes solos hidromórficos possa ser alterada, com base nas mudanças induzidas pelo uso e manejo dos solos.

2.6.1 Características morfológicas

Os solos mostraram, em geral, sequências de horizontes genéticos A-B-C, em alguns casos com presença de horizontes E, evidenciando um maior grau de desenvolvimento e distinção entre os horizontes do perfil do solo (Quadro 2). As exceções foram os perfis 3 e 6, onde se observaram, respectivamente, a sequência A-C, e a presença de horizontes hísticos (H1, H2 e H3) que se prolongam até o limite da profundidade de descrição. Estes perfis têm, como diferencial, um regime hídrico caracterizado pela maior influência do lençol freático, constituindo um fator limitante para a maior expressão na diferenciação de características como estrutura, bem como para o desenvolvimento de processos pedogenéticos outros além do hidromorfismo e paludização (este último no P6).

Quadro 2 – Descrição morfológica dos perfis estudados (para maiores detalhes, consultar o Apêndice 1, páginas 102 a 108)

Hor.	Prof. (cm)	Cor	Classe textural	Estrutura	Consistência	Transição
P1 (Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico)						
A	0-18	bruno escuro (10YR 3/3)	arg. a mto. arg.	mod. pq. a md. bl. ang.	firme; pl. e pj.	clara e ondulada
B	18-43	bruno acinz. mto. escuro (10YR 3/2) e mosq. (5YR 5/8)	arg. a mto. arg.	mod. md. bl. ang.	lig. pj. a pj. e pl.	clara e plana
BC	43-60	bruno-averm.-escuro (5YR 3/2) e mosq.. (10YR 6/6)	arg.	maciça	fv.; pj. e pl.	Clara plana
C	60-80+	bruno-averm.-escuro (5YR 3/2) e mosq. (10YR 6/6)	arg.	maciça a gr. bl. subang	firme; pj. e pl. (slickensides)	
P2 (Gleissolo Háptico Ta Distrófico típico)						
Ap	0-5	bruno escuro (7,5 YR 4/2)	frco.-arg.	mod. pq. a md. bl. subang	lig. dura, firme, pl. e pj.	plana e clara
A1	5-23	bruno acinz. escuro (10 YR 4/2)	frco. arg.	fr. gr. bl. subang a maciça	dura, fv., pl. e pj.	clara e plana
B	23-40	bruno acinz. escuro (10 YR 4/2); mosq. (7,5 YR 4/6)	frco. arg.	mod. gr. bl. subang	mto. fv., pl. e pj.	gradual e plana
Bg1	40-76	bruno acinz. (10 YR 5/2); mosq. (10 YR 5/6)	argila	mod. a forte gr. prism.	mto. fv., mto. pl. e pj.	gradual e plana
Bg2	76-95+	bruno acinz. (10 YR 5/2); mosq. (10 YR 5/6)	argila	mod. a forte gr. prism.	lig. firme, mto. pl. e pj.	
P3 (Gleissolo Háptico Ta Eutrófico neofluvíssólico)						
A1	0-13	cinza escuro (2,5Y 4/1), mosq. (5YR 4/4)	frco. arg.	fr. mto. gr. bl. subang	fv., lig. pl. e lig. pj.	Clara e ondulada
Cg1	18/22- 35	cinza escuro (2,5Y 4/1), mosq. (5 YR 4/4)	frco. arg.	fr. mto. gr. bl. subang a maciça	fv., não pl. e não pj.	clara e plana
2Cg2	35-70	variegado cinza (2,5Y 5/1), cinza claro(2,5Y 6/2), branco (5YR 8/1)	frco. arg. casc.	maciça	solta a mto. fv.; não pl. e não pj.	clara e plana
3Cg3	70-90+	cinza escuro azulado (3/10 BG)	frco. arg.	maciça	fv.; lig. pl. e não pj.	

Quadro 2b (continuação) – Descrição morfológica dos perfis estudados.

Hor.	Prof. (cm)	Cor	Classe textural	Estrutura	Consistência	Transição
P4 (Planossolo Háptico Eutrófico solódico)						
Ap	0-7	bruno escuro (10 YR 3/3)	frco. arenosa	mod. pq. granular	fv.(úmida), lig. pl. pj.	Clara plana
A	7-23	bruno am. escuro(10YR 4/4); mosq. (7,5YR 5/8)	frco. argilo-arenosa	mod. md. a gr. bl. subang	Fv., lig. pl. e pj.	clara ondulada
AB	23-50/54	bruno acinz. escuro (10YR 4/2), mosq. (7,5YR 5/8)	frco. arg.	mod. md. bl. subang	pl. e pj.(molhada)	abrupta ondulada
Btg	50/54-90+	cinza mto. escuro (10YR 3/1), mosq. (2,5YR 4/8 e 10YR 6/8)*- plintita	argila (cer.)	mod. md. a gr. prism. e bl. subang	firme, pl. e pj.	
P5 (Planossolo Háptico Distrófico plíntico)						
Ap	0-24	bruno oliváceo escuro(2,5Y 3/3), mosq. (10R 4/6)	frco.	mod. md. bl. subang e granular	mt. fv., lig. pl., não pj.	Clara plana
A	24-29/32	bruno acinz. escuro(10YR 4/2)	frco. arg.	mod. md. , bl. ang..	firme, pl. e pj.	clara ondulada;
E	29/32-60	bruno (7,5YR 4/2)	frco. a frco. arg.	mod. md. a gr. bl. subang	firme, pl. e pj.	gradual plana
EB	60-85	bruno (7,5YR 4/2), mosq. md. comum bruno forte (7,5YR 5/6)	frco. arg. a argila	mod. md. a gr. bl. subang	firme , pl. e pj.	clara e plana
Btg	85-120 +	cinza escuro (10YR 4/1) mosq (7,5YR 5/8 e 2,5 YR 4/8)* - plintita	argila a mto. arg.	mod. md. a gr. bl. subang	firme, pl. e mto. pj.	
P5a (Planossolo Háptico Alítico plíntico)						
A	0-25	bruno(10YR 4/3)	frco. a frco. arg.	granular a mod. md. bl. subang	fv., lig. pl., não pj.	
E	25-55	bruno am. (10 YR 5/4)	frco. a frco. arg.		fv., lig. pl. e lig. pj.	
BE	55-70	bruno(10 YR 5/3), mosq. (2,5YR 4/6)	frco. arg. a argila		firme, pl. e pj.	
Btg	70-90+	bruno (10YR 5/3), mosq. (2,5YR 4/8)	argila		firme, pl. e pj.	

Quadro 2c (continuação) – Descrição morfológica dos perfis estudados.

Hor.	Prof. (cm)	Cor	Classe textural	Estrutura	Consistência	Transição
P6 (Organossolo Tiomórfico Sáprico típico)						
H1	0-22	preto (2,5/N),	orgânico	mod. md. grumosa	lig. firme, não pl., não pj.	Clara plana
H2	22-46	preto (2,5/N)	orgânico	fr. md. grumosa	fv., lig. pl. e lig. pj.	gradual plana
H3	46-100+	preto (2,5/N)	orgânica	maciça	fv. lig. pl. e lig. pj.	
P6a (Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico)						
A	0-50	preto (2,5/N)	frco. arenosa		fv. , lig. pl. e lig. pj. pl.	
AB	50-90	preto (2,5/N)	frco. arg.		fv., lig. pl. e lig. pj.;	
Btg	90-150	bruno acinz. escuro(10 YR 4/2), mosq. (7,5 YR 5/8)	arg. a mto. arg.		firme, pl. e pj..	
Cg	150-170+	cinza brunado claro (10 YR 6/2), mosq. (10 YR 5/8)	frco. argilo arenosa		lig. firme, lig. pl. e lig. pj.	

Hor.: horizonte; Prof.: profundidade; mosq.: mosqueados; md: média; pq.: pequeno; frco.: franco, franca; fr.: fraco; mod.: moderada; gr: grande; bl.: blocos; subang: subangulares; prism.: prismática; n: não; fv.: friável; pj: pegajoso; pl.: plástico; lig.: ligeirmanete; trn.: transição; abd.: abundante; ond.: ondulado; cer.: cerosidade; pc: pouco; arg.: argiloso; verm.: vermelho; am.: amarelado; averm.: avermelhado; acinz.: acinzentado.

O P6a (Gleissolo Melânico) sob cultivo de arroz por um período de 8 anos apresentou uma distribuição de horizontes distinta (A, AB, Btg, C) do perfil correspondente, localizado na mesma unidade de paisagem (P6 - Organossolo Tiomórfico, sob pastagem), tendo apresentado maior desenvolvimento pedogenético, apesar da semelhança das áreas em termos de relevo.

Apesar de pedogeneticamente diferentes, é possível que a drenagem mais efetiva e a utilização mais intensiva do P6a sob cultivo de arroz tenham acentuado estas diferenças morfológicas em comparação ao P6 sob pastagem. Num primeiro momento, a drenagem para o cultivo de arroz pode ter ocasionado a subsidência do material orgânico original, reduzindo a espessura do horizonte superficial, conforme verificado por Witte (1990). Em seguida, o maior fluxo de água decorrente da drenagem favoreceu processos de lixiviação e eluviação, e conseqüentemente a gênese de horizontes mais desenvolvidos.

A cor escura e/ou acinzentada dos solos é característica de solos hidromórficos. O predomínio de cores mais amarelo brunadas é um indicativo da presença de ferrihidrita, o que poderia ser constatado posteriormente pelos teores de Fe_0 (Schwertmann, 1964). Os perfis 1, 4, 5 e 5a apresentaram cores ligeiramente mais cromáticas (croma 3) em superfície. No caso do horizonte Btg do P5a (Planossolo Háptico sob reflorestamento de eucalipto), a coloração ligeiramente mais cromática (bruna) indica um grau de hidromorfismo menor, em decorrência da drenagem permanente deste solo há pelo menos 15 anos. Por sua vez, a coloração brunada do horizonte Btg do P5a pode estar relacionada com a ocorrência do óxido de ferro goethita, e com o aumento do teor de Al em profundidade. O tipo de cobertura do solo, neste caso o eucalipto, parece ter uma influência limitada no regime hídrico do solo, pelo sistema radicular atuar nas camadas mais superficiais, inclusive sem diferir de outros tipos de cobertura, como por exemplo, uma floresta nativa ou uma pastagem (Leite et al., 1997). Outra evidência do menor grau de hidromorfismo no P5a é a presença de mosqueados com matiz mais vermelho (2,5 YR) e com maiores valores de croma. Estas feições morfológicas indicam a ocorrência de períodos de oscilação do lençol freático, comum aos dois perfis de Planossolo, porém com cores mais vivas no P5a, sob o uso de reflorestamento com eucalipto.

A estrutura dos solos, em geral, apresentou um grau de

desenvolvimento moderado a forte, geralmente em blocos ou prismática (P2), para os horizontes subsuperficiais. Esta feição pode indicar, de forma associada, a ocorrência de períodos de umedecimento e secagem no regime hídrico destes solos, resultando em desenvolvimento e diferenciação de unidades estruturais bem definidas (Brady & Weil, 2002). Verificou-se, também, uma consistência no mínimo ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, indicando a influência da textura franco arenosa ou mais argilosa, com participação expressiva da fração silte.

2.6.2 Características físicas

A distribuição granulométrica nos perfis estudados tem um padrão bem definido, caracterizado pelo incremento gradual de argila em subsuperfície, (Quadro 3). No P1 e P1a, a distribuição granulométrica se distinguiu entre os usos, com maior incremento de argila expresso pela relação textural B/A, verificado no perfil sob cultivo de arroz em sistema de preparo convencional (P1a). Esta maior relação textural B/A (3,5), comparativamente a do perfil sob pousio (1,5), caracterizou a ocorrência de mudança textural abrupta, que associada com a estrutura em blocos angulares e o matiz 10YR 3/2, definiram a presença de horizonte B plânico (Embrapa, 2006). Possivelmente, o desenvolvimento da mudança textural abrupta foi ocasionada pela perda de argila em superfície, devido ao cultivo de arroz em sistema de preparo convencional com preparo intensivo do solo através de aração e gradagens e com períodos de alagamento e drenagem durante o ciclo da cultura (Nunes et al., 2002; Pauletto et al., 2004). Gradientes texturais expressivos também foram observados nos perfis 4, 5 e 5a.

Os perfis 2 e 5 apresentaram teores elevados de silte, cujos valores variaram de 400 a 523 g kg⁻¹ e 359 a 568 g kg⁻¹ solo, respectivamente. Estes valores são um possível indicativo da origem sedimentar fluvial e coluvial do material, e do baixo grau de intemperismo deste material.

Quadro 3 – Principais características físicas dos perfis estudados.

Hor.	argila natural	argila	silte	areia fina	areia grossa	areia	GF	silte/argila	Dens. Part.	Dens. Solo	Poros.	ASE
	----- g.kg ⁻¹ -----						-- % --	----- g.cm ⁻³ -----		-- % --	- m ² g ⁻¹ -	
P1 (Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico)												
A	185	260	410	291	39	330	28,8	1,6	2,38	1,38	42,2	29,6
B	315	400	373	179	49	228	21,4	0,9	2,41	1,42	40,9	53,3
BC	245	290	339	183	188	371	15,5	1,2		1,41		36,7
C	238	310	318	328	44	372	23,2	1,0				47,0
P1a (Planossolo Háplico Eutrófico solódico)												
A	79	112	436	435	18	453	29,1	3,9				6,5
B	260	393	359	192	57	249	33,8	0,9				
C	165	355	320	295	31	326	53,7	0,9				
P2 (Gleissolo Háplico Ta Distrófico típico)												
Ap	69	187	493	283	37	320	63,0	2,6	2,47	1,62	34,5	6,1
A	102	205	495	279	21	300	50,5	2,4	2,52	1,77	29,8	7,4
AB	117	220	510	24,9	21	270	46,8	2,3		1,64		6,1
Bg1	206	260	523	212	5	217	20,8	2,0		1,67		3,9
Bg2	217	265	455	267	13	280	18,3	1,7	2,51	1,76	29,9	7,4
P2a (Gleissolo Háplico Ta Distrófico típico)												
Ap	95	185	400	37,5	40	415	48,6	2,2	2,48	1,29	48,0	12,3
A		168	507	30,1	25	326		3,0	2,50	1,79	28,4	11,1
Bg2	206	275	479	19,2	23	215	25,3	1,7		1,79		
P3 (Gleissolo Háplico Ta Eutrófico neofluvissólico)												
A		96	222	650	33	682		2,3	2,49	0,94	62,4	
Cg1		70	70	847	13	860		1,0				
3Cg3		65	353	458	188	582		5,4	2,53			

Quadro 3b (continuação) – Principais características físicas dos perfis estudados.

Hor.	argila natural	argila	silte	areia fina	areia grossa	areia	GF	silte/argila	Dens. Part.	Dens. Solo	Poros.	ASE
	----- g.kg ⁻¹ -----						-- % --	----- g.cm ⁻³ -----		-- % --	- m ² g ⁻¹ -	
P4 (Planossolo Háplico Eutrófico solódico)												
Ap	84	144	440	244	172	415	41,8	3,1	2,48	1,51	39,0	
A	159	160	399	179	263	441	0,6	2,5	2,53			
AB	190	280	310	147	263	410	32,1	1,1	2,48	1,49	36,6	
Btg	339	420	257	125	198	324	19,2	0,6	2,48	1,42	43,0	
P5 (Planossolo Háplico Distrófico plíntico)												
Ap	128	153	568	253	27	279	16,5	3,7	2,50	1,38	44,8	13,8
A	83	149	441	371	40	410	44,4	3,0	2,50			5,8
E	79	160	504	307	30	336	50,9	3,2	2,53			11,9
Btg	233	355	359	246	40	286	34,3	1,0	2,59	1,36	47,5	34,3
P5a (Planossolo Háplico Alítico plíntico)												
A	73	140	415	394	51	434	47,6	3,0	2,38	1,20	49,5	9,9
Btg	159	326	376	271	27	298	51,3	1,2	2,59			
P6 (Organossolo Tiomórfico Sáprico típico)												
H1	7									0,26		
H3	7									0,14		
P6a (Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico)												
A	60	137	244	281	338	619	56,3	1,8	2,00	1,15	42,7	29,4
Btg	176	245	102	250	403	654	28,2	0,4	2,54			25,0

Nos perfis 3 e 6 foram verificados os maiores teores de areia, com valores variando de 582 a 860 g kg⁻¹ e 619 a 654 g kg⁻¹ solo, respectivamente. Estes solos, apresentam influência fluvial por meio de deposições do Lago Guaíba (no caso do P3) e influência lagunar da Lagoa dos Patos (no caso do P6 e P6a), evidenciando a ocorrência de fluxos fluviais de maior energia no transporte de material mais grosseiro, conforme também constatado por Souza Junior et al. (2007) em sedimentos do litoral paulista.

A relação silte/argila, índice auxiliar na avaliação do grau de intemperismo do solo, em geral apresenta valores maiores que 1,0, e com tendência de diminuição em profundidade (menores valores para os horizontes subsuperficiais). Estes valores altos podem indicar uma presença considerável de minerais primários intemperizáveis. A disparidade nos valores da relação silte/argila nos horizontes do P3, pode ser decorrente da proximidade desse pedoambiente com o leito fluvial, com influência de deposições mais recentes e um aporte diferenciado de materiais.

A densidade do solo foi determinada em diferentes horizontes dos solos. No P2a, sob cultivo de arroz em sistema de plantio direto, foi verificada uma diferença expressiva entre as profundidades, com aumento de 1,29 para 1,79 g cm⁻³ a partir do horizonte A (5 cm de profundidade). Já no P2, sob pousio durante 8 anos, os valores de densidade foram altos e relativamente uniformes ao longo do perfil (Quadro 3b). Lima et al. (2008) obtiveram resultados semelhantes num Planossolo cultivado com arroz em sistema de plantio direto, onde afirmaram que este fato deveu-se ao acúmulo das pressões exercidas no trânsito de máquinas e à ausência de mobilização do solo com grade aradora e niveladora. No P2a, o cultivo de arroz em sistema de plantio direto parece estar diminuindo a densidade da camada superficial pouco espessa. Provavelmente o manejo dos resíduos da cultura de arroz na camada mais superficial, associado à ausência de mobilização do solo, tenha relação direta com a densidade do solo, embora comparativamente ao mesmo solo sob pousio, não houve diferença em teor de COT (Quadro 4).

Independentemente do uso do solo, no Gleissolo Háptico (P2 e P2a) os valores elevados de densidade do solo em subsuperfície, entre 1,64 e 1,79 g cm⁻³, estão associados às estruturas prismáticas grandes que apresentam, geralmente, menores valores de porosidade. Resultados similares foram

encontrados por Oliveira et al. (2003) e Alves et al. (2005) em Planossolos nas regiões do Sertão e Agreste nordestino, respectivamente. Nestes dois casos houve influência bastante marcante da descontinuidade litológica. Após a drenagem, prática comum do cultivo de arroz inundado, períodos de secagem do solo podem ter contribuído em parte para a formação de macroestruturas mais desenvolvidas nos Gleissolos.

No Organossolo (P6) a baixa densidade do solo ($0,26$ e $0,13$ g cm⁻³) refletiu a sua constituição orgânica. No P6a, sob o cultivo de arroz, verificou-se maior valor de densidade do solo ($1,15$ g cm⁻³), que embora não limite o desenvolvimento da cultura, expressa de maneira drástica o efeito do uso intensivo do solo, num período de tempo relativamente curto (8 anos). Os processos de contração e oxidação do material orgânico, pela perda de água, resultaram em taxas aceleradas de perda de CO e a redução da espessura dos horizontes superficiais, principalmente na fase inicial (primeira drenagem e início dos cultivos).

No P3, a baixa densidade do solo ($0,94$ g cm⁻³) pode indicar o efeito do aporte contínuo de material orgânico sedimentar, uma vez que o conteúdo de argila no horizonte superficial desse perfil foi baixo.

A área superficial específica apresentou maiores valores nos horizontes subsuperficiais dos solos hidromórficos. Este resultado está de acordo com o incremento de argila em subsuperfície verificado na maioria dos solos, principalmente no P5, cujo gradiente textural do horizonte Bt é expressivo. No P6a, apesar do teor de COT do horizonte A ser 10 vezes superior ao teor de COT do horizonte Bt (quadro 4), os valores de área superficial específica nestes horizontes foram similares, o que sugere a maior contribuição dos minerais, em particular a fração argila, na quantidade de sítios de reação deste solo.

De modo geral, as características físicas demonstram, aparentemente, a influência do material de origem destes solos e dos seus processos pedogenéticos (gleização, paludização e participação da lessivagem). Apenas a densidade do solo, conforme verificada no P2a (Gleissolo Háplico Ta Distrófico típico) e no P6a (Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico), parece ter relação mais estreita com as mudanças pedoambientais induzidas pelo manejo. O relevo plano destes ambientes,

possivelmente, contribui para limitar o efeito do uso e do manejo em outros processos de degradação, como a erosão.

Lima et al. (2008) avaliaram a influência de manejos nas características físicas de um Planossolo cultivado com arroz e verificaram que a densidade do solo, a condutividade hidráulica e o diâmetro médio ponderado de agregados indicaram, de maneira sensível, as mudanças induzidas no solo pelos sistemas de manejo em comparação à condição natural (campo nativo). No presente trabalho as características físicas indicaram, com algumas limitações, o efeito de mudanças induzidas pelo uso e pelo manejo dos solos. Por outro lado, sua determinação é imprescindível para a compreensão da gênese de solos hidromórficos e de como ela influencia nas características originais destes ambientes, sobretudo em aspectos como a textura do solo.

2.6.3 Características químicas

A caracterização química dos perfis de solos hidromórficos encontra-se no quadro 4.

De forma geral, os solos apresentaram reação fortemente ácida, a maioria deles com pH variando entre 4,3 e 5,3. O P1, sob pastagem seguida por um período de pousio, apresentou valores de pH entre 4,3 e 4,9, enquanto que o P1a, sob arroz em sistema de preparo convencional, valores de pH praticamente neutros, em torno de 6,8 e 7,5. Estes valores elevados de pH evidenciam a influência do manejo da fertilidade do solo, através de práticas como a aplicação de corretivos para o cultivo de arroz. Nos perfis 6 e 6a, os valores de pH foram extremamente baixos, variando de 4,1 a 4,5, sem haver distinção entre usos diferenciados do solo. Os principais fatores, neste caso, são o caráter orgânico, com altos teores de H^+ contribuindo para a acidez deste solo, e especificamente no P6, o caráter tiomórfico, caracterizado pela formação de ácido sulfúrico durante a oxidação do perfil do Organossolo. A ausência ou insuficiência de práticas corretivas da acidez do solo sob arroz pode se constituir num fator secundário.

Quadro 4 – Principais características químicas dos perfis estudados.

Hor.	pH H ₂ O	COT	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H+Al	CTC	P	m	PST	V
		g kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹						mg L ⁻¹	%			
P1 (Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico)													
A	4,9	14,25	3,2	3,1	0,18	0,25	1,5	7,1	13,83	3,4	18	1	49
B	4,7	6,09	2,6	5,0	0,41	0,20	5,8	10,4	18,61	2,7	41	2	44
BC	4,3	3,48	2,5	4,7	0,39	0,17	4,8	5,9	13,66	2,5	38	3	57
C	4,5	2,32	2,9	6,2	0,71	0,19	4,4	8,4	18,40	2,5	31	4	54
P1a (Planossolo Háptico Eutrófico solódico)													
A	6,8	4,39	2,1	2,0	0,29	0,13	0	0,7	5,22	8,5	0	6	87
B	7,0	1,16	3,7	6,8	1,84	0,23	0	0,7	13,27	3,2	0	14	95
C	7,5	0,58	3,6	6,1	2,70	0,33	0	0,5	13,23	3,4	0	20	96
P2 (Gleissolo Háptico Ta Distrófico típico)													
Ap	5,1	11,00	1,3	0,9	0,04	0,06	0,6	3,6	6,06	19,5	19	1	39
A	5,4	7,06	1,6	0,9	0,05	0,05	0,6	3,0	5,67	13,9	19	1	47
AB	4,9	3,9	2,4	0,8	0,05	0,03	0,5	3,6	6,84	14,1	12	1	48
Bg1	5,1	3,3	1,3	0,4	0,06	0,03	2,3	5,8	7,55	1,4	58	1	23
Bg2	4,6	1,9	0,8	0,5	0,13	0,04	2,6	6,9	8,47	0,9	64	2	17
P2a (Gleissolo Háptico Ta Distrófico típico)													
Ap	5,5	19,39	3,5	1,6	0,05	0,19	0,3	3,1	8,67	23,3	5	1	62
A	5,2	21,86	2,0	0,7	0,05	0,07	0,5	3,8	6,56	10,2	15	1	42
Bg2	4,7	2,1	0,5	0,3	0,10	0,05	4,0	9,8	10,57	0,7	81	1	9
P3 (Gleissolo Háptico Ta Eutrófico neofluvíssólico)													
A	5,1	25,25	13,5	7,7	0,62	0,13	0,5	4,9	26,93	5,2	2	2	82
Cg1	5,7	3,5	19,5	11,6	1,11	0,10	0,0	1,0	33,31	4,0	0	3	97
3Cg3	5,4	10,7	14,5	6,1	0,80	0,36	0,3	5,6	27,36	9,8	1	3	80
P4 (Planossolo Háptico Eutrófico solódico)													
Ap	5,0	34,36	2,6	2,9	0,31	0,31	1,6	3,1	9,18	7,9	21	3	66
A	4,8	4,64	1,3	1,5	0,16	0,18	1,6	6,0	9,09	2,7	34	2	34
AB	5,1	5,2	1,4	2,6	0,43	0,17	4,3	7,4	12,00	1,3	48	4	38
Btg	5,0	4,4	3,0	7,8	1,49	0,23	5,6	9,9	22,42	2,2	31	7	56
P5 (Planossolo Háptico Distrófico plíntico)													
Ap	4,9	11,75	2,0	0,7	0,10	0,21	0,5	5,2	8,21	0,1	14	1	37
A	5,8	4,82	2,8	1,3	0,12	0,17	0,0	2,4	6,64	13,5	0	2	65
E	6,5	4,1	2,6	1,7	0,33	0,36	0,0	2,4	7,39	3,1	0	5	68
Btg	4,9	3,7	2,1	2,0	0,55	0,24	2,9	7,0	11,89	2,0	38	5	41
P5a (Planossolo Háptico Alítico plíntico)													
A	4,8	14,48	1,6	0,9	0,06	0,27	1,2	7,0	9,73	6,1	31	1	28
Btg	4,9	3,5	0,4	0,7	0,30	0,12	6,1	9,8	11,35	3,0	80	3	13
P6 (Organossolo Tiomórfico Sáprico típico)													
H1	4,1	410,10	7,1	5,0	0,30	0,20	3,7	51,8	64,40	6,8	23	1	20
H3	4,3	453,00	7,8	7,2	0,55	0,10	3,3	57,8	73,37	5,0	17	1	21
P6a (Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico)													
A	4,5	49,09	1,4	0,9	0,23	0,16	3,9	15,8	18,53	14,0	59	1	15
Btg	4,4	4,8	2,6	3,7	0,30	0,10	2,8	5,6	12,33	1,9	30	3	54

COT: carbono orgânico total; CTC: capacidade de troca de cátions; m: saturação por alumínio; PST: percentagem de sódio trocável; V: saturação por bases.

Os teores de COT foram acima de 10 g kg^{-1} para os horizontes superficiais em quase todos os solos. Naqueles solos com uso mais intensivo e de maior duração foram verificados menores teores de COT em relação aos seus comparativos de uso menos intenso. Maiores diferenças nos teores de COT foram verificadas entre o P1 e o P1a que, apresentaram valores de $14,25 \text{ g kg}^{-1}$ e $4,39 \text{ g kg}^{-1}$ de solo, respectivamente. O excesso de revolvimento por ocasião do preparo do solo para a implantação da cultura de arroz pode ter contribuído para elevar as perdas de CO, cuja oxidação é favorecida nesse processo (Bayer e Mielniczuk, 2008). No P6, os teores elevados de COT ($410,10$ e $453,00 \text{ g kg}^{-1}$ de solo) são característicos do processo de paludização, que determinou o acúmulo de MO e restrição à sua decomposição. No P6a, sob cultivo de arroz em sistema de preparo convencional, os teores de COT foram drasticamente menores, com valor de $49,09 \text{ g kg}^{-1}$ no horizonte superficial, o que permite inferir que o uso deste tipo de solo representa um impacto de grande proporção no seu ambiente de ocorrência. Esta redução no teor de COT tem consequências ecológicas e também na classificação do solo. Sob o ponto de vista ambiental, o uso intensivo de solos paludizados pode aumentar a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera.

Com relação à classificação taxonômica do solo, o SiBCS define como Organossolo, solos constituídos por material orgânico com teor de COT maior ou igual a 80 g kg^{-1} de TFSA, com horizonte hístico com espessura de 40 cm ou mais. Por esta razão o P6a, sob cultivo de arroz, se enquadrava em outra classe de solos, a dos Gleissolos Melânicos, já que o teor de COT e a espessura são inferiores aos limites requeridos para Organossolo.

A CTC mostrou ampla variação entre os solos amostrados, de $5,22$ a $73,37 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. No P6, com valores de CTC de até $73,37 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, percebe-se a participação dos teores elevados de COT com predomínio do H^+ no complexo de troca. Este fato ocorreu com menor expressão no P6a, sob cultivo de arroz. Já no P3, mantido sob pousio, os valores de CTC entre $26,93$ e $33,31 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ parecem estar associados com a natureza dos sedimentos aportados por ocasião das cheias. Os horizontes subsuperficiais apresentaram valores de CTC que permitiram caracterizar em todos os solos a alta atividade da fração argila (CTC x $1000/\text{g kg}^{-1}$ de argila > $27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila), sendo

este mais um indício do baixo grau de intemperismo desses pedoambientes (Embrapa, 2006).

A CTC mostrou ampla variação entre os solos amostrados, de 5,22 a 73,37 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$. No P6, com valores de CTC de até 73,37 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, percebe-se a participação dos teores elevados de COT com influência do H^+ no complexo de troca. Este fato ocorreu com menor expressão no P6a, sob cultivo de arroz. Já no P3, mantido sob pousio, os valores de CTC entre 26,93 e 33,31 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ parecem estar associados com a natureza dos sedimentos aportados por ocasião das cheias. Os horizontes subsuperficiais apresentaram valores de CTC que permitem caracterizar a alta atividade da fração argila ($\text{CTC} \times 1000/\text{g} \text{kg}^{-1}$ de argila $> 27 \text{ cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de argila), sendo este mais um indício do grau de intemperismo pouco evoluído nestes solos (Embrapa, 2006).

Os valores de V foram elevados em subsuperfície para a maioria dos solos. Nos perfis 1 e 1a, os valores de V foram suficientes para o enquadramento como eutrófico em 3º nível categórico. Com relação aos usos distintos, o P1a sob cultivo de arroz apresentou valores mais elevados de V, entre 87 e 97 %, sendo estes valores consequência das adições de cátions através das práticas de adubação e calagem, realizadas anualmente. O P2a, sob cultivo de arroz em sistema de plantio direto, apresentou um maior valor de V em superfície (62 %), o que pode estar relacionado à ausência de mobilização do solo, limitando a homogeneização do perfil do solo, que por outro lado ocorreu no P2, que antes do período de pousio foi cultivado com arroz em sistema de preparo convencional. No P5, maiores valores de V foram obtidos sob cultivo de arroz (entre 37 e 68 %), decorrentes das práticas mais freqüentes de adubação e calagem do solo. Sob reflorestamento de eucalipto, o P5a apresentou valores de V menores (28 e 13 %), possivelmente devido ao próprio histórico de uso e manejo, com pouca ou nenhuma manutenção dos níveis de fertilidade do solo. Durante este período (15 anos), o sistema radicular do eucalipto, através da absorção, pode ter aumentado o distrofismo na camada subsuperficial. Outro fator associado a este solo é a maior drenagem, que apesar de facilitar uma maior absorção de água e nutrientes, também permite uma maior lixiviação de nutrientes.

O caráter solódico ocorreu no P1a, cujos valores de percentagem de sódio trocável (PST) no complexo de troca aumentaram do horizonte superficial

para o subsuperficial de 6 para 20 %, o que pode estar relacionado à drenagem restrita, ou talvez associado à utilização de água de irrigação com altos teores de Na. Além de a PST ser maior em profundidade, seus valores, ao longo do perfil foram superiores tanto em comparação com o mesmo solo sob pousio como em relação aos demais solos. Neste caso, a qualidade da água de irrigação poderia ser monitorada, a fim de se prevenir que o excesso de sódio não ocasione competição com o K no cultivo do arroz irrigado. O caráter solódico foi uma característica do SiBCS que permitiu a alteração da classificação deste solo em 4º nível categórico.

As características químicas foram sensíveis às mudanças induzidas pelo uso e pelo manejo dos solos hidromórficos. Em geral, o uso mais intensivo do solo foi acompanhado pela diminuição no conteúdo de MOS, e também por maiores valores de CTC e V. Estas alterações foram consequência das perdas de CO promovidas pelo preparo excessivo do solo e das adições de cátions pelas práticas de adubação e calagem, respectivamente. Em alguns casos, as mudanças no pedoambiente representaram impactos de amplitude variável, com consequências no meio ambiente, na capacidade agrícola dos solos e em características utilizadas na classificação dos solos.

2.6.4 Características químicas indicativas da mineralogia

Os resultados do ataque sulfúrico (Quadro 5), indicaram valores de Ki maiores que 2,2 em todos os horizontes subsuperficiais (B ou C). Este resultado está de acordo com a alta atividade da fração argila, constatada em todos os perfis de constituição mineral e textura franco arenosa ou mais fina, sendo mais um indicativo do baixo grau de intemperismo destes materiais, resultando em condições para preservação e/ou neoformação de minerais silicatados na fração argila (Moniz & Buol, 1982).

Alguns valores muito altos de Ki (maiores que 6,0), como os do P2 e P6a, podem ter resultado da solubilização do Si das frações silte e areia fina.

Quadro 5 – Valores de Ki e Kr, elementos do ataque sulfúrico e teores de ferro relativo aos óxidos cristalinos e de baixa cristalinidade.

Horiz.	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Ki	Kr	Fed	Feo	Feo/Fed	Fed/Fet
----- g.kg ⁻¹ -----							---- g.kg ⁻¹ ----					
P1 (Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico)												
A	0,3	17,0	0,3	6,2	50,5	133,0	4,52	3,72	3,6	0,8	0,22	0,21
B	0,2	45,0	0,3	7,0	98,5	195,5	3,40	2,79	14,7	2,5	0,17	0,33
C	0,1	25,0	0,2	6,2	82,5	178,0	3,72	2,94	3,8	0,3	0,08	0,15
P1a (Planossolo Háptico Eutrófico solódico)												
A	0,1	8,4	0,9	3,2	17,0	51,0	5,07	3,86	2,5	0,7	0,28	0,30
C	0,1	18,5	0,4	4,8	43,5	125,5	4,91	3,86	3,3	0,4	0,12	0,18
P2 (Gleissolo Háptico Ta Distrófico típico)												
Ap	0,5	5,9	0,1	3,8	17,2	71,0	6,97	5,72	2,5	1,3	0,52	0,42
A	0,6	6,8	0,1	3,9	19,0	72,5	6,50	5,29	2,5	1,7	0,68	0,37
Bg1	0,2	7,2	0,1	4,7	22,3	86,0	6,53	5,42	3,8	0,9	0,24	0,53
Bg2	0,2	20,7	0,1	5,0	34,8	115,0	5,64	4,14	13,4	0,9	0,07	0,65
P3 (Gleissolo Háptico Ta Eutrófico neofluvissólico)												
A	0,6	7,2	0,1	4,0	23,1	98,0	7,21	6,02	2,9	1,8	0,62	0,40
Cg1	0,6	90,0	1,7	3,0	31,0	142,0	7,78	2,73	12,0	3,8	0,32	0,13
3Cg3	0,6	71,5	1,5	3,1	29,5	137,5	7,93	2,81	10,8	6,4	0,59	0,15
P4 (Planossolo Háptico Eutrófico solódico)												
Ap	0,5	13,0	0,4	4,7	37,0	110,0	5,04	4,11	3,0	1,4	0,47	0,23
A	0,2	21,0	0,1	5,0	57,0	111,0	3,30	2,67	4,7	0,9	0,19	0,22
Btg	0,2	34,0	0,3	6,2	118,0	224,7	3,29	2,61	14,1	1,1	0,08	0,41
P5 (Planossolo Háptico Distrófico plíntico)												
Ap	0,4	17,0	0,2	6,7	30,5	74,0	4,14	3,05	5,5	2,8	0,51	0,32
A	0,5	11,0	0,8	5,6	21,0	61,0	4,93	3,69	4,7	1,6	0,34	0,43
E	0,1	25,0	0,1	3,6	15,0	37,0	2,11	1,38	9,7	0,8	0,08	0,39
Btg	0,1	53,7	0,3	8,2	82,8	142,0	2,91	2,06	22,3	0,9	0,04	0,42
P5a (Planossolo Háptico Alítico plíntico)												
A	0,3	11,1	0,5	5,1	20,7	55,5	4,59	3,42	4,8	1,8	0,38	0,43
Btg	0,1	41,9	0,2	8,3	70,7	135,5	3,25	2,36	15,6	0,6	0,04	0,37
P6a (Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico)												
A	0,4	52,7	0,7	3,4	25,7	111,0	7,31	3,15	0,9	1,0	1,00	0,02
Btg	0,0	30,7	0,0	2,7	49,1	144,7	5,02	3,38	1,8	1,7	0,94	0,06

Nos perfis 5 e 5a, maiores teores de Fe_2O_3 extraídos por ataque sulfúrico (Fet) foram verificados em subsuperfície (53,7 e 41,9 g kg^{-1} , respectivamente). Estes resultados estão relacionados à maior quantidade de mosqueados com grau variado de intensidade de ocorrência (Quadro 2), e de plintita nestes solos, um indicativo de manutenção do ferro no ambiente. Nos perfis 1 e 3, os teores de Fe_2O_3 apresentaram a mesma tendência de incremento de Fet em subsuperfície do P5 e P5a.

Com relação aos resultados de ferro relativo aos óxidos de ferro pedogênicos (Fed e Feo), os valores mostraram ampla variação (5,9 a 53,7 g kg^{-1}), condicionada, provavelmente, por fatores como o material de origem e a dinâmica do ferro em função do regime hídrico. Para o Fed (Fe relativo aos óxidos de ferro pedogênicos), observou-se a mesma tendência ocorrida nos teores de Fe_2O_3 extraído por ataque sulfúrico, com maiores valores no P5, entre 4,7 e 22,3 g kg^{-1} . O P2 também apresentou valores relativamente altos, resultando numa maior relação Fed/Fet, de até 0,65 no horizonte Bg2. Este resultado indica um maior grau de intemperismo do material de origem deste solo, ou uma menor influência da deposição de sedimentos pouco intemperizados. Sobre o ponto de vista pedogenético, o P2 constitui um pedoambiente mais desenvolvido. Por sua vez, os baixos valores da relação Fed/Fet no P6a (Gleissolo Melânico), 0,02 e 0,06, evidenciam a influência da deposição de sedimentos de origem lacustre, com baixo grau de intemperismo. De forma geral, os valores da relação Fed/Fet são semelhantes aos citados por Kämpf (1987), em revisão sobre a dinâmica do Fe em solos hidromórficos.

A relação dos óxidos de ferro de baixa cristalinidade pelos óxidos de ferro pedogênicos totais (Feo/Fed) constitui o índice de cristalinidade destes minerais. De uma maneira geral, os valores desta relação foram elevados em decorrência das condições hidromórficas que inibem a formação de óxidos de ferro cristalinos e favorecem a formação de óxidos de ferro de baixa cristalinidade. Os maiores valores de Feo/Fed foram obtidos nos horizontes superficiais, diminuindo com o aumento da profundidade. Esta dinâmica ao longo do perfil pode ser devido a dois fatores: em superfície a MOS pode atuar como inibidor da cristalinidade dos minerais óxidos de ferro, resultando em maiores teores de Feo (ferrihidrita) e conseqüentemente maiores valores de Feo/Fed (Kämpf e Curi, 2000); em subsuperfície, o baixo conteúdo de MOS

pode limitar a atividade microbiana na redução do ferro, contribuindo para a maior preservação de óxidos cristalinos em segregações. Esta tendência foi mais evidente no P5 e P5a, perfis com drenagem moderada. Dentre os solos hidromórficos, o Organossolo foi o que apresentou os maiores valores da relação Feo/Fed, sendo 1,00 no horizonte A e 0,94 no horizonte Btg, o que indica que grande parte dos óxidos de ferro pedogênicos apresenta baixo grau de cristalinidade, e/ou grande parte do ferro está complexado na MOS. Períodos de alagamento mais frequentes, associados ao conteúdo elevado de MOS são condições pedoambientais ideais para a formação e a estabilidade da ferrihidrita neste ambiente.

As características químicas indicativas da mineralogia do solo mostraram uma maior relação com as características do material de origem dos solos e do regime hídrico, consistindo em informações importantes para o estudo da gênese dos solos hidromórficos.

2.7 Conclusões

1. Os solos hidromórficos da região metropolitana de Porto Alegre mostraram diferenças em características morfológicas, físicas e químicas, cujos principais fatores responsáveis foram o material de origem, o grau de hidromorfismo e as alterações induzidas pelo uso e manejo dos solos;

2. Características como a alta relação silte/argila, argila de atividade alta em subsuperfície e valores de K_i elevados indicaram um baixo grau de intemperismo no material de formação destes solos;

3. O grau de hidromorfismo, avaliado por atributos como a cor do solo, teor de carbono orgânico e formas de ferro, indicou um hidromorfismo mais acentuado no Organossolo Tiomórfico (P6), e uma melhor drenagem no Planossolo Háptico (P5);

4. Propriedades químicas como a reação do solo, teor de carbono orgânico, saturação por bases, bem como grau de hidromorfismo e distribuição granulométrica parecem ser os atributos de maior suscetibilidade às alterações induzidas pelo uso e manejo, podendo constituir impactos ambientais de intensidade e escala variáveis, e implicar em alterações na classificação taxonômica dos solos;

5. A classificação taxonômica dos solos mostrou o predomínio de ocorrência de Gleissolos e variações em 3º e 4º níveis devido à ocorrência de atributos diagnósticos (eutrofismo, caráter alítico e caráter solódico) induzidos pelo uso e manejo dos solos.

3 CAPÍTULO II. ESTUDO DA MATÉRIA ORGÂNICA DE SOLOS HIDROMÓRFICOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE

3.1 Introdução

A conservação do ambiente e a sustentabilidade da atividade agrícola têm sido relacionada com a MOS, devido à influência desta nos processos que ocorrem no solo e sua sensibilidade em termos de resposta às mudanças no pedoambiente induzidas pela atividade antrópica. A diminuição dos estoques de MOS resultam na redução da fertilidade, na degradação física e na subsidência dos solos orgânicos, cujas perdas de carbono na forma de CO₂ para a atmosfera são reflexos do sistema de manejo adotado (Bayer e Mielniczuk, 2008). A redução dos teores de MOS também altera a dinâmica de elementos devido às interações organo-minerais e organo-metálicas (Stevenson, 1994). Por isso, estudos que abordam a MOS tem sido amplamente realizados em todas as áreas da Ciência do Solo, inclusive na área de gênese do solo (Conceição, 2005; Bonifacio et al., 2006; Pereira et al., 2006).

Uma vez que a MOS compreende um conjunto heterogêneo de materiais orgânicos em variados estágios de decomposição, uma forma de facilitar seu estudo são os fracionamentos físicos e químicos, cujos resultados permitem inferir sobre aspectos de sua funcionalidade e reatividade no solo (Guerra e Santos, 2008), e também através de análises espectroscópicas que fornecem informações sobre a composição estrutural da MOS, detectando a presença e a proporção de grupos funcionais específicos de carbono e possibilitando a ampliação das inferências a respeito da sua natureza.

O hidromorfismo determina uma dinâmica da MOS diferenciada comparativamente à que é observada nos solos bem drenados. Neste sentido é importante avaliar se as metodologias normalmente utilizadas para avaliação deste atributo em solos bem drenados são válidas e adequadas para solos mal drenados. A utilização de técnicas mais modernas, como a fluorescência induzida por laser (FIL), o infra-vermelho com transformada de Fourier (FTIR) e a ressonância magnética nuclear do ¹³C (RMN ¹³C-CPMAS), podem contribuir para o diagnóstico mais preciso da qualidade da MO de solos hidromórficos,

sobretudo os da região em estudo, que carecem de estudos nesta linha de pesquisa.

3.2 Revisão bibliográfica

3.2.1 Importância do estudo da matéria orgânica

A matéria orgânica do solo (MOS) pode ser definida como o conjunto dos organismos vivos e os resíduos de plantas e animais pouco ou bem decompostos, que variam consideravelmente em estabilidade, susceptibilidade ou estágio de alteração. Mais importante que a definição de MOS é sua importância na manutenção da qualidade do solo, definida como a capacidade do mesmo realizar suas funções na natureza (Doran, 1997). Concomitantemente, para entendermos o funcionamento do solo devemos incluir a dinâmica da MOS considerando os mais diversos ambientes.

Devido ao ciclo biogeoquímico do carbono possuir uma dinâmica relativamente rápida, a MOS tem sido considerada como indicador sensível de mudanças pedoambientais, decorrentes ou não da utilização antrópica do solo (Larson & Pierce, 1994). Num enfoque mais amplo, informações compartimentalizadas sobre a MOS são fundamentais para a compreensão das funções desempenhadas por esta tanto na qualidade do solo, como na qualidade ambiental. A elevada reatividade da MOS permite esta atuar como agente mitigador do efeito tóxico de metais pesados e outros contaminantes, ou em alguns casos atuar como carreador desses contaminantes para lençóis freáticos e cursos de água adjacentes, através da lixiviação.

Mais recentemente, uma vez que o carbono também contribui com os gases de efeito estufa, como CO₂ e CH₄, o seqüestro do carbono atmosférico pelo solo tem sido sugerido como ação mitigadora do efeito estufa (Bharati et al., 2001; Dieckow et al. 2004; Bayer et al., 2007; Zanatta et al., 2007; Guo et al., 2007). Via de regra, qualquer prática agrícola pode alterar o equilíbrio entre as quantidades adicionadas e as perdas de carbono, e determinar se o solo irá atuar como fonte ou dreno dos gases de efeito estufa (Silva et al., 2008).

Variações nos teores e composição química estrutural da MOS ocorrem conforme o ambiente de formação do solo, bem como seu uso e manejo (Nascimento et al., 2010). Em ambientes aeróbios como solos bem drenados a decomposição da MO é relativamente rápida, originando CO_2 , NO_3^- , SO_4^{2-} , entre outros, bem como a MOS estabilizada ou humificada. Em ambientes anaeróbios, como os solos hidromórficos, ocorre uma redução na concentração de O_2 e um decréscimo nas taxas de decomposição da MOS, originando ácidos orgânicos de caráter transitório e em condições muito redutoras a produção de CH_4 , através da fermentação. Como decorrência da decomposição diferenciada da MOS nessas condições, sua composição poderá sofrer alterações, modificando também a sua qualidade no ambiente anaeróbio. Sendo os ácidos orgânicos e o CH_4 os produtos deste metabolismo, as quantidades produzidas ou emitidas podem afetar o desenvolvimento de plantas e contribuir para o aquecimento global, respectivamente (Silva et al., 2008).

Num levantamento feito com amostras de solos hidromórficos do RS cultivados com arroz, cerca de 77,5 % possuíam teores de MO $\leq 2,5$ % (Anghinoni et al., 2004). Este dado contraria a tendência de acúmulo de MO observada em solos sob condições anaeróbias, no entanto, devido ao alagamento de solos cultivados com arroz ser sazonal, no período em que estão oxidados a decomposição da MO é predominantemente aeróbia (Silva et al., 2008).

Solos hidromórficos com teores de MO elevados, como os Organossolos, podem ser encontrados às margens das lagoas da planície costeira do RS. Quando drenados e cultivados, estes solos estão sujeitos a mudanças significativas em suas características, a começar pela subsidência causada na drenagem e pelas perdas por oxidação da MO em CO_2 com o aumento da atividade dos microrganismos aeróbios. A utilização de corretivos e fertilizantes para elevar o rendimento das culturas potencializa a biodegradação da MO de Organossolos, comprometendo a capacidade produtiva destes solos pela redução de sua vida útil (Streck et al., 2002).

A avaliação de alterações quantitativas e qualitativas da MO pode ser útil para estimar o potencial de uso dos solos e diagnosticar impactos das atividades antrópicas ao meio ambiente. Sistemas de manejo do solo, com

diferentes métodos de preparo de solo e diferentes culturas, resultam em ambientes totalmente distintos (Vargas e Scholles, 2000).

Em solos hidromórficos a variabilidade em seus atributos é mais intensa devido principalmente aos fatores de formação, como por exemplo, diferentes materiais de origem, diferentes graus de hidromorfismo, alternância entre condições oxidadas e reduzidas, bem como à intensidade de atuação desses processos. Alterações no ambiente hidromórfico correspondem a mudanças no metabolismo microbiano e conseqüentemente na dinâmica da MOS.

A maior parte das pesquisas sobre dinâmica da MOS tem sido realizada em solos bem drenados. Por esta razão, os estudos que envolvem MO de solos hidromórficos devem ser categóricos quanto às referências comparativas utilizadas e a adaptação de técnicas analíticas concebidas inicialmente para solos bem drenados.

3.2.2 Fracionamentos físico e químico da matéria orgânica do solo

Em virtude da complexidade dinâmica e estrutural da MOS, uma das maneiras de facilitar o seu estudo é através de métodos de fracionamentos físicos e químicos.

Os métodos usuais de fracionamento físico da MOS cobrem procedimentos distintos, mas que visam a separação de reservatórios funcionais e dinâmicos (Roscoe e Machado, 2002). Estes métodos relevam a distribuição espacial da MO no solo e o papel das frações minerais na estabilização e transformação da MOS, que são aspectos importantes para estudos sobre manejo de solos e qualidade da MOS (Cambardella e Elliot, 1992; Six et al., 1998; Bayer et al., 2002).

O método de fracionamento físico granulométrico separa, através de peneiramento, frações nas quais podem ser avaliados o carbono orgânico particulado e o carbono orgânico associado aos minerais (Cambardella e Elliot, 1992; Christensen, 1992; Six et al., 2002). Estas frações físicas granulométricas apresentam graus de transformação e estados de humificação bem diferenciados (por exemplo, frações mais humificadas < 53 µm e frações

menos decompostas > 53 μm). Apesar de ser amplamente utilizado para solos bem drenados, o fracionamento físico granulométrico também pode ser empregado em estudos com solos hidromórficos, verificando aspectos de labilidade, taxa de decomposição e proteção física da MO (Nascimento et al., 2009).

O método de fracionamento físico densimétrico separa três tipos de frações orgânicas com base na diferença de densidade em relação a solventes (como o politungstato de sódio, $2,0 \text{ kg L}^{-1}$): a fração leve-livre (FLL), a fração leve-oclusa (FLO) e a fração pesada (FP). A quantidade de carbono presente em cada fração é relacionada com diferentes mecanismos de estabilização da MO no solo: recalcitrância bioquímica (FLL, FLO, FP), proteção física pela oclusão no interior de agregados (FLO, FP) e interações organominerais (FP) (Conceição et al., 2008). O método de fracionamento físico densimétrico permite inferências mais específicas em comparação com o método de fracionamento físico granulométrico. Por outro lado, é mais demorado e apresenta maior custo operacional.

A metodologia de fracionamento químico da MO é utilizada em estudos sobre alterações na composição química da MOS, neste caso, representada pela MO humificada. A MO humificada compreende uma mistura de substâncias polidispersas, sem fórmula molecular definida, contendo os principais grupos funcionais do carbono, comportando-se como compostos macromoleculares de alto peso molecular (Conte e Piccolo, 1999; Dick e Martinazo, 2006). O procedimento clássico para extração e separação de substâncias húmicas (SHs) do solo utiliza como extrator o NaOH (Swift, 1996), embora estudos indiquem que este extrator possa provocar alterações orgânicas e minerais em amostras de solo (Schnitzer, 1978). As SHs extraídas das amostras de solo são separadas quanto ao comportamento em meio aquoso com diferentes níveis de pH: ácidos húmicos (AH) - fração solúvel em meio básico e que precipita em meio ácido; ácidos fúlvicos (AF) - fração solúvel tanto em meio ácido como em meio básico, e huminas (HU) - fração não-ácida insolúvel em qualquer valor de pH. Esta definição, embora operacional, permite inferir de modo mais específico sobre o comportamento químico da MOS, já que AH, AF e HU possuem diferenças na composição elementar (relação C/N, razões atômicas H/C e O/C) e na proporção de grupos funcionais da MO

(Stevenson, 1994).

Durante muito tempo, trabalhos sobre o fracionamento químico da MOS consideravam a humina como uma fração recalcitrante, associada com a incorporação de ligninas das plantas, e com um maior grau de aromaticidade. Posteriormente, diversos trabalhos demonstraram que a humina é, na verdade, composta predominantemente de hidrocarbonetos alifáticos e de compostos como lipídeos, ácidos graxos de cadeia longa, ésteres, cutinas, suberinas, carboidratos, peptídeos e apenas traços de substâncias derivadas da lignina. A preservação destas substâncias na humina é conferida pela proteção estérica de componentes apolares, que apresentam grande resistência à decomposição microbiana e, também, pela interação desses com a fração mineral coloidal dos solos. Desse modo, Hayes et al. (2010) são categóricos ao afirmar que a definição de humificação deve ser discutida e refeita.

Em solos hidromórficos, a distribuição das frações húmicas da MO pode apresentar mudanças induzidas de acordo com as diferentes formas de uso do solo. Num Planossolo Háptico cultivado com arroz sob diferentes sistemas de manejo, Rosa et al. (2008) verificaram diferenças na composição da MO, com predominância de frações húmicas com menor grau de decomposição (menor proporção de grupos alifáticos) em sistema de manejo conservacionista. Fernandes et al. (1999) também verificaram diferenças na proporção relativa das frações húmicas da MO num Espodossolo hidromórfico sob vegetação nativa e sob pastagem com diversos históricos de utilização. Nascimento et al. (2010) utilizaram o fracionamento químico da MO em solos hidromórficos de diferentes classes, observando diferenças tanto em relação aos usos distintos desses solos como também em aspectos de relevância pedogenética.

Além da importância do fracionamento químico como metodologia de avaliação da MOS, ele também tem sido utilizado como um requisito para estudos da sua estrutura química através de técnicas mais avançadas, como as técnicas espectroscópicas. Os ácidos húmicos, devido a sua estabilidade e difícil degradação, são considerados indicadores tanto da condição de gênese como de uso do solo (Zech et al, 1997). Grande parte dos trabalhos nesta linha inclui processos de purificação de ácidos húmicos e fúlvicos através de resinas e eluentes, principalmente em amostras de solos bem drenados com elevados

teores de ferro. Nos solos hidromórficos, os teores desse elemento são baixos, devido ao próprio processo pedogenético, que impede ou limita a precipitação de minerais óxidos de ferro na matriz dos solos. Para fins analíticos, isso representa uma vantagem, uma vez que possibilita o uso de diversas técnicas espectroscópicas em amostras intactas de solos hidromórficos, sem a necessidade de tratamentos prévios para a eliminação de interferentes.

3.2.3 Aplicação de técnicas espectroscópicas em estudos da matéria orgânica de solos hidromórficos

As técnicas espectroscópicas têm sido amplamente utilizadas para a caracterização da MOS. Dentre elas destacam-se a fluorescência de luz no ultravioleta-visível, a fluorescência induzida por laser, o infravermelho com transformada de Fourier, a ressonância magnética nuclear do ^{13}C e do ^1H e a ressonância paramagnética eletrônica, que fornecem informações sobre a composição da MO, a proporção de vários tipos de grupos funcionais e, em alguns casos, avaliar o grau de decomposição e humificação da MOS (Martin-Neto et al., 1991; Bayer et al., 2002; Milori et al., 2006; Gonzáles-Perez et al., 2004).

No Brasil, grande parte dos estudos envolvendo técnicas espectroscópicas na avaliação da MO tem sido realizada com solos bem drenados. Saab e Martin Neto (2007) compararam parâmetros espectroscópicos como E_4/E_6 por UV-VIS, aromaticidade por RMN ^{13}C CP-MAS e concentração de radicais livres por RPE em amostras de sete Gleissolos, obtendo resultados coerentes e complementares entre as técnicas espectroscópicas. É importante salientar que a quantidade de estudos espectroscópicos com solos hidromórficos tem sido pouco expressiva, sem abordar ainda aspectos de relevância pedológica.

A espectroscopia de fluorescência induzida por laser (FIL) constitui uma ferramenta analítica interessante para avaliar mudanças estruturais da MOS, principalmente pela possibilidade de avaliar a humificação em amostras de solo intactas, sem a necessidade de tratamentos físicos e químicos prévios, uma vez que a fluorescência tem origem na MOS (Milori et al., 2002; Milori et al., 2006). O princípio desta técnica está na excitação da MO de amostras de

solo com luz azul (~465 nm), cujas estruturas excitadas são principalmente grupos funcionais com ligações insaturadas em sistemas rígidos conjugados (tais como anéis aromáticos conjugados e/ou substituídos, quinonas, etc.), que são atribuídos à MO humificada. Assim, considera-se o sinal de emissão de fluorescência com esta excitação como proporcional ao grau de humificação da MOS. Devido à intensidade dos sinais de fluorescência variar com o teor de COT, Milori et al. (2004) propuseram como índice de humificação a razão da área integrada dos espectros de fluorescência pelo teor de COT ($H_{FIL} = AEF/COT$).

Milori et al. (2004) apresentam ainda como vantagens da FIL a simplicidade, a sensibilidade e rapidez da análise, independentemente da presença de interferentes, como o ferro, que podem limitar ou dificultar o uso de outras técnicas espectroscópicas. Além disso, a FIL apresenta potencial para a avaliação da MO de solos hidromórficos, por dispensar a eliminação de minerais silicatos com HF (concentração da MOS), ou o fracionamento químico da MO, tratamentos estes que podem induzir perdas quantitativas ou alterações na composição da MOS.

Outra técnica espectroscópica amplamente utilizada tem sido o infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). Conceitualmente, a radiação de infravermelho é a parte do espectro eletromagnético entre a região visível e as microondas, cuja região de interesse situa-se de 4000 a 400 cm^{-1} (Silverstein et al., 1994). A absorção na região do infravermelho é causada por movimentos rotacionais e vibracionais de grupos moleculares e ligações químicas de uma molécula. Conforme Silverstein et al. (1994), devido à presença no espectro de infravermelho de bandas características de grupos, é possível obter informações sobre a estrutura das moléculas orgânicas, mediante o exame visual do espectro e a consulta de tabelas. Mais especificamente, a espectroscopia de FTIR permite a identificação de grupos funcionais, como hidroxilas, carboxilas, alifáticos, aminas, entre outros, possibilitando inferir sobre aspectos como grau de decomposição e humificação da MO, a presença de constituintes orgânicos específicos ou impurezas inorgânicas nas amostras, e a interação da MO com metais.

Através dos resultados obtidos com a técnica de FTIR, também é possível estabelecer índices para a MOS como, por exemplo, o índice de

aromaticidade, que é a razão entre a intensidade do pico em 1630 cm^{-1} , associado aos grupos aromáticos, e a intensidade do pico em 2920 cm^{-1} , associado aos grupos alifáticos, informando o grau de condensação/saturação da MOS (Chefetz et al., 1996).

Atualmente, a espectroscopia de ressonância magnética nuclear do ^{13}C no estado sólido com polarização cruzada e ângulo mágico de spin (RMN ^{13}C CP-MAS) tem sido uma das principais técnicas espectroscópicas utilizadas em estudos na área de solos, permitindo identificar grupos funcionais de carbono e suas proporções relativas, que podem ser utilizadas como indicador da qualidade da MOS (Kogel-Knabner, 2002). Sob condições apropriadas em um campo magnético, uma amostra pode absorver radiação eletromagnética numa região de radiofrequência governada pelas características estruturais da molécula. O espectro de RMN apresenta as frequências dos picos de absorção e suas intensidades, associadas com estruturas das moléculas (Carvalho et al., 2004).

Conforme Stevenson (1994), o espectro de RMN ^{13}C CP-MAS pode ser dividido nas seguintes bandas espectrais e respectivos tipos de carbono: a) 0 a 45 ppm – C-alquil, que engloba o C metila ($-\text{CH}_3$) e o C metileno ($-\text{CH}_2$); b) 45 a 60 ppm – N-alquil + C-metoxil; c) 60 a 110 ppm - C-O-alquil; d) 110 a 160 ppm – C aromático; e) 160 a 190 ppm – C carboxílico; e f) 190 a 220 ppm - C cetônico. Avanços cumulativos têm sido registrados quanto ao potencial da RMN ^{13}C na caracterização da MO, inclusive em solos hidromórficos (Maie et al., 2002).

A utilização da espectroscopia de RMN do ^{13}C no estado sólido é cada vez maior porque possibilita o estudo da MOS como um todo. Como técnica não-destrutiva, preserva a amostra para outras análises, economizando solventes e permitindo a avaliação in situ da MOS (Dai e Johnson, 1999). No entanto, existem limitações devido à baixa abundância do ^{13}C na natureza, o que é agravado em amostras de solo com baixo conteúdo de MO. A técnica de polarização cruzada permite aumentar a sensibilidade dos núcleos raros e reduzir os longos tempos de relaxação spin-rede, mediante a transferência da magnetização de spins de núcleos abundantes como ^1H para os spins de núcleos raros como ^{13}C , contribuindo para o aumento da resolução pelo incremento de magnetização total (Jelinski e Melchior, 2000). Além disso, em

casos de amostras com baixo conteúdo de MO, a dissolução de minerais silicatos com solução de HF é uma alternativa para a concentrar a MO nas amostras, e conseqüentemente diminuir ainda mais o tempo de aquisição dos espectros.

Diversos trabalhos sobre MO utilizaram mais de um tipo de fracionamento, ou combinações de fracionamento e técnicas espectroscópicas para avaliação da dinâmica da MOS (Martin-Neto et al., 1995; Bayer, 1996; Bayer et al., 2002; Dick et al., 2002; González-Pérez et al., 2004). Esta forma de abordagem, com base em resultados complementares, possibilita uma melhor compreensão de aspectos como quantidade, composição e estrutura química da MOS.

Esta pesquisa propõe compreender as alterações na dinâmica da MO de solos hidromórficos sob usos distintos e diferentes graus de hidromorfismo, fatores importantes do ponto de vista pedogenético e da capacidade de utilização destes solos.

3.3 Hipóteses

De acordo com as informações e problemáticas apresentadas no decorrer do texto, formularam-se as seguintes hipóteses:

a) Características específicas do ambiente de formação dos solos, tais como o material de origem, o relevo e o tempo de residência da água no perfil, determinam composição e características diferenciadas na MO de solos hidromórficos;

b) Alterações induzidas ao pedoambiente, através de diferentes formas e intensidades de uso, influenciam na composição e nas características da MO de solos hidromórficos.

3.4 Objetivos

Conforme as hipóteses formuladas, esta pesquisa teve como objetivos:

3.4.1 Geral

Avaliar o teor, a composição e o grau de humificação da MO de solos hidromórficos sob usos distintos e estabelecer relações com aspectos pedogenéticos e de uso e manejo dos solos.

3.4.2 Específicos

Quantificar o teor de COT e o teor de CO das frações físicas e húmicas da MOS, discutindo sobre aspectos metodológicos e interferências antrópicas com influências pedoambientais;

Caracterizar a composição e estimar a decomposição e o grau de humificação da MO através de técnicas espectroscópicas e de índices relativos, bem como avaliar a adequação destas técnicas e índices para estudos envolvendo solos hidromórficos;

Relacionar as variações nas características da MO de solos hidromórficos com seus diferentes ambientes e formas de utilização, inferindo sobre os impactos na qualidade destes solos e no meio ambiente.

3.5 Material e Métodos

Para o estudo da MOS foram utilizadas apenas amostras de TFSA referentes aos horizontes superficiais Ap e A dos solos hidromórficos, uma vez que concentram os maiores conteúdos de MO e, conseqüentemente, são mais influenciados pelas alterações induzidas pelo uso e pelo manejo à esta componente do solo.

3.5.1 Carbono Orgânico Total

A quantificação do teor de carbono orgânico total (COT, g kg^{-1}) foi realizada em amostras de TFSA em triplicata, através de duas metodologias: combustão úmida (Walkley-Black), conforme Embrapa (1997); e combustão seca, conforme descrita no item 2.5.3.2.2..

A metodologia de combustão úmida do COT baseia-se na sua oxidação à CO_2 por íons cromo, em meio fortemente ácido. A reação envolve a redução do Cr^{6+} pela matéria orgânica, sendo o cromo reduzido considerado equivalente ao CO existente na amostra de solo. A metodologia de combustão seca baseia-se na oxidação do COT sob temperaturas acima de 800°C , em analisador de carbono SHIMADZU 500 (TOC), no qual o CO_2 liberado é quantificado em detector de infravermelho e atribuído ao C orgânico (C mineral desprezível).

O objetivo foi estabelecer um comparativo da eficiência das duas técnicas com amostras de solos hidromórficos, especificamente os de constituição orgânica. O COT utilizado nos cálculos para obtenção de CO relativo às frações físicas e húmicas, bem como nos índices de humificação foi o obtido por combustão seca.

3.5.2 Fracionamento Físico Granulométrico da MOS

O fracionamento físico da MOS foi realizado em amostras de TFSA através do método granulométrico (Cambardella e Elliot, 1992). Considerou-se o C do material retido na peneira 0,053 mm correspondente ao carbono

orgânico particulado (COP), enquanto o carbono associado aos minerais (CAM, <0,053 mm) foi obtido por diferença entre o COT e o COP. O COP representa a fração física menos decomposta ou menos transformada, cuja composição e recalcitrância bioquímica são dependentes do tipo de cobertura vegetal do solo. O CAM foi associado a MO bioquimicamente mais transformada, ou humificada. O COP das amostras foi analisado por combustão seca, em analisador de carbono SHIMADZU 500 (TOC).

3.5.3 Fracionamento Químico da MOS

O fracionamento químico da MOS compreendeu a extração e a separação de substâncias húmicas conforme a metodologia descrita por Dick et al. (1998), adaptada de Swift (1996), que se baseia na solubilidade da MOS em meios ácido e alcalino, quantificando teores de carbono nas seguintes frações: compostos orgânicos de baixo peso molecular (C_{HCl}), substâncias húmicas (C_{SH}) e ácidos fúlvicos (C_{AF}). A fração ácidos húmicos (C_{AH}) foi obtida por diferença ($C_{SH} - C_{AF}$) e a fração residual correspondente à humina (C_{HU}), que é insolúvel aos procedimentos anteriores foi obtida pela diferença entre o COT e as frações C_{HCl} e C_{SH} .

Em tubos plásticos de centrifuga adicionou-se 1 g de TFSA e 20 mL de solução HCl 0,1 mol L⁻¹. As suspensões foram agitadas em agitador horizontal por 2 horas e centrifugadas a 3000 rpm por 5 minutos. O sobrenadante (contendo C_{HCl}) foi acondicionado em frascos plásticos de 100 mL. Esta primeira etapa foi repetida uma vez e o sobrenadante misturado ao da primeira extração.

Na segunda etapa, nos tubos contendo os resíduos das extrações anteriores, adicionou-se 30 mL de solução NaOH 0,5 mol L⁻¹, agitou-se em agitador horizontal por 3 horas e centrifugou-se a 3000 rpm durante 5 minutos. Esta segunda etapa foi realizada três vezes (até tornar o sobrenadante límpido), extraíndo-se 90 mL de solução contendo C_{SH} . Antes de passar para a terceira etapa, retirou-se uma alíquota de 10 mL da solução de C_{SH} para análise desta fração e acondicionou-se em frascos plásticos de 30 mL. O restante da solução C_{SH} (80 mL) foi acondicionado em beakers de 250 mL e utilizado na terceira etapa (separação das substâncias húmicas em ácidos

húmicos e fúlvicos).

O pH das amostras após o tratamento de extração do CSH encontrava-se em torno de 12, e foi reduzido para pH 2 pela acidificação das amostras com HCl 0,4 mol L⁻¹ (ajuste inicial) e HCl 0,1 mol L⁻¹ (ajuste final). Em seguida, as amostras acidificadas permaneceram em repouso por 12 horas. Neste período, os ácidos húmicos precipitaram na forma de um gel de coloração marrom e os ácidos fúlvicos permaneceram em solução de coloração amarela dourada. O C_{AF} foi separado por centrifugação a 3000 rpm durante 5 minutos e acondicionado em frascos plásticos de 100 mL.

Os teores de C_{HCl}, C_{SH} e C_{AF} foram determinados por colorimetria em espectrofotômetro VARIAN 634 no espectro visível a 580 nm após 4 horas de reação a 60 °C em solução ácida de dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇ em H₂SO₄ 5,0 mol.L⁻¹) (1 mL:1 mL) com duas repetições de laboratório (Tinsley, 1950). A curva padrão foi construída em glicose de 0 a 200 mg L⁻¹.

Nesse trabalho assumiu-se como gradiente positivo de humificação a seqüência: C_{HCl}<C_{AF}<C_{AH}. A MO humificada compreendeu as frações C_{SH} (C_{AH} + C_{AF}), enquanto que a fração C_{HCl} representou os compostos não-húmicos como ácidos orgânicos, proteínas, lipídeos e outros compostos de baixo peso molecular. A fração C_{HU} representou os compostos não-húmicos, como lipídeos e carboidratos, preservados bioquimicamente por compostos apolares e pelas interações organominerais.

3.5.4 Espectroscopia de Fluorescência Induzida por Laser (FIL)

A análise de FIL foi realizada em amostras de TFSA moídas, peneiradas e prensadas mecanicamente em forma de aço (8 Mg) no formato de pastilhas de solo com aproximadamente 1 cm de diâmetro, 2 mm de espessura e 0,5 g de peso. A utilização de pastilhas de solo facilita a manipulação em laboratório e a superfície plana das suas faces torna-se ideal para a análise de FIL.

A medição foi realizada em analisador compacto desenvolvido pela Embrapa Instrumentação Agropecuária (São Carlos – SP), cujos parâmetros foram: região espectral de 425 a 800 nm, comprimento de onda de excitação 465 nm e tempo de integração de 150 ms. Cada espectro de FIL correspondeu

a média de quatro medições (2 repetições, 2 faces cada). O grau de humificação da MOS foi estimado a partir do índice de humificação (H_{FIL}) definido como a razão entre o valor da área integrada dos espectros de fluorescência (AEF) e o teor de COT das amostras ($H_{FIL} = AEF/COT$) conforme Milori et al. (2006).

3.5.5 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A análise de FTIR foi realizada conforme Stevenson (1994). Foram prensadas pastilhas de 1 mg de TFSA para cada 100 mg de brometo de potássio (KBr). Para cada análise foram efetuadas 32 varreduras no intervalo de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução espectral de 4 cm^{-1} . Após a leitura dos espectros de FTIR, procedeu-se à correção automática da linha base em 4.000, 2.000 e 400 cm^{-1} , igualando-se a zero. As análises foram realizadas em um espectrômetro da Perkin-Elmer modelo Spectrum 1000, pertencente a Embrapa Instrumentação Agropecuária (São Carlos – SP).

3.5.6 Obtenção da MOS concentrada com solução de HF

A desmineralização das amostras de TFSA com HF foi realizada com o objetivo de concentrar a MOS e favorecer a obtenção de espectros de RMN ^{13}C CP-MAS bem definidos (Dick et al., 2008). Em tubos de PVC foram adicionados 10 g de solo por amostra e 30 mL de HF 10 $g L^{-1}$. A suspensão foi agitada em agitador horizontal durante 2h e, em seguida, centrifugada a 4000 rpm por 10 minutos. Após a centrifugação, o sobrenadante foi descartado. O procedimento foi repetido de 7 a 10 vezes até a obtenção de resíduo com coloração escura (MO concentrada). A MO concentrada foi lavada com água deionizada até que o sobrenadante alcançasse nível de pH 4,5. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 60° C durante 24h.

3.5.7 Espectroscopia de Ressonância Magnética Nuclear do ^{13}C CP-MAS

Os espectros de RMN ^{13}C CP-MAS foram obtidos a partir de uma sonda para amostras sólidas. Utilizaram-se amostras de MO concentrada com HF 10 cL L^{-1} . A frequência de ressonância foi $100,58 \text{ MHz}$ (^{13}C), a banda espectral utilizada para a CP foi de 50 KHz , tempo de espera de 1 s , tempo de aquisição de $0,02 \text{ s}$ (20 ms). A janela espectral foi de $0\text{-}250 \text{ ppm}$. Os deslocamentos químicos foram expressos em ppm em relação ao tetrametilsilano e referenciados em relação ao hexametilbenzeno.

A partir das áreas dos espectros foram calculadas as intensidades relativas dos grupos: alifáticos não substituídos ($0\text{-}45 \text{ ppm}$), metoxil e N-alifáticos e O-alifáticos ($45\text{-}110 \text{ ppm}$), aromáticos e fenólicos ($110\text{-}160 \text{ ppm}$), carboxílicos e carbonílicos ($160\text{-}250 \text{ ppm}$) (Stevenson, 1994; Knicker, 2000).

O grau de decomposição da MOS foi estimado a partir do índice de decomposição A/A-O definido como a razão entre a proporção de C-alifático (C-alquil) e a proporção de O-alifático (C-O-alquil), conforme descrito por Baldock et al. (1997). Esta razão considera o C-alquil como a fração mais decomposta da MO, enquanto que o C-O-alquil corresponderia a fração menos decomposta da MO.

3.6. Resultados e Discussão

3.6.1 Teores de Carbono Orgânico Total

Os teores de COT são apresentados no Quadro 6. Nos solos minerais, os valores de COT dos horizontes superficiais variaram de 4,39 a 34,36 g kg⁻¹ com a maioria dos valores acima de 11,00 g kg⁻¹, com exceção do P1a, onde ocorreu influência acentuada do histórico de uso e manejo do solo na redução do teor de COT, além de ciclos alternados de alagamento e drenagem e da textura mais arenosa em relação ao P1, fatores que podem influenciar nos teores de COT (Oades, 1988).

Nos solos hidromórficos sob usos distintos, verificaram-se menores teores de COT nos perfis sob uso mais intenso do solo, seguindo as seguintes tendências: arroz < pastagem (P1a e P1), arroz < eucalipto (P5 e P5a), arroz sob PC < arroz sob PD (P2 e P2a). Esses resultados demonstraram que o uso do solo determinou mudanças nas condições pedoambientais, que foram determinantes para a redução dos teores de COT dos solos. Em todos esses casos, o fator determinante dessas diferenças foi o sistema de preparo do solo, que através da mobilização da camada arável, promove maior oxigenação e, conseqüentemente, estimulação da atividade de microrganismos na decomposição da MOS (Bayer e Mielniczuk, 2008).

Os horizontes genéticos H1 e H3 do P6 apresentaram teores de COT, determinados pelo método da combustão seca, de 410,10 e 453,00 g kg⁻¹ de solo, respectivamente. Pelo método de combustão úmida (Walkley-Black), os teores de COT para esses horizontes foram, respectivamente, 306,70 e 223,00 g kg⁻¹ de solo (dados não apresentados). Essa diferença entre valores obtidos pelos métodos analíticos justifica a necessidade de adaptação do método Walkley e Black, padrão que era anteriormente recomendado pela Embrapa (1997), quando da avaliação de solos hidromórficos com altos teores de C. Atualmente, o SiBCS recomenda a determinação do CO em mufla para Organossolos (Embrapa, 2006). De acordo com Pereira et al. (2006), em amostras desses solos, o método Walkley-Black utilizado pela Embrapa pode subestimar o teor real de COT. Por se tratar de um método de determinação de C indireto, baseado na oxidação da MO via úmida com dicromato de potássio, este

método pode apresentar limitações quanto a dificuldade de oxidar certas estruturas químicas, como por exemplo, material orgânico fibroso.

Em relação aos teores elevados de COT nos horizontes hísticos do P6 comparativamente ao teor de COT do horizonte A húmico do P6a, os resultados indicaram que as diferenças entre o Organossolo Tiomórfico e o Gleissolo Melânico são predominantemente pedogenéticas. Porém, é possível que o histórico de uso tenha induzido mudanças drásticas nas características pedoambientais originais do P6a que, provavelmente, devido ao mesmo ambiente de ocorrência, eram similares às do P6. É possível que a composição da MO do Organossolo seja específica e distinta dos demais solos hidromórficos devido ao hidromorfismo acentuado, o que pode ter influenciado na conservação dos altos teores de COT deste solo.

Quadro 6 – Teores de carbono orgânico total determinados por Walkley e Black (COT_{WB}) e combustão seca (COT_{CS}), e teores de carbono presente nas frações físicas (COP, CAM) e proporções físicas e húmicas (C_{HCl} , C_{AF} , C_{AH} , C_{SH} , C_{HU}) do CO de solos hidromórficos sob usos distintos.

Hor	COT_{WB}	COT_{CS}	COP	CAM	$\frac{COP}{COT}$	$\frac{CAM}{COT}$	$\frac{C_{HCl}}{COT}$	$\frac{C_{AF}}{COT}$	$\frac{C_{AH}}{COT}$	$\frac{C_{SH}}{COT}$	$\frac{C_{HU}}{COT}$	
	----- g kg ⁻¹ -----				----- % -----							
	P1 Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico											
A	15,85	14,25	3,99	10,26	28	72	10	7	30	37	52	
	P1a Planossolo Háplico Eutrófico solódico											
A	5,51	4,39	1,91	2,48	44	56	26	12	32	44	31	
	P2 Gleissolo Háplico Ta Distrófico típico											
Ap	14,10	11,00	5,32	5,68	48	52	12	3	35	39	50	
	P2a Gleissolo Háplico Ta Distrófico típico											
Ap	12,60	19,39	6,11	13,28	32	68	8	2	22	24	68	
	P3 Gleissolo Háplico Ta Eutrófico neofluvíssólico											
A	12,00	25,25	2,60	22,65	10	90	6	3	17	20	74	
	P4 Planossolo Háplico Eutrófico solódico											
Ap	25,82	34,36	1,05	33,31	3	97	5	5	15	19	76	
	P5 Planossolo Háplico Distrófico plíntico											
Ap	14,30	11,75	4,90	6,85	42	58	12	5	28	33	55	
	P5a Planossolo Háplico Alítico plíntico											
Ap	18,60	14,48	4,25	10,23	29	71	9	7	26	33	58	
	P6a Gleissolo Melânico Ta Eutrófico típico											
Ap	47,20	49,09	8,43	40,66	17	83	4	2	31	33	62	

3.6.2 Compartimentos Físicos e Húmicos da MOS

Os fracionamentos físico e químico da MOS foram realizados nos horizontes superficiais de todos os perfis, com exceção do P6 (Organossolo sob pastagem) e os resultados são apresentados no Quadro 6, juntamente com os teores de COT (g kg^{-1}) determinados por combustão úmida (Walkley e Black) e combustão seca, e proporções relativas das frações (estas em relação ao COT obtido por combustão seca).

Em todos os solos, os teores de CAM foram superiores aos de COP. Proporcionalmente, o CAM variou de 52 a 97 % do COT, um indicativo de pedoambientes bastante distintos. Em experimento de longa duração com solos hidromórficos sob cultivo de arroz, Lee et al. (2009) obtiveram proporções de CAM acima de 70%. Essa variabilidade nas proporções de COP e CAM também é comum em trabalhos com solos bem drenados. Em um Argissolo Vermelho Amarelo com textura franco arenosa, Loss et al. (2009), obtiveram valores de CAM variando de 39 a 81 % do COT, em função de diferentes usos e épocas de amostragem, enquanto Costa et al. (2008) observaram valores de CAM menos variáveis, em torno de 74 % do COT em Latossolo Bruno com mineralogia gipsítica. A predominância de CAM pode indicar um maior grau de transformação física da MOS, o que pode estar relacionado às perdas de CO mais lábil, ou incorporação em frações mais humificadas, ambas induzidas pelo tipo de uso e manejo do solo.

A proporção de COP em relação ao COT apresentou ampla variação, com menores valores no P4 sob pastagem (3 %) e no P3, este último sob pousio (10 %). Os solos sob cultivo de arroz apresentaram valores distintos, acima ou abaixo do valor de 35 % obtido por Zschornack et al. (2007) em solos hidromórficos sob essa forma de utilização. As proporções mais equivalentes de COP e CAM foram 48 e 52 %, obtidas no P2 sob cultivo de arroz em sistema de preparo convencional/pousio. Possivelmente, essa maior proporção de COP seja em função da deposição de resíduos vegetais originários de plantas invasoras durante o período de pousio (8 anos), que associada à ausência de incorporação, possibilitou a conservação de MO com um menor grau de decomposição.

O fracionamento químico da MOS possibilitou a separação do C em

frações húmicas: compostos orgânicos de baixo peso molecular (C_{HCl}), ácidos fúlvicos (C_{AF}), ácidos húmicos (C_{AH}) e huminas (C_{HU}). A distribuição das frações húmicas permitiu inferir, de forma preliminar, sobre a influência do uso e do hidromorfismo nos pedoambientes distintos.

A fração humina (C_{HU}), não extraível na solução alcalina, foi predominante em quase todos os solos hidromórficos, com valores variando de 50 a 76 %, com exceção do P1a, cuja baixa proporção de humina (31 %) se destacou das demais, em decorrência da textura mais arenosa desse solo (Nascimento et al., 2010). Maiores proporções da fração humina também foram observados em outros trabalhos com solos hidromórficos (Nascimento et al., 2010; Gondar et al., 2004). Este predomínio ocorre devido à insolubilidade das huminas, resultante de sua elevada hidrofobicidade e da forte interação com os minerais do solo (Dick & Martinazo, 2006). Menores valores na proporção de C_{HU} foram associados aos perfis de uso mais intenso do solo. Nestes, verificou-se uma maior participação das frações C_{HCl} e C_{AH} no COT.

Nos perfis P1 e P1a, a proporção de C_{HCl} variou de 10 % no solo sob pastagem, para 26 % no solo sob cultivo de arroz em sistema de preparo convencional. A fração C_{HCl} constitui o carbono orgânico de baixo peso molecular, contendo precursores de ácidos orgânicos de cadeia curta, como por exemplo, os ácidos acético, butírico e propiônico. Estes ácidos são produtos da decomposição anaeróbia que ocorre comumente em solos alagados para o cultivo com arroz (Bohnen et al., 2005). Embora a meia-vida destes ácidos no solo seja curta, este resultado indica a quantidade expressiva destes compostos nestes ambientes.

A fração ácidos fúlvicos (C_{AF}) foi a menos expressiva, apresentando proporções menores inclusive do que a de compostos orgânicos de baixo peso molecular (C_{HCl}). Por sua vez, as proporções de ácidos húmicos (C_{AH}) foram maiores que as anteriores, variando de 15 a 35 %.

O grau de hidromorfismo, aparentemente, não mostrou relação direta na distribuição das frações húmicas da MOS. A ocorrência de frações mais insolúveis (C_{HU}), contudo pode estar associada com aspectos como o a textura mais argilosa do solo, enquanto que a ocorrência de compostos orgânicos leves (C_{HCl}) foi relacionada com o tipo de cobertura vegetal, especificamente a cultura do arroz.

Os resultados dos fracionamentos físico e químico da MOS foram complementados pelas observações realizadas em nível de campo.

Estes resultados mostraram que condições pedoambientais distintas, induzidas pelas formas de uso e manejo dos solos e pelo regime hídrico, determinaram diferenças na distribuição de C nas frações físicas e húmicas da MOS. A qualidade da MOS, entretanto, depende de aspectos como composição elementar, proporção de grupos funcionais e graus de humificação e decomposição. Estas informações ampliam as possibilidades de inferências sobre a reatividade, a estabilidade de frações à decomposição pelos microrganismos (recalcitrância) e dinâmica da MO em solos hidromórficos de classes e usos distintos.

3.6.3 Índice de Humificação por Fluorescência Induzida por Laser (FIL)

As áreas integradas dos espectros de FIL, apresentados na Figura 1, são proporcionais à abundância de fluoróforos, compostos associados à humificação da MOS. Em alguns casos (P1 e P1a, P6 e P6a), os espectros por si só mostraram diferenças visuais que sugeriram humificação diferenciada em função dos usos distintos. Em outros casos (P5 e P5a), essa visualização não permitiu, por si só, inferências quanto à humificação dos solos, sendo necessário considerar também o teor de COT em cada amostra. Assim, foi utilizado como parâmetro principal o índice de humificação por FIL, razão das áreas integradas dos espectros de fluorescência sobre o COT, o qual apresentou diferenças tanto em relação a aspectos pedogenéticos como em relação aos diferentes usos dos solos hidromórficos (Figura 2).

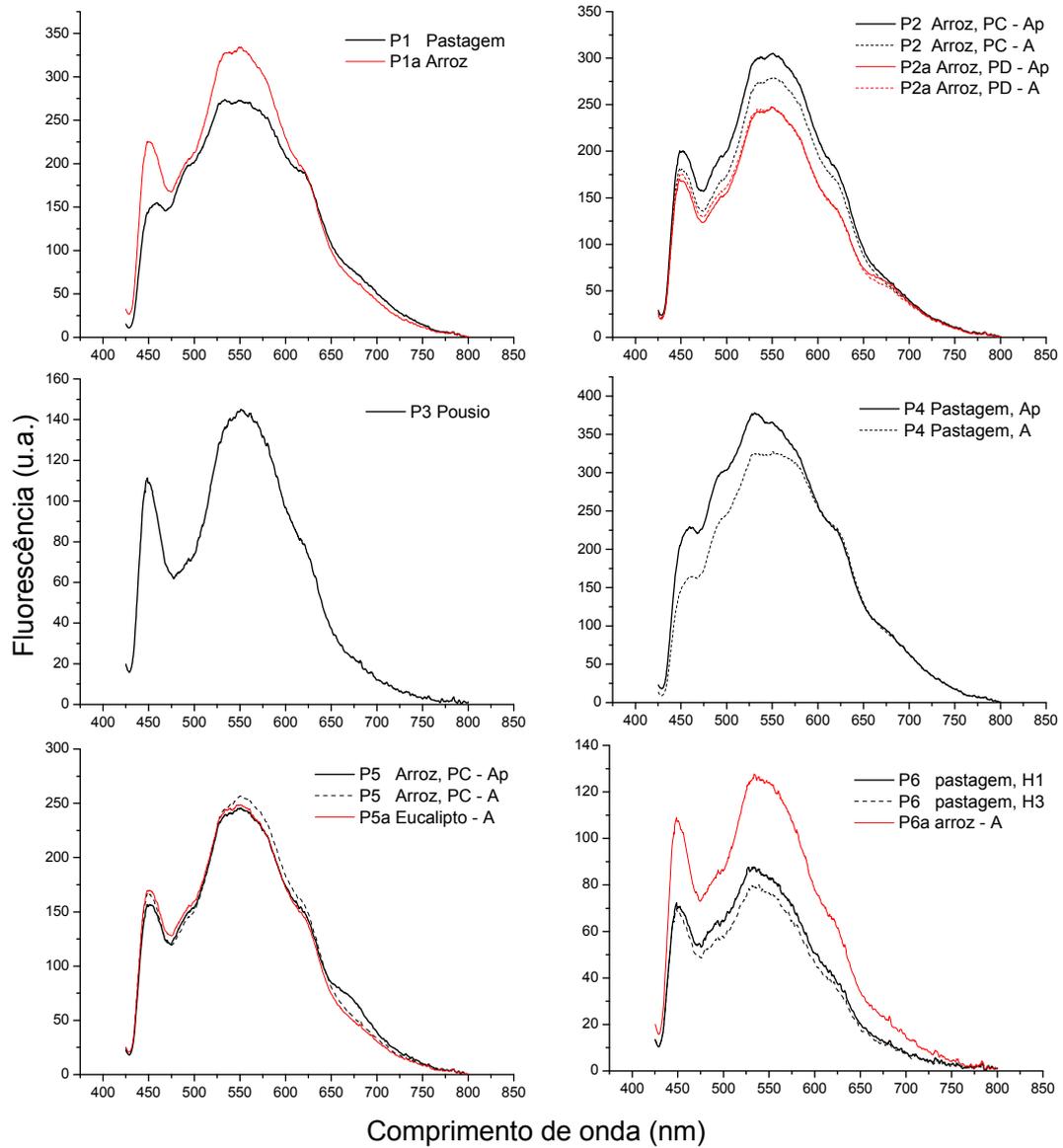


Figura 1 – Espectros de emissão de fluorescência induzida por laser (FIL) em amostras de TFSA de solos hidromórficos sob usos distintos.

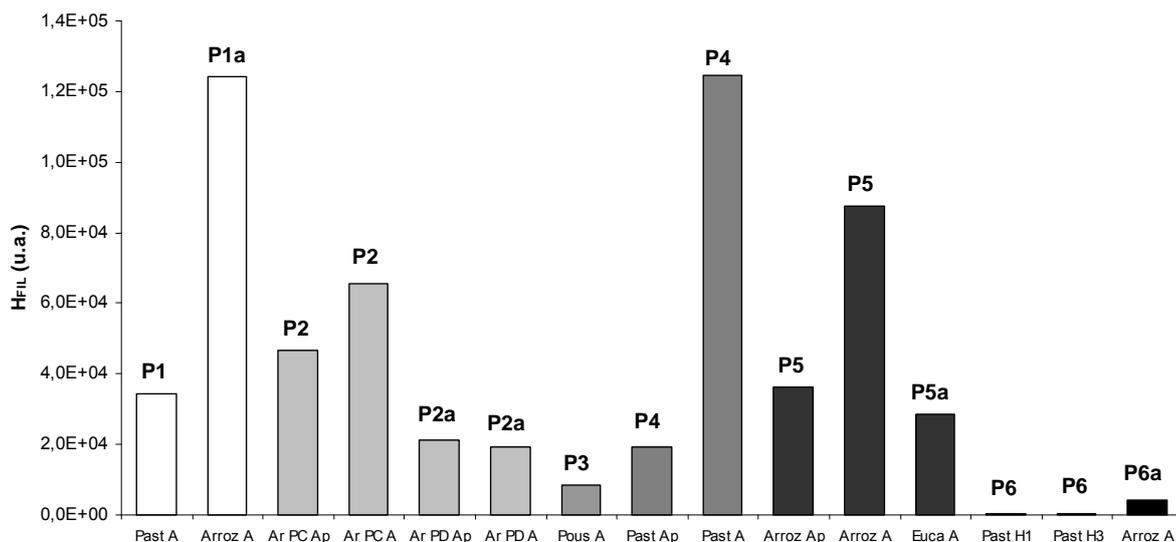


Figura 2 – Índice de humificação H_{FIL} (unidades arbitrárias) para horizontes Ap e A dos perfis de solos hidromórficos sob usos distintos.

Quanto aos processos pedogenéticos, os solos com maior tempo de residência da água no perfil, como no caso do P3, P6 e P6a apresentaram menores graus de humificação em relação aos demais solos. Nesses ambientes, o hidromorfismo mais acentuado restringe a atividade de microrganismos que atuam na decomposição da MO, resultando em maiores proporções de compostos orgânicos pouco alterados. Concomitantemente, frações húmicas da MOS, como os ácidos húmicos, tornam-se menos oxidadas ou humificadas (Kirk & Oik, 2000). No P3, cuja influência flúvica é marcante, o menor grau de humificação pode estar relacionado à própria natureza do material orgânico aluvial. Nos P6 e P6a o ambiente anaeróbico permite a ocorrência do processo pedogenético de paludização, que é caracterizado pela acumulação de material orgânico em diferentes estágios de decomposição, principalmente material orgânico pouco decomposto, o que foi constatado pela baixa intensidade dos espectros de FIL e pelo baixo grau de humificação.

De uma forma geral, em relação aos horizontes Ap e A dentro de um mesmo perfil de solo, verificou-se que o horizonte subjacente apresentou espectros com menor intensidade de fluorescência e também menor grau de humificação em relação ao horizonte subjacente (com exceção do P2a, cujos resultados foram similares). Essa mesma tendência, também foi observada por Favoretto et al. (2008) em estudo com FIL num Latossolo sob diferentes sistemas de manejo. Como horizontes mais superficiais, os horizontes Ap são mais

influenciados pela cobertura vegetal, tanto durante o período de cultivo como no período pós-cultivo, quando os resíduos vegetais decompõem sobre a superfície do solo. Assim, o aporte de MO fresca na superfície do solo significa não apenas compostos em estágios iniciais de decomposição/transformação, mas que também estão sujeitos a uma taxa de decomposição mais lenta em decorrência da disponibilidade de MO em quantidades superiores à capacidade decompositora dos microrganismos do solo (Bayer et al., 2000) e da menor exposição da superfície do material orgânico em contato com o solo. Ressalta-se ainda que, apesar de parte dos perfis estarem sob arroz em sistema de cultivo convencional, o preparo só ocorre na ocasião da implantação do cultivo, o que permite graus de humificação distintos também entre horizontes destes solos.

Quanto aos usos distintos, os perfis sob usos mais intensivos apresentaram maiores valores de intensidade de fluorescência e do grau de humificação comparativamente aos perfis sob usos menos intensivos. A MOS mostrou-se mais humificada nos perfis sob cultivo de arroz em sistema de preparo convencional (P1a, P2, P5 e P6a) do que nos perfis comparativos sob pastagem (P1 e P6), arroz sob sistema de plantio direto (P2a) e eucalipto (P5a). Essa maior humificação da MO está associada ao processo de revolvimento dos solos sob sistema de preparo convencional, o qual aumenta a aeração nas camadas mais superficiais e, conseqüentemente, a atividade dos microrganismos na decomposição da MO, principalmente dos compostos mais lábeis. Resultados semelhantes foram obtidos por Milori et al (2002) para solos sob sistema de preparo convencional e solos sob sistema de plantio direto. A drenagem é outro aspecto relevante do manejo de solos sob cultivo de arroz, já que compostos orgânicos não-húmicos como os compostos de baixo peso molecular (comuns em lavouras de arroz), e frações húmicas pouco humificadas como os ácidos fúlvicos, são solúveis, e podem migrar para horizontes subsuperficiais (Corvasce et al., 2006; Nascimento et al., 2010) ou serem removidos do sistema solo através da água de descarte.

Estes resultados permitiram afirmar que formas mais intensas de utilização dos solos hidromórficos além de diminuir os teores de COT, alteraram aspectos químicos e estruturais da MOS. Este fato tem implicações não apenas na diminuição dos estoques de CO no solo, mas também no comportamento reativo da MO frente às novas dinâmicas pedoambientais

estabelecidas pelo uso.

3.6.4 Composição química da MOS determinada por FTIR

Os espectros de FTIR das amostras de solos hidromórficos foram obtidos com a finalidade de verificar a presença dos diferentes grupos funcionais da MOS. A interpretação dos espectros de FTIR foi realizada quanto à presença e intensidade de picos atribuídos às bandas dos grupos funcionais (Stevenson, 1994; González Pérez et al., 2004; Dick et al., 2008).

Os espectros de FTIR são apresentados na Figura 3. A composição dos espectros da MO dos solos hidromórficos variou em função da diversidade de grupos funcionais presentes, com diferenças relacionadas ao tipo de horizonte (Ap, A) e aos usos e manejos distintos.

Nos espectros de FTIR observou-se a presença de uma banda larga e intensa em 3400 a 3300 cm^{-1} associada ao estiramento -OH de fenóis, alcoóis e ácidos carboxílicos. A presença de picos em 2918 e 2850 cm^{-1} relativos ao estiramento simétrico e assimétrico de C-H alifático de grupos CH_3 e CH_2 , indicaram a presença de cadeias alifáticas na MOS. Em alguns espectros, foram verificados picos na região de 1716 cm^{-1} , atribuída ao estiramento C=O de grupos carboxílicos (COOH). A banda na região de 1540 cm^{-1} , referente à deformação N-H e ao estiramento C=N, variou principalmente em relação ao tipo de horizonte do solo. Foram observados picos em torno de 1400 cm^{-1} , referente ao C-H alifático e C-O de OH fenólico. A banda em 1250 cm^{-1} foi atribuída ao estiramento simétrico C-O e a deformação OH do grupo carboxílico.

A presença de picos na região de 1080 cm^{-1} representou interferências de bandas atribuídas ao estiramento Si-O de impurezas minerais.

No P1a, a região do espectro em torno de 3380 cm^{-1} relativa ao estiramento OH do grupo fenólico é subdividida e apresenta um pico com intensidade máxima em 3156 cm^{-1} . Essa banda de absorção, de acordo com Miranda et al. (2007), é atribuída à presença de C-H aromático e ciclos alcanos.

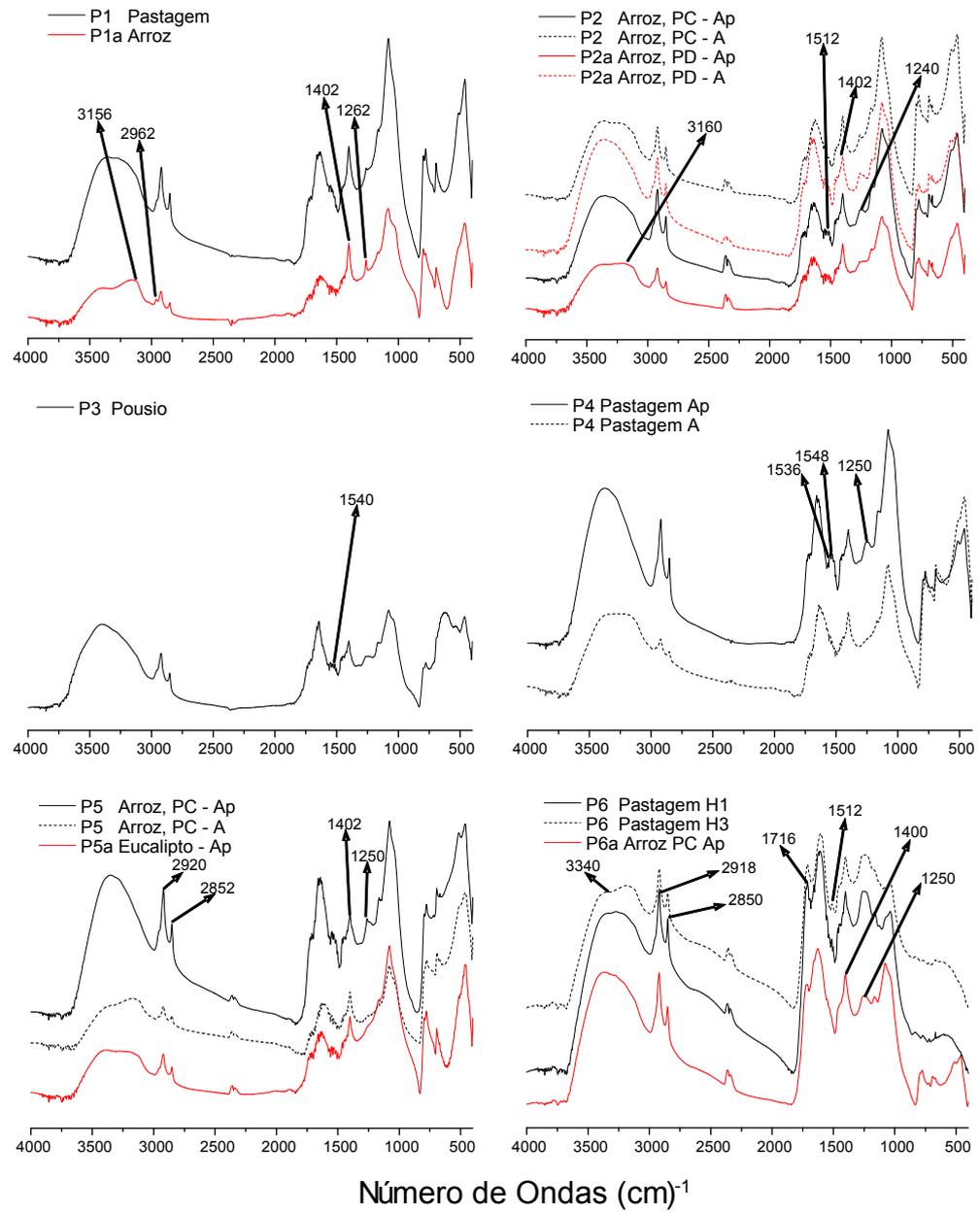


Figura 3 – Espectros de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) de amostras de TFSA de solos hidromórficos sob usos distintos em pastilhas de KBr (1:100).

Os espectros dos perfis P2 e P2a apresentaram similaridades, possivelmente, por se tratarem do mesmo solo (Gleissolo Háplico Ta distrófico típico) submetido ao mesmo tipo de cobertura vegetal (arroz), porém, sob sistemas de manejo diferentes (sistema de preparo convencional/pousio e sistema de plantio direto, respectivamente). Nesse caso, o manejo constituiu o fator determinante das diferenças qualitativas da MO nesse pedoambiente. O horizonte Ap do P2 apresentou maior intensidade no pico 2922 cm^{-1} em relação à banda em 3358 cm^{-1} , enquanto que, no horizonte Ap do P2a, verificou-se a ocorrência de um ombro alargado com pico em 3160 cm^{-1} , característico de C-H aromático. Também foi observado a ocorrência de bandas entre 1512 e 1548 cm^{-1} (ligações peptídicas N-H) nos horizontes Ap de ambos perfis, um indicativo da presença de compostos nitrogenados.

O espectro do P3 possui composição similar a dos espectros dos demais solos hidromórficos. A presença de uma banda na região de 1540 cm^{-1} indica a participação de compostos nitrogenados ou pouco decompostos na MO desse solo hidromórfico.

Os espectros dos horizontes Ap e A do P4 apresentaram diferenças quanto à presença de grupos específicos de C. Verificou-se a ocorrência de bandas inferiores a 1000 cm^{-1} , associadas às impurezas minerais. No horizonte Ap a presença do pico em 1250 cm^{-1} (grupos carboxílicos) e da banda de 1536 a 1548 cm^{-1} (compostos nitrogenados), em contraste com a ausência desses no horizonte A, indicam um baixo grau de decomposição da MO em superfície.

Os espectros do P5 e P5a apresentaram diferenças no aspecto e na composição dos espectros. O alargamento da banda entre 3400 e 3160 cm^{-1} no P5a, sugere a presença de C-H de aromáticos na MO do solo sob eucalipto. No espectro do horizonte Ap do P5, verificou-se a presença de um pico em 1250 cm^{-1} (C-O e OH de carboxílicos), que não ocorreu nos espectros do horizonte A do mesmo solo e no horizonte Ap do solo sob eucalipto (P5a).

As amostras dos perfis P6 e P6a foram as que apresentaram os teores mais elevados de COT, o que influenciou na composição dos espectros de FTIR principalmente pela baixa intensidade das bandas relativas às impurezas minerais (Si-O e Al-O). Em relação ao espectro do horizonte Ap do P6a, os espectros dos horizontes H1 e H3 do P6 apresentaram maior intensidade do pico em 1250 cm^{-1} (C-O e OH de carboxílicos). No horizonte H3

verificou-se a presença de um pico em 1512 cm^{-1} , praticamente difuso no H1 do mesmo solo e ausente no Ap do P6a, possivelmente associado a presença de compostos nitrogenados. Os espectros do P6 e o espectro do P6a apresentaram picos bem definidos em 1716 cm^{-1} , região associada ao estiramento C=O do grupo carboxílico. Foi observada uma grande intensidade dos sinais em 2918 e 2850 cm^{-1} (C-H de alifáticos) em relação à região em torno de 3340 cm^{-1} (-OH de fenóis, alcoóis e ácidos carboxílicos) nos horizontes H1 e H3 do P6, um possível indicativo de diferenças em qualidade ou grau de alteração da MO desse solo.

3.6.5 Composição química da MOS determinada por Ressonância Magnética Nuclear de ^{13}C CP-MAS

Os espectros de RMN ^{13}C CP-MAS das amostras de solos hidromórficos tratadas com HF (10%) são apresentados na Figura 4, e o resultado da integração das áreas correspondentes aos principais tipos de C, bem como o índice de decomposição A/A-O (C-alquil/C-O-alquil), no Quadro 7.

A primeira região dos espectros (0 a 45 ppm) apresentou picos em torno de 30 ppm, característicos de grupos alifáticos (como o CH_3 e o CH_2). A segunda região dos espectros (45 a 110 ppm) foi caracterizada por picos bem definidos, em 55 ppm, o qual é associado aos ésteres, éteres alifáticos e nitrogênio alifático; em 73 ppm, associado a carbonos alifáticos ligados a grupos éter e anéis de polissacarídeos; e em 104 ppm atribuído ao carbono ligado a dois átomos de oxigênio e a C anomérico em polissacarídeos. A terceira região dos espectros (110 – 160 ppm) destacou picos em torno de 129 ppm, atribuídos ao carbonos aromáticos não substituídos ou alquil substituídos; e um pico duplo em 148 e 152 ppm, relativos ao carbono fenólico ou O-aromático, e carbono aromático contendo nitrogênio ou grupos éter. A quarta região dos espectros (160 – 185 ppm), apresentou um pico em 174 ppm, associado ao carbono de grupos carboxílicos; e um pico em 209 ppm de baixa intensidade no P6 e difuso na maioria dos espectros, provavelmente associado ao carbono carbonílico de aldeídos e cetonas.

De uma forma geral, os solos hidromórficos apresentaram predominância de estruturas C-O-alquil e N-alquil (45 – 110 ppm), cuja proporção

relativa variou de 37,7 a 53,8 % da área total do espectro de RMN. Os grupos C-alquil (0 – 45 ppm) também foram abundantes, variando de 30,3 a 44,3 %, enquanto os grupos aromáticos e fenólicos (110 – 160 ppm) variaram de 1,6 a 19,0 % e os grupos carboxílicos e carbonílicos (160 – 250 ppm) de 6,3 a 10,7 %.

Nos perfis P1 e P1a a proporção de grupos alifáticos (C-alquil) foi idêntica. No entanto, a menor proporção de C-O-alquil no P1a comparativamente ao P1, foi acompanhada por maiores proporções de C aromático e C carboxílico no primeiro. O índice de decomposição A/A-O verificou maior grau de decomposição no solo sob arroz em sistema de preparo convencional (0,72) em comparação ao mesmo perfil sob pastagem (0,66), o que pode ser devido às diferenças dos materiais orgânicos adicionados ao solo pelas plantas.

No P2 sob arroz em sistema de preparo convencional e pousio houve maior proporção de estruturas C-O-alquil, enquanto que no P2a sob arroz em sistema de plantio direto ocorreram maiores valores de C-alquil, C aromático e C carboxílico de modo que o grau de decomposição no solo sob sistema de plantio direto foi maior comparativamente ao solo sob sistema de preparo convencional e pousio (0,72 e 0,66, respectivamente). A ocupação da área sob pousio do P2 com vegetação espontânea, durante 8 anos, pode ter contribuído com a adição de material orgânico diferenciado, com maior proporção de estruturas C-O-alquil e mais facilmente decomposto.

O P3 sob pousio apresentou a menor proporção de C-alquil dentre todos os solos. Ao mesmo tempo, apresentou uma proporção elevada de 53,3 % de C-O-alquil e proporções idênticas de C aromático e C carboxílico. O índice A/A-O mostrou para o P3 o menor grau de decomposição da MO (0,57) dentre todos os pedoambientes avaliados, o que é condizente com as características do perfil, influenciado pelo hidromorfismo acentuado e pelo período de pousio.

O P4 sob pastagem foi o solo hidromórfico que apresentou as maiores proporções de C-O-alquil e C carboxílico (53,8 e 10,7 %, respectivamente). O grau de decomposição desse solo (0,66) foi idêntico ao do P1, cujo uso também foi a pastagem.

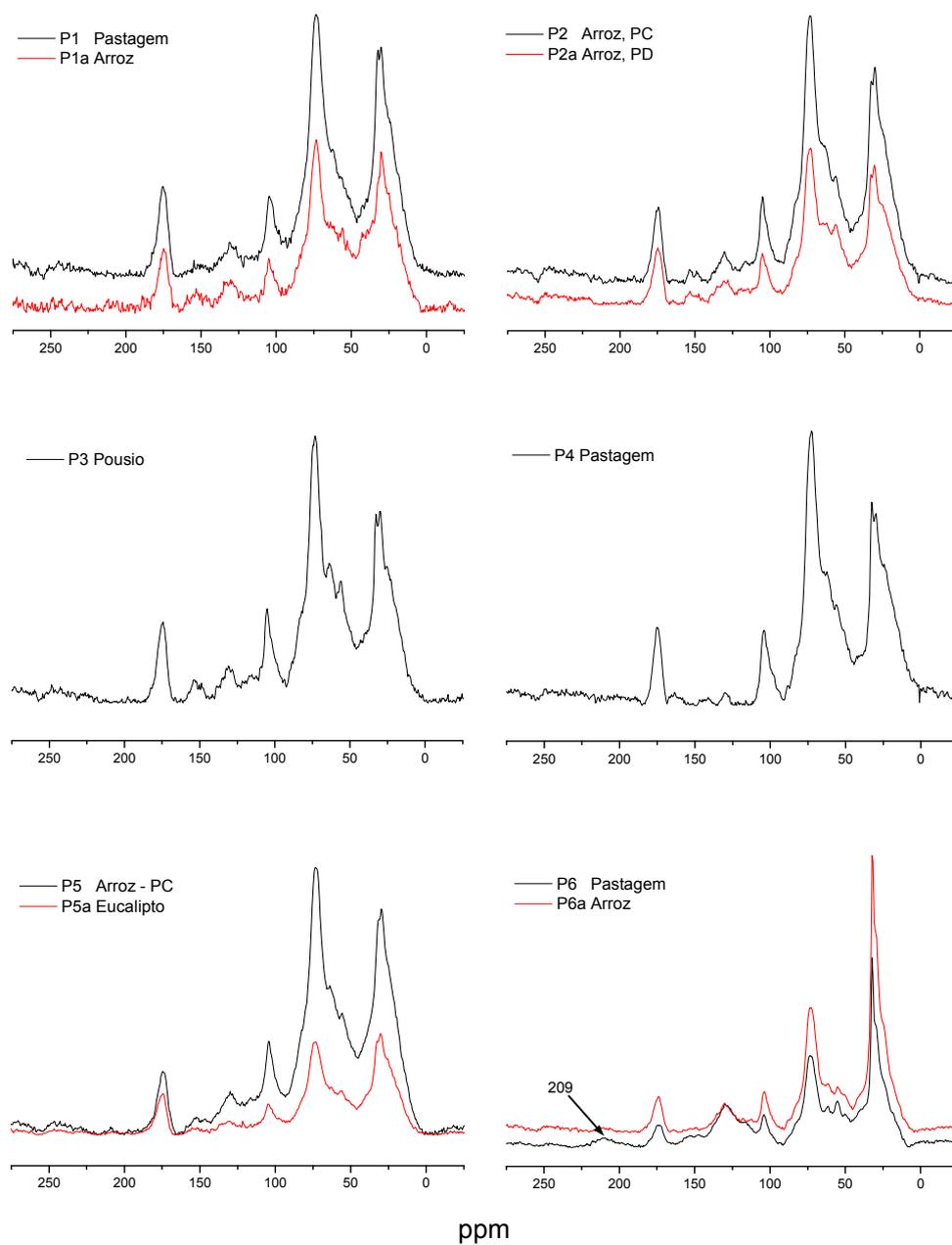


Figura 4 – Espectros de RMN ^{13}C CP-MAS de amostras de solos hidromórficos sob usos distintos tratadas com HF 10%.

Quadro 7 – Distribuição relativa das principais regiões de integração do espectro de RMN ^{13}C CP-MAS e Índice de decomposição (A/A-O) de amostras de solos hidromórficos sob usos distintos tratadas com HF 10%.

Perfis	Distribuição de tipos de C/deslocamento químico "ppm"				A/A-O
	C Alifáticos (C-alquil)	O e N Alifáticos (C-O-alquil)	Aromáticos e Fenólicos (C=C C=O)	Carboxílicos e Carbonílico (COOH)	
	0 - 45	45 - 110	110 - 160	160 - 245	
	----- % -----				
P1	33,7	50,9	6,4	8,6	0,66
P1a	33,7	46,5	9,2	10,1	0,72
P2	33,9	51,6	5,7	8,5	0,66
P2a	34,7	48,3	7,7	9,0	0,72
P3	30,3	53,4	7,9	7,9	0,57
P4	35,3	53,8	1,6	10,7	0,66
P5	32,4	51,8	9,0	6,3	0,63
P5a	36,2	46,6	7,4	9,4	0,78
P6	34,9	37,7	19,0	7,9	0,92
P6a	44,3	39,9	8,7	6,8	1,11

Os espectros dos perfis P5 e P5a mostraram composição bastante distinta. No P5 sob arroz em sistema de preparo convencional verificou-se maiores proporções de C-O-alquil e de C aromático comparativamente ao P5a sob eucalipto, no qual as proporções de C-alquil e C carboxílico foram maiores. O índice A/A-O apresentou maior grau de decomposição (0,78) no solo sob eucalipto (P5a) em comparação ao solo de arroz, o que pode estar relacionado com o tipo de material orgânico adicionado ao solo e com os diferentes graus de hidromorfismo desses pedoambientes. No P5a a drenagem do perfil proporciona maior oxigenação e, conseqüentemente, condições favoráveis à uma maior decomposição da MOS.

Os horizontes H1 e Ap, dos respectivos perfis P6 e P6a, apresentaram espectros distintos dos demais solos hidromórficos devido aos conteúdos elevados de MO, uma característica singular destes pedoambientes. Ambos os espectros apresentaram picos estreitos e intensos em torno de 32 ppm, região referente ao C-alquil de alifáticos; e picos alargados e homogêneos em torno de 129 ppm, região associada aos carbonos de aromáticos não substituídos. No P6a sob arroz em sistema de preparo convencional verificou-se a maior proporção de

C-alquil de todos os pedoambientes avaliados (44,3 %). Essa proporção de alifáticos foi quase 10% superior à observada no P6 sob pastagem (34,9 %). Por outro lado, no P6 sob pastagem, a MO apresentou uma proporção de aromáticos de 19,0 %, valor 10,3 % superior em relação ao solo sob arroz. A proporção de C-O-alquil foi maior no P6a enquanto que a de C carboxílicos foi superior no P6. No P6 observou-se a presença de um pico de baixa intensidade em 209 ppm relacionado com a participação de grupos carbonílicos. Em função das menores proporções de C-O-alquil observadas nestes perfis (37,7 % para o P6 e 39,9 % para o P6a) o índice A/A-O mostrou valores de 0,92 no P6 e 1,11 no P6a, destacando a MO mais decomposta ou transformada no solo hidromórfico de uso mais intenso (P6a).

3.6.6 Discussão sobre a matéria orgânica do solo e ambientes de ocorrência dos solos hidromórficos

Os resultados obtidos pelo índice de humificação por FIL mostraram que no P1a o cultivo do solo com arroz em sistema de preparo convencional contribuiu para a formação de MO com uma maior proporção de estruturas aromáticas e fenólicas, em detrimento de C-O-alquil. Este resultado sugere que a MOS do P1a (arroz) seja menos passível de decomposição em comparação com a MOS do P1.

A MO do P1 sob pastagem possui uma maior proporção de C-O-alquil em comparação com o P1a sob arroz. Isto pode estar diretamente relacionado com o tipo de cobertura do solo, onde a pastagem, por ser permanente, contribui com o acúmulo constante de carboidratos em estágios iniciais de decomposição, principalmente polissacarídeos como a celulose e a hemicelulose. Por outro lado, no P1a, o preparo intensivo do solo por ocasião da implantação da cultura do arroz proporciona maior oxidação da camada superficial do solo, estimulando a atividade de microrganismos aeróbios, mais eficientes na decomposição da MOS (Bayer e Mielniczuk, 2008). Os carboidratos são estruturas orgânicas de baixa recalcitrância bioquímica, sendo preferencialmente decompostas em relação a outras estruturas como, por exemplo, as cadeias alifáticas e aromáticas (Zech et al., 1997).

A presença de compostos aromáticos na MO do P1a, verificada pelo

FTIR, foi coerente com a maior proporção de C aromático verificada através da RMN ^{13}C CP-MAS. No espectro de FTIR do P1a, a ocorrência do pico em 3156 cm^{-1} constituiu mais um indicativo da presença de estruturas aromáticas (C-H aromático e ciclos alcanos) nesse solo. Miranda et al. (2007) também observaram a ocorrência desse pico em espectros de FTIR de ácidos húmicos de mata alagada. Provavelmente, no P1a o alagamento para o cultivo do arroz proporcionou uma maior conservação das estruturas aromáticas na MOS.

Nos perfis P2 e P2a, a técnica de FTIR indicou a presença de compostos nitrogenados (banda de 1512 a 1548 cm^{-1}) nos horizontes superficiais Ap, o que pode estar relacionado à adubação dos solos com fertilizantes nitrogenados e a maior participação do nitrogênio no material orgânico em superfície. A baixa intensidade dessa banda nos espectros dos horizontes subjacentes (horizontes A) sugere que os compostos orgânicos nitrogenados são preferencialmente decompostos em relação às demais estruturas orgânicas.

O sistema de plantio direto é caracterizado pela ausência de preparo do solo e pela deposição de cobertura vegetal sobre sua superfície. Assim, o acúmulo de MO em solos submetidos a esse sistema de manejo pode ocorrer tanto em função do menor contato do material orgânico com a matriz do solo, uma vez que ele não é incorporado, como também em função da concentração localizada de MO, acima da capacidade decompositora dos microrganismos (Bayer et al., 2000). No P2a, o sistema de plantio direto proporcionou um maior aporte de COT em comparação com o P2 sob sistema de preparo convencional/pousio ($19,39$ e $11,00\text{ g kg}^{-1}$, respectivamente). Esse maior aporte pode estar relacionado com a maior conservação de estruturas aromáticas na MO do P2a, conforme foi verificado pela RMN ^{13}C CP-MAS.

Sob o sistema de preparo convencional, os resíduos vegetais são incorporados com o revolvimento do solo. A mobilização do solo, por sua vez, proporciona um ambiente mais oxidado, favorável às transformações da MO via decomposição microbiana. Porém, é preciso salientar que, no P2, o sistema de preparo convencional fora substituído pelo pousio há cerca de oito anos. Assim, uma nova dinâmica genética foi estabelecida neste pedoambiente, influenciada principalmente pela presença e atividade contínua de vegetação espontânea (plantas invasoras) e pela ausência da mobilização do solo.

O fracionamento físico da MOS mostrou que a maior parte do CO do P2a está associada aos minerais (CAM, 13,28 g kg⁻¹), comparativamente ao CO particulado (COP, 6,11 g kg⁻¹). Isto significa que a MO do P2a possui um estágio de transformação física mais avançado em comparação com a MO do P2, cujas frações físicas da MO foram equivalentes (CAM 5,68 g kg⁻¹ e COP 5,32 g kg⁻¹). O fracionamento químico da MO do P2a mostrou que 68 % do CO corresponde a fração humina, enquanto que no P2 esta fração corresponde apenas a 50 % do COT. A fração humina é considerada a fração húmica mais hidrofóbica e recalcitrante da MOS, composta principalmente por cadeias alifáticas (Simpson e Johnson, 2006; Hayes et al., 2010). A maior proporção de estruturas alifáticas (C-alquil) observada no espectro de RMN ¹³C CP-MAS da MO do P2a comprova a composição diferenciada da MO desse solo. Sob o ponto de vista da proteção da MOS, é possível afirmar que o manejo do P2a sob sistema de plantio direto proporcionou uma maior estabilização do C do solo através de frações mais recalcitrantes.

Utilizando a técnica de luminescência total, Olendzki et al. (2009) observaram maior grau de humificação da MO em Planossolo sob sistema de plantio direto, quando comparado com a MOS sob sistema de preparo convencional.

O P3, um Gleissolo Háplico Ta eutrófico neofluvíssólico, está localizado num ambiente com forte influência fluvial do Rio Guaíba, o que o torna pouco estabilizado em termos pedogenéticos. As técnicas espectroscópicas de FIL e RMN ¹³C CP-MAS indicaram que a MO do P3 é, respectivamente, pouco humificada e pouco decomposta comparativamente aos outros pedoambientes avaliados (A/A-O=0,57). A técnica de FTIR revelou a participação de compostos nitrogenados ou pouco decompostos (presença de uma banda na região de 1540 cm⁻¹) e de compostos aromáticos da MO desse solo.

No P3, os resultados obtidos através do fracionamento físico indicaram que a proporção de CAM é quase 10 vezes superior a de COP (22,65 e 2,60 g kg⁻¹, respectivamente), sugerindo uma MO bastante transformada, do ponto de vista físico. Isto não representa necessariamente transformações químicas de estruturas orgânicas, observadas através das técnicas espectroscópicas. Contudo, o fracionamento químico mostrou que a fração humina correspondeu a 73,74 % do COT do solo, contrastando com a baixa proporção de C-alifático,

porém concordando com o baixo grau de humificação obtido por FIL e com o baixo grau de decomposição da MOS obtido pelo índice A/A-O.

Avaliar a MO em um ambiente pedogeneticamente ativo como o P3 constituiu um desafio ao estudo, mesmo dispondo de técnicas de detecção precisas como as técnicas espectroscópicas. A anisotropia tende a ser um fator preponderante nesse solo. O aporte de sedimentos, decorrente de períodos de cheias, sugere que a MO do P3 seja de origem alóctone, cujas transformações iniciais, ao menos as transformações físicas, tenham ocorrido em outros pedoambientes. As atuações dos fatores e processos pedogenéticos locais tendem a ter um papel secundário no grau de transformação da MO no pedoambiente do P3.

A MO do P4 apresentou o mesmo grau de decomposição da MO do P1 (0,66), cujo uso também foi a pastagem. Os horizontes Ap e A do P4 apresentaram MO com composição diferenciada. A técnica de FIL mostrou que o horizonte Ap possuiu um grau de humificação menor em relação ao do horizonte A. Esse resultado indica que a pastagem diferencia a qualidade da MO em superfície, através da adição de compostos nitrogenados e compostos orgânicos mais ácidos (grupos carboxílicos), conforme verificou-se pela intensidade das bandas de referência desses compostos (1540 e 1250 cm^{-1} , respectivamente) no espectro de FTIR do horizonte Ap. Segundo Potes et al. (2010), compostos aromáticos da MO podem migrar da superfície para subsuperfície, o que possivelmente ocorreu no P4, tornando a MO do horizonte A mais aromática.

A técnica de RMN ^{13}C CP-MAS verificou, na MO do P4, as maiores proporções de C-O-álquil e C carboxílico dentre os pedoambientes avaliados (53,8 e 10,7 %, respectivamente). A qualidade do resíduo vegetal adicionado pela pastagem pode, em parte, ter influenciado nesse resultado. A proporção de C aromático de apenas 1,6 % da MO do P4 foi muito baixa em relação a observada nos outros pedoambientes, o que caracteriza um erro, possivelmente ocorrido durante o tratamento das amostras de TFSA com HF. Em função disso, existe uma necessidade de melhor compreender a eficiência e limitações do uso dessas técnicas em ambientes heterogêneos como os solos hidromórficos.

Os perfis P5 e P5a representaram um comparativo pedogenético importante, que foi o grau de hidromorfismo distinto. O fracionamento físico verificou maiores diferenças no P5a, com predominância de C associado aos

minerais (CAM, 71 % e COP, 29 %), enquanto que no P5 a diferença entre as frações físicas foi menos acentuada (CAM, 58 % e COP, 43 %). Essa menor diferença no P5 ocorreu devido ao efeito da incorporação dos resíduos vegetais da cultura do arroz, que contribuiu com uma maior adição de COP ao solo. No caso do P5a, os resíduos vegetais do eucalipto permanecem sobre a superfície do solo, e a decomposição física ocorre inicialmente em superfície, para então decompor quimicamente ao longo do perfil do solo.

Os compartimentos químicos da MO mostraram proporções similares nos perfis P5 e P5a. A técnica de RMN ^{13}C CP-MAS revelou uma maior proporção de compostos alifáticos (C-alquil) e menor de carboidratos de polissacarídeos (C-O-alquil) no P5a, comparativamente ao P5. Consequentemente, o P5a apresentou maior grau de decomposição em relação ao P5 (0,78 e 0,63, respectivamente). Provavelmente, a drenagem mais eficiente no P5a garante um pedoambiente com menor grau de hidromorfismo, mais aerado e propício à maior transformação da MOS e à interação organomineral.

Formas mais intensivas de utilização do solo, geralmente induzem maiores mudanças no pedoambiente, as quais podem se refletir em alterações nas características do solo. O cultivo de arroz em sistema de preparo convencional influencia a dinâmica da MOS em ocasiões específicas, como por exemplo, após o revolvimento com a incorporação de MO fresca e na alternância de períodos de alagamento e drenagem. Comparativamente, o reflorestamento com eucalipto apresenta-se como uma forma de utilização menos intensa sob o ponto de vista do manejo, porém, em relação à pedogênese a drenagem permanente, a qual o solo é submetido, é um fator determinante de suas características morfológicas e químicas, bem como de uma dinâmica diferenciada da MOS.

Os perfis P6 e P6a possuem solos influenciados pelo processo pedogenético de paludização, que determina nesses pedoambientes características específicas e distintas em relação aos demais solos avaliados neste estudo. Com relação ao P6a, do teor de 49,09 g C kg⁻¹ solo, cerca de 83 % compreende C associado aos minerais (CAM). No fracionamento químico, a proporção da fração humina no COT foi de 62 %. Isto significa, respectivamente, uma MO em estágio de decomposição física e de proteção química avançado, sobretudo considerando o grau de hidromorfismo acentuado deste

pedoambiente.

Em comparação com os outros solos, a composição da MO no P6 e no P6a apresentou-se diferenciada, possivelmente devido ao material de origem desses solos, que é predominantemente orgânico e associado ao hidromorfismo acentuado. As proporções de C-O-alkil no P6 e no P6a foram de 37,7 e 39,9 %, respectivamente. Com as menores proporções relativas de C-O-alkil, outras estruturas apresentaram participação expressiva na composição da MO desses solos. Na MO do P6 ocorreu a maior proporção de C aromático dentre todos os solos (19,0 %), enquanto que na MO do P6a, a proporção de C-alkil é a mais elevada (44,3 %). Considerando que as frações ácido fúlvico e ácido húmico são as que possuem maior proporção de compostos aromáticos (Hayes et al., 2010), isso sugere que, embora não extraídas no P6, sejam predominantes em relação à humina nesse pedoambiente. Nesse sentido, a maior proporção de C-alkil no P6a pode indicar a preservação de uma MO, em sua maioria, recalcitrante, remanescente de um processo de degradação acentuado induzido pelo uso antrópico nesse pedoambiente.

O grau de decomposição da MO do P6 e do P6a obtidos pelo índice A/A-O foram respectivamente, 0,92 e 1,11, valores estes bem acima dos obtidos para os outros solos hidromórficos e para solos bem drenados em diversos trabalhos da literatura. De fato, dada a proximidade dos perfis e as referências geológicas (Villwock, 1972), o material orgânico genético do P6a seria o mesmo do P6: turfeiras originadas no Quaternário.

É possível inferir com base nas observações de campo (ambiente de formação) e de características morfológicas, físicas e químicas, que o P6a possui um maior grau de desenvolvimento pedogenético, e que fatores de influência antrópica, como a drenagem, podem ter contribuído para mudanças no regime hídrico com conseqüente subsidência do material orgânico. Entretanto, não é possível quantificar a participação dos fatores de influência antrópica na qualidade da MO desses solos.

3.7 Conclusões

1. O teor de COT foi inferior em solos hidromórficos sob usos mais intensivos, o que pode representar, em alguns casos, impacto na qualidade dos solos;

2. A distribuição das frações físicas da matéria orgânica do solo foi alterada pelo uso e manejo do solo, sendo o carbono orgânico particulado associado ao cultivo com arroz;

3. A fração humina foi predominante, independentemente dos tipos de solo hidromórfico e das formas de uso e manejo. Em solos com usos mais intensivos houve maior participação de frações orgânicas de baixo peso molecular e ácidos húmicos;

4. A composição estrutural da matéria orgânica dos solos hidromórficos variou entre os perfis avaliados, distinguindo principalmente solos com participação do processo pedogenético de paludização;

5. Dentro de um mesmo perfil, as diferentes formas de utilização do solo (tipo de cobertura vegetal, sistema de manejo e práticas de fertilização) alteraram a composição estrutural da matéria orgânica dos solos hidromórficos;

6. O grau de humificação da MOS avaliado pela técnicas de FIL e o grau de decomposição da MOS avaliado por RMN ^{13}C CP-MAS, variaram de acordo com os pedoambientes avaliados, sendo maiores nos perfis sob uso mais intensivo;

7. As técnicas espectroscópicas de FIL e RMN ^{13}C CP-MAS foram eficientes como indicadoras pedoambientais, revelando forte associação dos aspectos estruturais da MOS com a pedogênese.

4 CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho demonstrou que os solos hidromórficos da Região Metropolitana de Porto Alegre constituem pedoambientes pouco intemperizados, portanto com gênese bastante recente. Estes solos estão sujeitos a variações intensas em função da natureza do material de origem e dos diferentes graus de hidromorfismo, bem como, são passíveis de alterações induzidas pelas diferentes formas de uso e manejo.

Dentro do conjunto de pedoambientes avaliados, houve um predomínio da classe dos Gleissolos, no entanto, também foi verificada a ocorrência de solos de classes distintas, como por exemplo, o Organossolo Tiomórfico e o Planossolo Háptico, os quais apresentaram, respectivamente, o maior e menor grau de hidromorfismo, e a ocorrência de processos pedogenéticos díspares como a paludização e a lessivagem.

Os usos e manejos distintos induziram mudanças nos pedoambientes hidromórficos, que puderam ser detectadas através de alterações nas suas características físicas (distribuição granulométrica), químicas (acidez, teor de carbono orgânico, saturação por bases) e morfológicas dos solos (grau de hidromorfismo, espessura de horizontes, feições hidromórficas). Estas alterações podem constituir impactos ambientais de intensidade e escala variáveis, assim como ter implicações na classificação taxonômica dos solos.

A matéria orgânica dos solos hidromórficos apresentou diferenças quantitativas e qualitativas expressivas. O carbono orgânico total distinguiu classes de solos, destacando o papel da paludização nos teores elevados verificados no Organossolo Tiomórfico.

O predomínio de carbono associado aos minerais demonstrou que, fisicamente, a matéria orgânica dos solos hidromórficos é bastante transformada. Já o carbono orgânico particulado, ou fisicamente pouco

decomposto, foi mais expressivo nos solos hidromórficos sob cultivo de arroz.

A distribuição das frações químicas da matéria orgânica do solo mostrou um predomínio da fração humina em todos os solos hidromórficos, sugerindo que a manutenção da matéria orgânica nesses pedoambientes ocorre em função da recalcitrância bioquímica que é uma característica intrínseca desta fração. Nos solos hidromórficos sob usos mais intensivos houve maior participação de frações orgânicas mais humificadas como os ácidos húmicos. De modo particular, nos solos sob cultivo de arroz ocorreu maior participação de compostos orgânicos de baixo peso molecular.

As análises espectroscópicas de FIL e RMN ^{13}C CP-MAS foram eficientes como indicadores pedoambientais e mostraram que a composição estrutural da matéria orgânica dos solos hidromórficos variou de acordo com as diferenças pedogenéticas e os usos e manejos distintos dos solos. Pedoambientes com hidromorfismo acentuado, associado com influência flúvica ou orgânica, foram os que apresentaram composição estrutural da matéria orgânica mais distinta dentre os demais avaliados. O uso mais intensivo dos solos hidromórficos coincidiu com o aumento no grau de humificação e do grau de decomposição da matéria orgânica.

O uso de técnicas de avaliação sensíveis às mudanças induzidas pelo homem nos solos hidromórficos permitiu a compreensão mais objetiva da evolução desses pedoambientes. Os resultados obtidos pelas diferentes metodologias mostraram coerência entre os parâmetros avaliados em nível laboratorial e as observações pedológicas realizadas a campo.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, E. M. A.; FERNANDES, A. R.; RUIVO, M. L. P. Temporary and vertical variation of chemical attributes of a gleysol of the Guamá River cultivated with Canaranas. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, 2007.

ALVES, A. G. C.; MARQUES, J. G. W.; QUEIROZ, S. B.; SILVA, I. F.; RIBEIRO, Mateus Rosas. Caracterização etnopedológica de Planossolos utilizados em cerâmica artesanal no Agreste Paraibano. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, 2005.

ANGHINONI, I.; GENRO JR, S. A.; SILVA, L. S.; BOHNEN, H.; RHEINHEIMER, D. S.; OSORIO FILHO, B. D.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLIN, E. **Fertilidade do Solos Cultivados com Arroz Irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha RS: IRGA, 2004 (Boletim Técnico).

ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; FONTANA, A. Matéria Orgânica e Pedogênese. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo Ecossistemas Tropicais e Subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metropole, 2008. v. 1, p. 65-86.

AZAMBUJA, J. H. V.; VERNETTI JR., F. J.; MAGALHÃES JR., A. M. Aspectos sócio-econômicos da produção de arroz. In: ARROZ irrigado no Brasil. Brasília (DF) : EMBRAPA Informações Tecnológicas, 2004.

ANDRIESSE, J. Uso de solos orgânicos em condições tropicais e subtropicais aliado às possibilidades brasileiras. SIMPÓSIO NACIONAL DE SOLOS ORGÂNICOS, Curitiba, 1984. **Anais...** Curitiba, 1984. p.11-34.

BALDOCK, J.A.; OADES, J.M.; NELSON, P.N.; SKENE, T.M.; GOLCHIN, A.; CLARKE, P. Assessing the extent of decomposition of natural organic materials using solid state C-13 NMR spectroscopy. **Aust. J. Soil Res.**, Collingwood, 49, 1061–1083.

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas conservacionistas de manejo do solo**. 1996. 202 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Definição de matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo Ecossistemas Tropicais e Subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. v. 1, p. 7-16.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; SAAB, S.; MILORI, D. M. P.; BAGNATO, W. (2002) Tillage and cropping system effects on soil humic acid characteristics as determined by electron spin resonance and fluorescence spectroscopies. **Geoderma**, Amsterdam, v.105, p.81-92.

BAYER, C.; COSTA, F. S.; GOMES, J.; LIMA, M. A.; FRIGHETTO, R. T.; MACEDO, V. Mitigação das emissões de metano em lavouras de arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado, RS. **Anais...** Viçosa, MG, 2007.

BHARATI, K.; MOHANTY, S. R.; RAO, V. R.; et al. Influence of flooded and non-flooded conditions on methane efflux from two soils planted to rice. **Chemosphere** – Global Change Science, Oxford, v.3, n.1, p.25-32, 2001.

BOHNEN, H.; SILVA, L. S.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLIN, E. Ácidos orgânicos na solução de um Gleissolo sob diferentes sistemas de cultivo com arroz irrigado. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.29, p.475-480, 2005.

BONIFACIO, E.; SANTONI, S.; CELI, L.; ZANINI, E. (2006). Spodosol-Histosol evolution in the Krkonose National Park (CZ). **Geoderma**, Amsterdam, v.131, p.237-250.

BONNEVILLE, S.; VAN CAPPELLEN, P.; BEHREND, T. Microbial reduction of iron(III) oxyhydroxides: Effects of mineral solubility and availability. **Chem. Geol.**, Amsterdam, v.212, p.255-268, 2004.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 13.ed. New Jersey, Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 960p.

BRASIL. **Levantamento de Reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973.

BUOL, S. W.; HOLE, F. D.; McCRAKEN, R. J. **Soil Genesis and Classification** Iowa, USA : Iowa State University Press, 1997. 435 p.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, WI, v.56, p.777-783, 1992.

CHEFETZ, B.; HATCHER, P.; HADAR, Y.; CHEN, Y. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. **J. Environ. Qual.**, Madison, v.25, p.776-785, 1996.

CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Adv. Soil Sci.**, New York, v.20, p.1-90, 1992.

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de perfis plúnticos desenvolvidos de arenito do Grupo Bauru: II - mineralogia. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, 2003.

CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.

Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.32, p.541-549, 2008.

CONCEIÇÃO, P. C. **Agregação e proteção da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil**. 2006. 138 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CONTE, P.; PICCOLO, A. Conformational arrangement of dissolved humic substances. Influence of solution composition on association of humic molecules. **Environ. Sci. Technol.**, Washington, v.32, p.1682-1690, 1999.

CORVASCE, M.; ZSOLNAY, A.; D'ORAZIO, V.; LOPEZ, R.; MIANO, T. M.; 2006. Characterization of water extractable organic matter in a deep soil profile. **Chemosphere**, Amsterdam, v.62, p.1583–1590.

COSTA, F. S. et al. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, 2008.

DAI, K. H.; JOHNSON, C. E. Applicability of solid-state ¹³C CP/MAS NMR analysis in Spodosols: chemical removal of magnetic materials. **Geoderma**, Amsterdam, v. 93, p. 289-310, 1999.

DICK, D. P.; GOMES, J.; ROSINHA, P. B. Caracterização de substâncias húmicas extraídas de solos e de lodo orgânico. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 22, p. 603-611, 1998.

DICK, D. P.; MARTINAZO, R. Matéria orgânica em ambientes terrestres e aquáticos: composição, reações e técnicas de caracterização. In: POLETO, C.; MERTEN, G. (Org.). **Qualidade de Sedimentos**. Porto Alegre: [s.n.], 2006. v. 1, p. 65-80.

DICK, D. P.; MANGRICH, A. S.; MENEZES, S. M. C.; PEREIRA, B. F. Chemical and spectroscopical characterization of humic acids from two south Brazilian coals of different ranks. **J. Braz. Chem. Soc.**, São Paulo, v.13, p.177-182, 2002.

DICK D. P.; BARROS, L. S.; INDA JUNIOR, A. V.; KNICKER, H. Estudo comparativo da matéria orgânica de diferentes classes de solos de altitude do sul do Brasil por técnicas convencionais e espectroscópicas. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v.32, p.2289-2296, 2008.

DIECKOW, J.; BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J. **Sistemas conservacionistas de preparo do solo e sua implicação no ciclo do carbono**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2004 (Boletim de Pesquisa).

DORAN, J. W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Palestras...** Rio de Janeiro, 1997. 1 CD-ROM.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FAGÉRIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P.; ZIMMERMANN, J. P. Caracterização química e granulométrica de solos de várzea de alguns estados brasileiros. **Pesq. Agropec. Bras.**, Campinas, v.29, p.267-274, 1994.

FANNING, S. D.; FANNING. **Soil Genesis, morphology and classification**. Washington, USA, 1989. p. 69-80.

FAVORETTO, C. M. et al. Determinação da humificação da matéria orgânica de um latossolo e de suas frações organo-minerais. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 31, n.8, 2008.

FERNANDES, F. A.; CERRI, C.C.; FERNANDES, A. H. B. M. Alterações na matéria orgânica de um podzol hidromórfico pelo uso com pastagens cultivadas no pantanal mato-grossense. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 34, n. 10, Oct. 1999.

GONDAR, D.; LOPEZ, R.; FIOL, S.; ANTELO, J. M.; ARCE, F. Characterization and acid-basic properties of fulvic and humic acids isolated from two horizons of an ombrotrophic peat bog. **Geoderma**, Amsterdam, v.126, p.367-374, 2004.

GONZÁLEZ-PÉREZ, M.; MARTIN-NETO, L.; SAAB, S.C.; NOVOTNY, E.H.; MILORI, D.M.B.P.; BAGNATO, V.S.; COLNAGO, L.A.; MELO, W.J.; KNICKER, H. Characterization of humic acids from a Brazilian Oxisol under different tillage systems by EPR, ¹³C NMR, FTIR and fluorescence spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.118, p.181-190, 2004.

GUERRA, J. G. M.; SANTOS, G. A. Métodos químicos e físicos. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo Ecossistemas Tropicais e Subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. v.1, p.185-200.

GUO, J.; ZHOU, C. Greenhouse gas emissions and mitigation measures in Chinese agroecosystems. **Agri. For. Met.**, Amsterdam, v.142, p.270-277, 2007.

HASENACK, H.; WEBER, E. GIASSON, E.; KLAMT, E.; SCHNEIDER, P.; KAMPF, N. Levantamento de Solos do município de porto Alegre. In: DIAGNÓSTICO Ambiental do Município de Porto Alegre. Porto Alegre : Departamento de Ecologia da UFRGS, 2004.

HAYES, M.H. B.; SWIFT, R.S.; BYRNE, C.M.; SONG, G.; SIMPSON, A.J. Humin: The Simplest of the Humic Fractions. In: MEETING OF THE INTERNATIONAL HUMIC SUBSTANCES SOCIETY, 15., 2010, Puerto de La Cruz - Spain. [**Proceedings...**] [Puerto de La Cruz – Spain], 2010.

INDA JUNIOR, A. V. **Caracterização de goethita e hematita em solos**

poligenéticos. 2002. 125 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

INDA JUNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Avaliação de procedimentos de extração dos óxidos de ferro pedogênicos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v.27, p.1139-1147, 2003.

JELINSKI, L. W.; MELCHIOR, M. T. High-Resolution NMR of solids. **Applied Spectr. Rev.**, Kansas City, v. 35. p.25-93, 2000.

KÄMPF, N. O Ferro no solo. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, 1987, [Brasília]. [**Trabalhos apresentados**]. Brasília (DF) : Provárzeas Nacional : Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1987.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.1, p.107-138, 2000.

KIRK, G. J. D; OLK, D. C. **Carbon and nitrogen dynamics in flooded soils**. Los Baños, Philippines : International Rice Research Institute, 2000. 188p.

KLAMT, E.; KAMF, N.; SCHNEIDER, P. **Solos de várzea no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre (RS) : Departamento de Solos da UFRGS, 1985. (Boletim técnico, 4).

KNICKER, H. Biogenic nitrogen in soils as revealed by solid-state carbon-13 and nitrogen-15 nuclear magnetic resonance spectroscopy. **J. Env. Qual.**, Madison, v. 29, n. 3, p. 715-723, 2000.

KOGEL-KNABNER, I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. **Soil Biol. Biochem.**, Amsterdam, v.34, p.139-162, 2002.

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

LEE, S. B.; LEE, C. H.; JUNG, K. Y.; PARK K. D.; LEE, D. K.; KIM, P. J. Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.104, p.227-232, 2009.

LEITE, F. P.; BARROS, N. F.; SANS, L. M. A.; FABRES, A. S. Regime hídrico do solo sob povoamento de eucalipto, floresta nativa e pastagem, na Região de Guanhães-MG. **Rev. Árvore**, Viçosa-MG, v.21, n.4, p. 455-462, 1997.

LIMA, A. C. R.; HOOGMOED, W. B.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. Management systems in irrigated rice affect physical and chemical soil properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 92-97, 2008.

LOSS, A. et al. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 4, 2009 .

MAIE, N.; WATANABE, A.; HAYAMIZU, K.; KIMURA, M.; 2002. Comparison of chemical characteristics of Type A humic acids extracted from subsoils of paddy fields and surface ando soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.106, p.1-19.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F. Depósitos superficiais neocenozóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociências**, São Paulo (SP), v.19 p.90-106, 2000.

MARTIN-NETO, L.; NASCIMENTO, O. R.; TALAMONI, J.; POPPI, N. R. EPR of micronutrients-humic substances complexes extracted from Brazilian soil. **Soil Sci.**, Philadelphia, v.151, p.369–376, 1991.

MARTIN-NETO, L.; BONAGAMBA, T. J.; COLNAGO, L. A.; PANEPUCCI, H. C.; VIEIRA, E.; MIYAZAWA, M. Efeitos de diferentes manejos do solo sobre substâncias húmicas: avaliação com ressonância magnética nuclear. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, 1995, Viçosa. **Anais...** Viçosa, 1995. v.4, p.1810-1812.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, Ottawa, v. 7, p. 317-27, 1960.

MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BAYER, C.; MIELNICZUCK, J.; BAGNATO, V. S. Humification degree of soil humic acids determined by fluorescence spectroscopy. **Soil Sci.**, Philadelphia, v.167, p.739-749, 2002.

MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; GALETI, H V A ; GONZALEZ-PEREZ, M.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; SALTON, J. **Índice de humificação obtido através da fluorescência induzida por laser**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2004 (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento).

MILORI, D. M. B. P.; GALETI, H. V. A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZÁLEZ-PÉREZ, M.; BAYER, C.; SALTON, J. Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil Sc. Soc. of Am. J.**, Philadelphia, v.70, p.57-63, 2006.

MIRANDA, C. C.; CANELLAS, L. P.; TRINDADE NASCIMENTO, M. Caracterização da matéria orgânica do solo em fragmentos de mata atlântica e em plantios abandonados de eucalipto. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, 2007.

MONIZ, A. C.; BUOL, S. W. Formation of an Oxisol-Ultisol transition in São Paulo, Brazil. I. Double layer water flow model of soil development. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.46, p.1228-1233, 1982.

MONTAGNE, D.; CORNU, S.; LE FORESTIER, L.; COUSIN, I. Soil drainage as an active agent of recent soil evolution: A review. **Pedosphere**, Nanjing, v.19, n.1, p.1–13, 2009.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesq. Agrop.Br.**, Brasília, v.40 p.69-77, 2005.

NASCIMENTO, P. C. do: **Gênese dos solos Hidromórficos no Estado do Espírito Santo, com ênfase na matéria orgânica e no enxofre**. 2004. 165 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2004.

NASCIMENTO, P. C.; LANI, J. L.; MENDONÇA, E. S.; ZOFFOLI, H. J. O.; PEIXOTO, H. T. M. Teores e características da matéria orgânica de solos hidromórficos do Espírito Santo. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa-MG, v.34, n.2, p.339-348, 2010.

NASCIMENTO, P. C. et al. Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, 2009.

NUNES, M. L.; KLAMT, E.; REICHERT, J. M & DALMOLIN, R. S. D. Características de solos sistematizados em duas áreas cultivadas com arroz sob inundação. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v.26, p.395-406, 2002.

OADES, J. M. The retentions of organic matter in soils. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 5, p. 35-70, 1988.

OLENDZKI, R. N.; IGNACIO, A. C.; MANGRICH, A. S. The use of total luminescence spectroscopy in the investigation of the effects of different rice management practices on humic substances of a planosol. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, 2009.

OLIVEIRA, L. B.; RIBEIRO, M. R; FERRAZ, F. B.; JACOMINE, P. K. T. Classificação de solos planossólicos no Sertão do Araripe (PE). **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v.27, p.685-693, 2003.

PATRICK, W. H.; REEDY, C. N. Chemical Changes in Rice Soils. In: CHEMICAL and Electrochemical changes in rice soils. Phillipines : Internacional Rice Ressearch Institute, 1978. p. 361-379.

PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; PINTO, L. F. S. Física de solos de várzea cultivados em arroz irrigado. In: ARROZ irrigado no Brasil. Brasília (DF) : EMBRAPA Informações tecnológicas, 2004.

PEREIRA, M. G. et al. Organic carbon determination in histosols and soil horizons with high organic matter content from Brazil. **Sci. agric.** , Piracicaba, v. 63, n. 2, Apr. 2006.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Adv. in Agron.**, New York, v.24, p.29-96, 1972.

POTES, M. L. et al. Matéria orgânica em Neossolo de altitude: influência do manejo da pastagem na sua composição e teor. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p.23-34, 2010.

QUIRCK, J. P. Significance of surface areas calculated from water vapour sorption isotherms by use of B.E.T. equation. **Soil Sc.**, Philadelphia, v.80, p. 423-430,1955.

RADAMBRASIL. **Levantamento de recursos Naturais**. Folha SH 22 – Porto Alegre e parte das Folhas SH 21 – Uruguaiiana e SI 22 – Lagoa Mirim. Rio de Janeiro : Fundação Instituto Brasileiro de Geografia Estatística, 1986.

RODEN, E. Fe(III) oxide reactivity toward biological versus chemical reduction. **Environ. Sci. Technol.**, Washington, v.37, p.1319–1324, 2003.

ROSA, C. M. et al . Teor e qualidade de substâncias húmicas de planossolo sob diferentes sistemas de cultivo. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 6, 2008.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86p.

SAAB, S. C.; MARTIN-NETO L. Anéis aromáticos condensados e relação E4/E6: estudo de ácidos húmicos de gleissolos por RMN de ^{13}C no estado sólido utilizando a técnica CP/MAS desacoplamento defasado. **Quím. Nova**, São Paulo, v.30, n.2, 2007.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L. H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5.ed. Viçosa, MG : SBCS/SNLCS, 2005. 100p.

SCHNITZER, M. Humic substances: chemistry and reactions. In: SCHNITZER, M.; KHAN, S. U. (Ed.). **Soil organic matter**. New York: Elsevier, 1978. p. 1-64.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisenoxide des bodens durch extraktion mitammoniumoxalat-lösung. **Zeitschrift Fur Pflanzenernährung Und Bodenkunde**, Weinheim, v.105, p.194-202, 1964.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron Oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B.(Eds). **Minerals in Soil Environments**. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 379-438.

SCHWERTMANN, U. The effects of pedogenic environments on iron oxides minerals. **Adv.Soil Sc.**, New York, v. 1, p. 171-200, 1985.

SILVA, L. S.; SOUSA, R. O.; POCOJESKI, E. Dinâmica da matéria orgânica em ambientes alagados. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. v. 1,

p. 525-543.

SILVERSTEIN, R. M.; BONLER, G. C.; MORRILL, T. C. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1994. 387p.

SIMPSON, M. J.; JOHNSON P. C. E. Identification of mobile aliphatic sorptive domains in soil humin by solid-state ^{13}C Nuclear Magnetic Resonance. **Environmental Toxicology and Chemistry**, Malden, MA, USA, v.25, p.52-57, 2006.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K.; DORAN, J. W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. **Soil Sc. Soc. Am. J.**, Madison, v. 62, p. 1367-1377, 1998.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; SÁ, J. C. M.; ALBERECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils effects of no-tillage. **Agronomie**, Paris, v. 22, p. 755-77, 2002.

SOUZA JUNIOR, V. S.; TORRADO, P. V.; TESSLER, M. G.; PESSEDA, L. C. R.; FERREIRA, T. O.; OTERO, X. L.; MACIAS, F. Evolução quaternária, distribuição de partículas nos solos e ambientes de sedimentação em manguezais do estado de São Paulo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 31, p. 753-769, 2007.

STEVENSON, F.J. **Humus Chemistry**. New York : Wiley, 1994. 497p.

STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre : Editora da UFRGS, 2002.

SWIFT, R. S. Method for extraction of IHSS soil fulvic and humic acids. In: SPARK, K. M.; WELLS, J. D.; JOHNSON, B. B. **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 1018-1020.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Departamento de Ecologia. **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. Disponível em www.ufrgs.br/ecologia. Acesso em: out. 2006.

VAN BREEMEN, N. ; PONS, L. J. Acid Sulfate Soils and Rice. In: CHEMICAL and Electrochemical Changes in Rice Soils. Phillipines : International Rice Research Institute, 1978. p. 739 – 759.

VARGAS, L. K.; SCHOLLES, D. Biomassa microbiana e produção de CO₂ e N mineral de um Podzólico Vermelho-Escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 35-42, 2000.

VILLWOCK, J. A. **Contribuição à geologia do Holoceno da província costeira do Rio Grande do Sul**. 1972. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1972.

WITTE, I. **Alterações em características físicas de uma transeção de solos orgânicos da planície costeira do Estado do Rio Grande do Sul por efeito da drenagem**. 1990. 119f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; VIEIRA, F. C. B.; MIELNICZUK, J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.94, p.510-519, 2007.

ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T. M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, p.117-161, 1997.

ZSCHORNACK, T.; FERNANDEZ, F. F.; PILLON, C. N.; ROSA, C. M.; TOMAZI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; BAYER, C. Caracterização dos estoques e das frações da matéria orgânica em solos de várzea da Região Sul do Rio Grande do Sul. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 31. **Anais.** Gramado, impresso, p.124-128, 2007.

6 APÉNDICES

Apêndice 1 – Descrição morfológica dos perfis de solos hidromórficos

P1 (Gleissolo Melânico Ta eutrófico típico)

Localização: próximo ao Clube Náutico Marina Lessa, Belém Novo (0484478/6656215 – UTM), município de Porto Alegre.

Data: 03/06/2006

Cobertura vegetal: campo nativo

Situação e declive: 0 a 2% declividade

Formação geológica: Graxaim

Cronologia: período Quaternário

Material originário: sedimentos argilosos

Relevo local e regional: plano

Erosão: nula

Drenagem : imperfeitamente drenado

Uso atual : Pecuária

Clima: Cfa, (Köppen)

Descrito e coletado por: Paulo César Nascimento, Alberto Inda Vasconcelos Junior, Edar Ferrari Filho, Fernando Vieiro e Ana Clara Vian.

Descrição Morfológica

- A 0-18 cm; bruno escuro (10YR 3/3, úmido); argilosa a muito argilosa; moderada pequena a média blocos angulares; firme (úmida) e plástica e pegajosa (molhada); transição clara e ondulada.
- B 18-43 cm; bruno acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido) e mosqueado médio comum (5YR 5/8, úmido); argilosa a muito argilosa; moderada a média blocos angulares; friável (úmida); ligeiramente pegajosa a pegajosa e plástica (molhada); transição clara e plana.
- BC 43-60 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/2, úmida) e mosqueado pequeno pouco (10YR 6/6, úmido); argilosa; maciça; friável (úmida); pegajosa e plástica (molhada); transição clara plana.
- C 60-80 cm+; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/2, úmida) e mosqueado médio comum (10YR 6/6, úmida); argilosa; maciça grandes blocos subangulares, faces laterais de agregados com estrias (slickensides); firme(úmida); pegajosa e plástica (molhada).

P2 (Gleissolo Háptico Ta distrófico típico)

Localização: estação experimental do Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA), Cachoeirinha.

Data: 18/10/2005

Material de origem: sedimentos aluviais

Relevo local: plano

Uso: cultivo de arroz

Drenagem: mal drenado

Descrito e coletado por: Paulo César do Nascimento, Luís de França da Silva

Neto e Tatiana Cardoso Alves.

Descrição Morfológica

- Ap 0-5 cm; bruno escuro (7,5 YR 4/2); franco-argilosa; moderada pequena a média blocos subangulares; ligeiramente dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana e clara;
- A1 5-23 cm; bruno acinzentado escuro (10 YR 4/2); franco argilosa; fraca grande blocos subangulares a maciça; dura, friável, plástica e pegajosa; transição clara e plana;
- AB 23-40 cm; bruno acinzentado escuro (10 YR 4/2); mosqueado pequeno comum Bruno forte (7,5 YR 4/6) ; franco argilosa; moderada grande blocos subangulares; muito friável, plástica e pegajosa; transição gradual e plana;
- Bg1 40-76 cm; bruno acinzentado (10 YR 5/2); mosqueado médio comum a abundante bruno amarelado (10 YR 5/6); argila; moderada a forte grande prismática; muito friável, muito plástica e pegajosa; transição gradual e plana;
- Bg2 76-95+ cm; bruno acinzentado (10 YR 5/2); mosqueado pequeno comum Bruno amarelado (10 YR 5/6); argila; moderada a forte grande prismática; ligeiramente firme; muito plástica e pegajosa.

P3 (Gleissolo Háptico Ta eutrófico neofluvissólico)

Localização: próximo ao Teresópolis Tênis Clube, Ponta Grossa, município de Porto Alegre.

Data: 23/09/2006

Situação, declive e cobertura vegetal: relevo plano, área de planície aluvial.

Formação geológica: Grupo Patos.

Material de origem: sedimentos argilo-arenosos recentes, origem fluvial

Pedregosidade: não pedregosa.

Rochosidade: não rochosa.

Relevo local: relevo plano.

Relevo regional: relevo plano.

Erosão: não aparente.

Drenagem: mal drenado

Vegetação primária: vegetação pioneira, higrófilas.

Uso atual: pastagens.

Descrito e coletado por: Fernando Vieiro, Paulo César do Nascimento, Ana Clara Vian e Carlos Alberto.

Descrição Morfológica

- A 0-18/22 cm; cinza escuro (2,5Y 4/1), mosqueado comum pequeno bruno avermelhado (5YR 4/4); franco argilosa; fraca muito grande blocos subangulares; friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa;

transição clara e ondulada.

- C1 18/22-35 cm; cinza escuro (2,5Y 4/1), mosqueado comum médio bruno avermelhado (5 YR 4/4); franco argilosa; fraca muito grande blocos subangulares a maciça; friável, não plástica e não pegajosa; transição clara e plana
- 2C2 35-70 cm; variegado cinza (2,5Y 5/1), cinza brunado claro(2,5Y 6/2), branco (5YR 8/1); franco argilosa muito cascalhenta; solta a muito friável; não plástica e não pegajosa; transição clara e plana.
- 3C3 70-90+ cm; cinza escuro azulado (3/10 BG); franco argilosa; maciça; friável; ligeiramente plástica e não pegajosa.

Raízes: muitas em A; poucas em C1; ausentes em 2C2 e 3C3.

P4 (Planossolo Háplico eutrófico solódico)

Localização: Ponta Grossa, município de Porto Alegre.

Data: 28/10/2006

Situação, declive e cobertura vegetal: relevo plano com alguns morros testemunhas.

Material de origem: sedimentos argilo-arenosos, formações Graxaim e Chuí (Grupo Patos).

Pedregosidade: não pedregosa.

Rochosidade: não rochosa.

Relevo local: relevo plano.

Relevo regional: relevo plano com alguns morros testemunhas.

Erosão: não aparente.

Drenagem: moderada a imperfeitamente drenado.

Vegetação primária: vegetação pioneira, higrófilas.

Uso atual: pastagem.

Clima: Cfa, (Köppen).

Descrito e coletado por: Fernando Vieiro, Paulo César do Nascimento, Ana Clara Vian, Patrícia Pinheiro e Salua Pires.

Descrição Morfológica

- Ap 0-7cm; bruno escuro (10 YR 3/3); franco arenosa; moderada pequena granular; friável(úmida), ligeiramente plástica pegajosa(molhada); transição clara plana;
- A 7-23cm; bruno amarelado escuro (10YR 4/4); mosqueado pequeno comum bruno forte (7,5YR 5/8); franco argilo-arenosa; moderada média a grande blocos subangulares; friável(úmida), ligeiramente plástica pegajosa(molhada); transição gradual plana;
- AB 23-50/54cm; bruno acinzentado escuro (10YR 4/2), mosqueado pequeno abundante bruno forte (7,5YR 5/8); franco argilosa; moderada média a grande blocos subangulares; friável(úmida), plástico e

pegajoso(molhada); transição abrupta ondulada;

Bt 50/54-90+; cinza muito escuro (10YR 3/1), mosqueado pequeno comum vermelho (2,5YR 4/8) e mosqueado médio comum (10YR 6/8)*; argila; moderada média a grande prismática e blocos subangulares; firme(úmida), plástico e pegajoso(molhada); cerosidade pouca e moderada.

Raízes: abundante em Ap, muitas em A, comum em AB e poucas em Bt
* consistência diferenciada, aparência de plintita.

P5 (Planossolo Háplico distrófico plíntico)

Localização: Agropecuária Pesqueiro, Eldorado do Sul, entrada do 4 km da BR 290 (0460954/6680282 – UTM).

Data: 09/12/2006.

Situação, declive e cobertura vegetal: relevo plano, 1 a 2% declive.

Material Originário: sedimentos argilo-arenosos

Pedregosidade: não pedregosa.

Rochosidade: não rochosa.

Relevo local: relevo plano.

Relevo regional: relevo plano.

Erosão: não aparente.

Drenagem: imperfeitamente drenado

Vegetação primária: vegetação pioneira, higrófilas.

Uso atual: cultura do arroz.

Clima: Cfa, (Köppen).

Descrito e coletado por: Paulo César do Nascimento, Luís de França da Silva Neto, Ana Clara Vian, Fernando Vieiro e Salua Pires.

Descrição Morfológica

Ap 0-24cm; bruno oliváceo escuro (2,5Y 3/3), mosqueado médio comum vermelho (10R 4/6); franca; granular a moderada média blocos subangulares; muito friável(úmida), ligeiramente plástica, não pegajosa(molhada); transição clara plana;

A 24-29/32 cm; bruno acinzentado escuro (10YR 4/2); franca a franco argilosa; moderada média, blocos angulares; firme(úmida), plástica e pegajosa(molhada); transição clara ondulada;

E 29/32-60 cm; bruno (7,5YR 4/2); franca a franco argilosa; moderada média a grande blocos subangulares; firme(úmida), plástico e pegajoso(molhada); transição gradual plana;

EB 60-85 cm; bruno (7,5YR 4/2), mosqueado médio comum bruno forte (7,5YR 5/6); franco argilosa a argila; moderada média a grande blocos subangulares; firme (úmida), plástico e pegajoso(molhada); transição clara e plana;

Bt 85-120+ cm; cinza escuro (10YR 4/1) mosqueado grande abundante bruno forte (7,5YR 5/8) e médio comum vermelho (2,5 YR 4/8)*; argila a muito argilosa; moderada média a grande blocos subangulares a moderada média prismática; firme, plástica e muito pegajosa.

Raízes: abundantes em Ap; poucas em A e E; raras em EB e Bt.

* estruturas destacáveis – plintita.

P5a (Planossolo Háptico alítico plíntico)

Localização: Agropecuária Pesqueiro, Eldorado do Sul, entrada do 4 km da BR 290 (0460848/6680560 – UTM).

Data: 09/12/2006.

Situação, declive e cobertura vegetal: relevo plano, 1 a 2% declive.

Material de origem: sedimentos argilo-arenosos

Pedregosidade: não pedregosa.

Rochosidade: não rochosa.

Relevo local: relevo plano.

Relevo regional: relevo plano.

Erosão: não aparente.

Drenagem: imperfeita.

Vegetação primária: vegetação pioneira, higrófilas.

Uso atual: reflorestamento com eucalipto.

Clima: Cfa, (Köppen).

Descrito e coletado por: Paulo César do Nascimento, Luís de França da Silva Neto, Ana Clara Vian, Fernando Vieiro e Salua Pires.

Descrição Morfológica (tradagem)

A 0-25 cm; bruno (10YR 4/3); franca a franco argilosa; granular a moderada média blocos subangulares; friável(úmida), ligeiramente plástica, não pegajosa(molhada);

E 25-55 cm; bruno amarelado (10 YR 5/4); franca a franco argilosa; friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa;

BE 55-70 cm; bruno(10 YR 5/3), mosqueado médio comum vermelho (2,5YR 4/6); franca argilosa a argila; firme(úmida), plástico e pegajoso(molhada);

Bt 70-90+ cm; bruno (10YR 5/3), mosqueados grande comum (2,5YR 4/8), argila; firme(úmida), plástico e pegajoso(molhada).

P6 (Organossolo Tiomórfico sáprico típico)

Localização: área pertencente à colônia japonesa de Itapuã, Itapuã, município de Viamão (0501620/6643960 – UTM).

Data: 16/12/2006.

Situação, declive e cobertura vegetal: relevo plano, 1 a 2% declive.

Material de origem: sedimentos de origem orgânica

Pedregosidade: não pedregosa.

Rochosidade: não rochosa.

Relevo local: relevo plano.

Relevo regional: relevo plano.

Erosão: não aparente.

Drenagem: mal drenado

Vegetação primária: vegetação pioneira, higrófilas.

Uso atual: pastagem.

Clima: Cfa, (Köppen).

Descrito e coletado por: Paulo César do Nascimento, Luís de França da Silva Neto, Ana Clara Vian, Fernando Vieiro e Vladirene Macedo.

Descrição Morfológica

H1 0-22 cm; preto (2,5/N), orgânico; moderada média grumosa; ligeiramente firme(úmida), não plástica, não pegajosa (molhada); transição clara plana;

H2 22-46 cm; preto (2,5/N); orgânico; fraca média grumosa; friável (úmido), ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa; transição gradual plana;

H3 46-100+ cm; preto (2,5/N); orgânica; maciça; friável (úmido), ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

Raízes: abundantes em H1; muitas em H2 e H3

Grau de decomposição do material orgânico (escala Van Post): 2 a 3 em H1; 7 a 8 em H2 e H3.

P6a (Gleissolo Melânico Ta eutrófico típico)

Localização: Fazenda Lagoa Negra Itapuã, município de Viamão (0501920/66434500 – UTM).

Data: 16/12/2006.

Situação, declive e cobertura vegetal: relevo plano, 1 a 2% declive.

Material de origem: sedimentos origem orgânica e mineral (argilosos a arenosos) do período Quaternário.

Pedregosidade: não pedregosa.

Rochosidade: não rochosa.

Relevo local: relevo plano.

Relevo regional: relevo plano.

Erosão: não aparente.

Drenagem: imperfeitamente a mal drenado.

Vegetação primária: vegetação pioneira, higrófilas.

Uso atual: arroz.

Clima: cfa.

Descrito e coletado por: Paulo César do Nascimento, Luís de França da Silva Neto, Ana Clara Vian, Fernando Vieiro e Vladirene Macedo.

Descrição Morfológica (tradagem)

- A 0-50 cm; preto (2,5/N); franco arenosa; friável (úmida), ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa plástica;
- AB 50-90 cm; preto (2,5/N); franco argilosa; friável (úmido), ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa;
- Bt 90-150 cm; bruno acinzentado escuro(10 YR 4/2), mosqueado médio a grande pouco a abundante bruno forte (7,5 YR 5/8); argilosa a muito argilosa; firme(úmido), plástica e pegajosa.
- C 150-170+; cinza brunado claro (10 YR 6/2), mosqueado médio comum bruno amarelado (10 YR 5/8) ; franco argilo arenosa; ligeiramente firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa.

Apêndice 2 - fotos dos ambientes de coleta dos solos.

Foto 1: ambiente do P2 e P2a, durante a descrição morfológica e coleta de solo.



Foto 2: trincheira do P2 sob pousio (cortesia do professor Humberto Bohnen).



Foto 3: Ambiente de coleta do P3.



Foto 4: Ambiente de coleta do P4.



Foto 5: Trincheira aberta do P4 por ocasião da descrição morfológica e coleta de solo.



Foto 6: ambiente do P5 (arroz) e P5a (eucalipto) por ocasião da descrição morfológica e coleta de solo.