

**Otávio dos Anjos Leal**

**Frações e qualidade da matéria orgânica de um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área do conhecimento: Solos).

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Rosa Maria Vargas Castilhos  
Co-orientadores: Dr<sup>a</sup>. Flávia Fontana Fernandes  
Dr. Clenio Nailto Pillon

**Otávio dos Anjos Leal**

**Frações e qualidade da matéria orgânica de um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão**

Banca examinadora:

Professora Dr<sup>a</sup>. Rosa Maria Vargas Castilhos – UFPEL (Presidente)

Professor Dr. Luiz Fernando Spineli Pinto – UFPEL

Professora Dr<sup>a</sup>. Cláudia Liane Rodrigues de Lima - UFPEL

Pós Doutoranda Carla Machado da Rosa - UFRGS

**Dados de catalogação na fonte:**  
( Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744 )

L435f Leal, Otávio dos Anjos

Frações e qualidade da matéria orgânica de um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão / Otávio dos Anjos Leal ; orientador Rosa Maria Vargas Castilhos; co-orientadores Flávia Fontana Fernandes e Clenio Nailto Pillon. - Pelotas,2011.- 113f. ; il.-  
Dissertação ( Mestrado ) –Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel .  
Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2011.

Dedico:  
A toda minha família

## AGRADECIMENTOS

À professora Rosa Maria Vargas Castilhos pelos anos de aprendizado desde o período de iniciação científica.

À professora Flávia Fontana Fernandes pela co-orientação.

Ao pesquisador Clenio Nailto Pillon pela co-orientação e por disponibilizar os laboratórios da Embrapa Clima Temperado.

Ao professor Eloy Antonio Pauletto pela coordenação do projeto de recuperação da área de mineração de Candiota.

À professora Cláudia Liane Rodrigues de Lima pela amizade e apoio durante o período de realização do mestrado.

A todos os professores do Departamento de Solos pelos ensinamentos transmitidos.

A todos os colegas de turma pelos momentos de aprendizado, troca de experiências e confraternização.

À colega Carla Machado da Rosa pelos ensinamentos transmitidos e pela amizade.

Às colegas Daiane Carvalho dos Santos e Roberta Jeske Kunde pelo apoio e ensino na realização das análises.

Às estagiárias Elisa Souza Lemes e Letiane Helwig Penning e aos funcionários do Departamento de Solos pelo auxílio na realização das análises.

À pesquisadora Débora Marcondes B. P. Milori por disponibilizar os laboratórios da Embrapa Instrumentação Agropecuária para a realização de análises de Fluorescência.

Ao Instituto de Química pela realização de análises de Infravermelho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos e pelo projeto Rede do Carvão.

À Universidade Federal de Pelotas, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À Companhia Riograndense de Mineração (CRM) por disponibilizar uma área para desenvolvimento do experimento e pelo apoio financeiro.

Aos meus familiares Ubirajara Garcia Leal (pai), Liliane Munhoz dos Anjos Leal (mãe), Lucas dos Anjos Leal e Laura dos Anjos Leal (irmãos) e a todos os demais familiares pelo apoio e incentivo durante o período de realização do mestrado.

A todos que não foram mencionados, mas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

LEAL, Otávio dos Anjos. **Frações e qualidade da matéria orgânica de um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão.** 2011. 113f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Após a mineração do carvão é necessária a recomposição topográfica da área, originando solos construídos, os quais normalmente apresentam baixos estoques de matéria orgânica do solo (MOS). As coberturas vegetais podem recuperar estes estoques, melhorando as condições do solo construído. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de plantas de cobertura, sobre o estoque de carbono orgânico total (COT), carbono nas frações da MOS e sobre a qualidade da matéria orgânica de um solo construído após a mineração de carvão. Avaliou-se dois experimentos em um solo construído, em Candiota/RS, um com seis anos (E6), e outro com dois anos (E2). Os tratamentos constituíram-se de coberturas vegetais: Hemártria (T1), Pensacola (T2), Grama Tifton (T3) e Braquiária Brizantha (T4), no E6 e T1 – Vaqueiro, T2 – Braquiária Brizantha, T3 – Tanzânia, T4 – Braquiária Humidícola, T5 – Hemártria e T6 – Tifton, no E2. Amostrou-se o solo na camada de 0,00 a 0,03m nas áreas experimentais e em área adjacente, o solo construído descoberto (T8) e um solo natural (Argissolo Vermelho) com vegetação nativa (T9), para comparação. No E6 realizaram-se os fracionamentos químico e físico (granulométrico e densimétrico) da MOS, determinando-se os estoques de nitrogênio total (NT), de COT e carbono nas frações, análise de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) do ácido húmico (AH) e fluorescência induzida a laser (FIL) do solo inteiro. Calculou-se o percentual de AHs (HI), razão AH/ácido fúlvico (HR), o índice de manejo de carbono (IMC) e o grau de humificação da MOS (HFIL). No E2, realizaram-se as mesmas determinações, com exceção do fracionamento químico. No E6 o maior estoque de AH foi observado no T4, que não diferiu do T1. O mesmo ocorreu para as frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO). O HR variou de 0,27 a 1,0 e os tratamentos com maior HI foram o T1 e o T4, indicando uma MOS mais humificada. Os espectros de FTIR dos AHs de T1, T2 e T4 assemelharam-se ao do T9, enquanto que, o do T3 assemelhou-se ao do T8. A qualidade do solo construído foi melhorada principalmente por T1 e T4 (maiores IMCs). As plantas elevaram os estoques de COT, NT, de carbono nas frações da MOS e o IMC em comparação ao T8, entretanto, estes valores foram inferiores aos do T9. No E2, os estoques de COT não diferiram entre os tratamentos e o maior estoque de NT foi observado no T3, que não diferiu de T2. Os maiores estoques de carbono na fração grosseira (CFG), na FLL e IMCs foram observados em T2 e T3. As plantas elevaram os estoques de COT, NT, carbono nas frações da MOS e o IMC em relação ao T8. Em ambos os experimentos, o HFIL dos tratamentos foi maior que o do T9 e menor do que o T8 e independente da espécie vegetal houve recuperação parcial da qualidade do solo, sendo as espécies mais recomendadas para recuperação do solo construído a Hemártria e a Braquiária Brizantha no E6 e a Tanzânia e a Braquiária Brizantha no E2.

Palavras-chave: estoques, substâncias húmicas, fracionamento físico, matéria orgânica do solo, coberturas vegetais.

## ABSTRACT

LEAL, Otávio dos Anjos. **Frações e qualidade da matéria orgânica de um solo construído vegetado com gramíneas após a mineração de carvão.** 2011. 113f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

After the coal mining is necessary the topographic reconstruction of the area, originating constructed soils, which typically has low soil organic matter stocks (SOM). The cover crops can help to restore these stocks, improving constructed soil conditions. The aim of this study was to evaluate the effect of cover crops on the total organic carbon stocks (TOC), carbon in organic matter fractions and the organic matter quality of a soil constructed after the coal mining. Two experiments were evaluated in a constructed soil in Candiota/RS, one with six years (E6), and another with two years (E2). The treatments were cover crops: Limpograss (T1), Pensacola (T2), Tifton Grass (T3) and Brachiaria Brizantha (T4), in E6 and T1 - Vaqueiro, T2 - Brachiaria Brizantha, T3 - Tanzania, T4 - Brachiaria Humidicola T5 - Limpograss, T6 - Tifton Grass, in E2. In these treatments, were collected samples in the layer from 0.00 to 0.03 m of soil. For comparison, were collected in adjacent areas, samples from a constructed soil without vegetation (T8) and samples from a natural soil (Ultisol) with native vegetation (T9). In E6 were made the chemical and physical (grain size and densimetric) fractionations of SOM, determining the total nitrogen stocks (TN), TOC and carbon fractions, analysis of Fourier transform infrared (FTIR) of humic acid (HA) and laser induced fluorescence (LIF) of whole soil. It were calculated HA percentage (HI), ratio AH/fulvic acid (HR), the carbon management index (CMI) and the humification degree of SOM (HLIF). In E2, were made the same analysis, except for chemical fractionation. In E6 the higher HA stock was observed in T4, which did not differ from T1. The same occurred in the free light fraction (FLF) and in the occluded light fraction (OLF). The HR ranged from 0.27 to 1.0 and treatments with higher HI were T1 and T4, indicating a more humified SOM. According to FTIR analysis, the HA of T1, T2 and T4 resembled the T9, while the T3 resembled the T8. The constructed soil quality was improved mainly by T1 and T4, which had the highest CMIs. Compared to T8, the plants increased the TOC, TN, carbon in organic matter fractions and CMI, however, these values were lower than those at T9. In E2, the TOC stocks did not differ between treatments, and the higher NT stock was observed in T3, not differing from T2. The T2 and T3 presented the highest carbon stocks in the free light and coarse fractions and the highest CMIs. The plants increased the TOC, NT, carbon in organic matter fractions and the CMI in comparison to T8. In both experiments, the HLIF from the treatments was highest than the T9 and smallest than T8 and independent of plant specie there was partial restore of soil quality. The species most recommended to restore the degraded areas were Limpograss and Brachiaria Brizantha in E6 and Tanzania and Brachiaria Brizantha in E2.

Keywords: stocks, humic substances, physical fractionation, soil organic matter, cover crops.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1. Mineração de carvão no Brasil e no Rio Grande do Sul.....	9
2.2. Caracterização da área de mineração de Candiota/RS.....	11
2.3. Legislação pertinente à mineração no Brasil.....	14
2.4. Recuperação de áreas degradadas por mineração.....	16
2.5. Recuperação da matéria orgânica de solos minerados.....	18
2.6. Fracionamento da matéria orgânica do solo.....	25
2.6.1. Fracionamento químico.....	26
2.6.2. Fracionamento físico.....	27
2.7. Efeito do manejo sobre as frações da matéria orgânica do solo.....	29
2.8. Caracterização espectroscópica da matéria orgânica do solo.....	30
3. ESTUDO 1. Influência de coberturas vegetais sobre as substâncias húmicas de um solo construído após a mineração de carvão.	33
Introdução.....	33
Material e Métodos.....	34
Resultados e Discussão.....	38
Conclusões.....	46
4. ESTUDO 2: Frações físicas e grau de humificação da matéria orgânica de um solo construído e vegetado há seis anos após a mineração de carvão.	47
Introdução.....	47
Material e Métodos.....	49
Resultados e Discussão.....	52
Conclusões.....	63
5. ESTUDO 3: Fracionamento físico e qualidade da matéria orgânica de um solo construído e vegetado após mineração de carvão.	64
Introdução.....	64
Material e Métodos.....	66
Resultados e Discussão.....	69
Conclusões.....	82
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
7. ESTUDOS FUTUROS.....	84
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
9. APÊNDICES.....	98

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O carvão mineral é uma complexa e variada mistura de componentes orgânicos sólidos, fossilizados a milhões de anos. Apesar dos impactos ambientais gerados pela sua extração, é mundialmente uma importante fonte energia. No Brasil, as principais reservas de carvão mineral encontram-se nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

No Rio Grande do Sul a principal reserva de carvão está no município de Candiota. Nesta cidade, encontra-se a Mina de Candiota, de propriedade da Companhia Riograndense de Mineração (CRM) e vinculada à secretaria das Minas e Energia do Rio Grande do Sul, a qual atinge reservas de  $1.406,63 \times 10^6$  toneladas, sendo que  $839,18 \times 10^6$  toneladas correspondem ao carvão que pode ser minerado a céu aberto.

Após a extração do carvão a céu aberto, a topografia da área explorada é recomposta, colocando-se os horizontes anteriormente retirados, sobre a superfície remanescente, dando origem aos solos denominados construídos. Estes solos sofrem degradações físicas, químicas e biológicas que tornam difícil a sua vegetação e, conseqüentemente, a recuperação da sua qualidade. Entretanto, a legislação ambiental exige que as empresas mineradoras executem a recuperação das áreas, possibilitando que os solos construídos apresentem condições para o desenvolvimento vegetal.

A vegetação da área construída é fundamental para proteger o solo dos processos erosivos e, principalmente para incorporar material orgânico, já que em áreas degradadas, os níveis de matéria orgânica são baixos. Em áreas de mineração, a degradação do solo está comumente associada à mistura das suas camadas mais superficiais e férteis com as camadas mais profundas, fazendo com que o solo apresente baixa fertilidade. Considerando que a matéria orgânica afeta as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, o conhecimento da sua distribuição em frações químicas e físicas em áreas construídas após a mineração de carvão e vegetadas com diferentes espécies é essencial para propor estratégias de mitigação dos impactos negativos gerados nestas áreas e para potencializar o uso destes solos.

As frações da matéria orgânica têm sido utilizadas como indicadores da qualidade do solo, sendo que a escolha do método de fracionamento dependerá da natureza do estudo. O fracionamento químico da matéria orgânica do solo (MOS), com base na solubilidade em meio ácido e alcalino, geralmente é empregado em estudos que objetivam quantificar e caracterizar química e estruturalmente os componentes

húmicos (humina, ácido húmico e ácido fúlvico), além de avaliar o grau de humificação e reatividade dos compartimentos químicos.

O fracionamento físico da MOS é considerado menos destrutivo no que se refere à estrutura e composição da MOS, e os resultados obtidos com este fracionamento são relacionados mais diretamente com a estrutura e função da MOS *in situ*, quando comparados aos do fracionamento químico.

Estudos relacionados à matéria orgânica de solos construídos após a mineração de carvão são recentes e há carência de dados, principalmente no que se refere ao fracionamento da matéria orgânica.

Com base no exposto, e considerando que a área de mineração de carvão tende a se expandir no Rio Grande do Sul, estudos que possibilitem uma melhor compreensão do comportamento da matéria orgânica em solos construídos e conseqüentemente, um melhor planejamento para a recuperação do solo degradado, tornam-se fundamentais.

Portanto, acredita-se que as frações e a qualidade da matéria orgânica do solo construído após a mineração de carvão podem ser influenciadas pela implantação de diferentes coberturas vegetais. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo geral avaliar o efeito de diferentes espécies vegetais (plantas de cobertura), sobre o estoque e qualidade da matéria orgânica, buscando um melhor entendimento do comportamento das frações químicas e físicas da MOS de um solo construído após a mineração de carvão em Candiota/RS. O trabalho foi estruturado em três estudos que objetivaram:

- 1) Avaliar os estoques e a distribuição das frações húmicas da matéria orgânica e as características espectroscópicas do ácido húmico de um solo construído após a mineração de carvão vegetado desde 2003.
- 2) Quantificar os estoques de carbono orgânico total, de carbono nas frações físicas da MOS e avaliar a qualidade da matéria orgânica de um solo construído após a mineração de carvão vegetado desde 2003.
- 3) Quantificar os estoques de carbono orgânico total, de carbono nas frações físicas da MOS, e avaliar a qualidade da matéria orgânica de um solo construído após a mineração de carvão vegetado desde 2007.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Mineração de carvão no Brasil e no Rio Grande do Sul

No Brasil, a história do carvão se inicia no Permiano (250 – 300 milhões de anos). Naquela época geológica, árvores gigantes e a vegetação cresciam formando grandes e espessas florestas, favorecidas pela atmosfera rica em gás carbônico (CO<sub>2</sub>), permitindo a intensificação da função clorofiliana e o crescimento dos vegetais em um clima particularmente quente e úmido (ABCM, 2010).

O carvão é a parte celulósica da vegetação, transformada pelo tempo, pressão, bactérias e agentes anaeróbicos, em uma massa carbonosa. Sucessivas formações de florestas e afundamentos podem ter ocorrido ao longo de milhares de anos em uma mesma região, e então, diferentes camadas de carvão serão encontradas (ABCM, 2010).

As reservas de carvão mineral no Brasil concentram-se no Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina, com 28,8 e 3,36 bilhões de toneladas, respectivamente (89,0 e 10,5% do estoque do País), para um total das reservas brasileiras de 32,6 bilhões. Estes estoques correspondem a 50% dos recursos energéticos não renováveis do País, enquanto que o petróleo e o gás natural correspondem, respectivamente, a 10% e 3% dos recursos energéticos brasileiros (MIOLA, 2010).

Em 1826, escravos de Fuão de Freitas descobriram carvão na região do Arroio dos Ratos, município de São Jerônimo, no Baixo Jacuí (ABCM, 2010).

O então presidente provincial Sr. Luiz Vieira Sinimbu, na busca de atrair indústrias para a Província, encarregou o inglês do País de Gales James Johnson, a realizar novas explorações. Em 1853, Johnson realizou sondagens e redescobriu carvão à margem esquerda do Arroio dos Ratos, e juntamente com alguns mineiros, abriu a mina através de poço escavado e passou a produzir carvão em 1855. Johnson buscou na Inglaterra recursos financeiros e criou a mineradora “Imperial Brazilian Collieries” e construiu uma estrada de ferro da mina dos Ratos até a vila de São Jerônimo (20 km), às margens do rio Jacuí. Em 1875 Johnson passou a empresa para William Tweede, mas em 1880 a “Brazilian Collieries” foi à falência e em 1882 foi substituída pela “Cia. Minas de Carvão do Arroio dos Ratos”. Em 1887 a empresa abriu novo poço denominado Poço Dona Isabel, em homenagem à princesa imperial, que acompanhou o imperador D. Pedro em visita às minas de carvão. Esta companhia operou até 1908 (ABCM, 2010).

O consumo de carvão nacional aumentou consideravelmente por ocasião da Primeira Guerra Mundial, especialmente pela viação férrea (também abastecida pelo carvão do baixo Jacuí e Candiota-Hulha Negra). No pós-guerra o carvão estrangeiro voltou a ocupar o mercado e as mineradoras gaúchas buscaram um novo mercado para o seu carvão, adquirindo o controle de duas empresas em Porto Alegre, resultando na construção da primeira usina térmica a carvão – Usina do Gasômetro. Em 1958 exauriu-se a mina dos Ratos após 105 anos de produção, desde sua descoberta, em 1826, e instalação da mina pelos ingleses em 1853 (ABCM, 2010).

A mineração de carvão em Candiota-Hulha Negra data de 1863 e atendia às fábricas e charqueadas da região. O carvão era garimpado em minas de encostas e às margens dos cursos d'água. Até 1920 o carvão do Sul do Estado abasteceu a viação férrea. A partir de 1942 os estudos de Augusto Batista Pereira e do engenheiro José do Patrocínio Motta levaram à construção da Usina Candiota I (20 MW) em 1960, fator marcante para o desenvolvimento da indústria do carvão na região Sul, bem como para o progresso municipal de regiões isoladas (ABCM, 2010).

No ano de 1974 foi desativada a Usina Candiota I, entrando em operação a Fase A da nova usina. Em 1986 entrou em operação a segunda etapa dessa nova usina, denominada Fase B com uma previsão estimada de produção de 160 MW de energia. Finalmente, em 1989 entrou em operação a última máquina da Usina Candiota II, completando os 446 MW de energia previstos inicialmente. Atualmente a Usina Candiota II é denominada Usina Termelétrica Presidente Médici (UPME) (CGTEE, 2009).

A Companhia Riograndense de Mineração (CRM) vem trabalhando na região de Candiota desde 1961, objetivando em especial a produção de carvão termelétrico. Em 2004, a empresa iniciou as tratativas para o projeto de ampliação da capacidade atualmente instalada (446 MW) para 796 MW, sendo os 350 MW correspondentes à instalação da Fase C da UPME, a qual funcionará a partir de 2011 (CRM, 2010). A construção da Fase C, no município de Candiota é o principal projeto de expansão da Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE), estando incluído no Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), do Governo Federal. Além disto, a Fase C é um dos projetos integrantes do Acordo Internacional firmado entre a República Popular da China e a República Federativa do Brasil, cujo objeto é o fortalecimento da Cooperação na Área de Implementação de Infra-Estrutura de Construção (CGTEE, 2010).

## **2.2 Caracterização da área de mineração de Candiota/RS**

No município de Candiota, a 400 km da capital, Porto Alegre, está inserida a maior jazida de carvão mineral do país, com reservas de um bilhão de toneladas passíveis de serem mineradas a céu aberto, em profundidades de até 50m (CRM, 2010). Segundo Li (2006), este tipo de mineração possui um potencial de degradação de 2 a 11 vezes maior do que a mineração em subsuperfície, em termos de área.

Em Candiota, a exploração do carvão é realizada pela CRM. A CRM é uma sociedade de economia mista estadual, criada pela Lei nº. 5.835/69, inscrita no CNPJ sob o nº 92.724.145/0001-53, registrada no Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) - Processo nº. 802.767/70, localizada em Porto Alegre, com Unidades Mineiras em operação nos Municípios de Minas do Leão e Candiota, tendo como objeto, basicamente, a pesquisa, a lavra, o beneficiamento e a comercialização de carvão mineral e outros bens minerais (CRM, 2009).

No ano de 2009, a CRM operou com a produção da Mina de Candiota limitada ao mínimo contratual para abastecimento da UPME, na Mina de Candiota. Isto limitou sua produção mensal a 133.333 t/mês, atingindo o total anual de 1.600.000 t de carvão (CRM, 2009). Atualmente, o carvão extraído na mina é usado como combustível, sendo britado e transportado por correias até a UPME, a qual possui uma geração nominal de 126 MW na Fase A e 320 MW na Fase B com uma demanda de carvão na faixa de 1,7 milhões de toneladas por ano, atualmente operadas pela CGTEE, empresa pública federal. Com a criação da Fase C, a qual entra em operação em 2011, a demanda anual de carvão girará em torno de cinco milhões de toneladas.

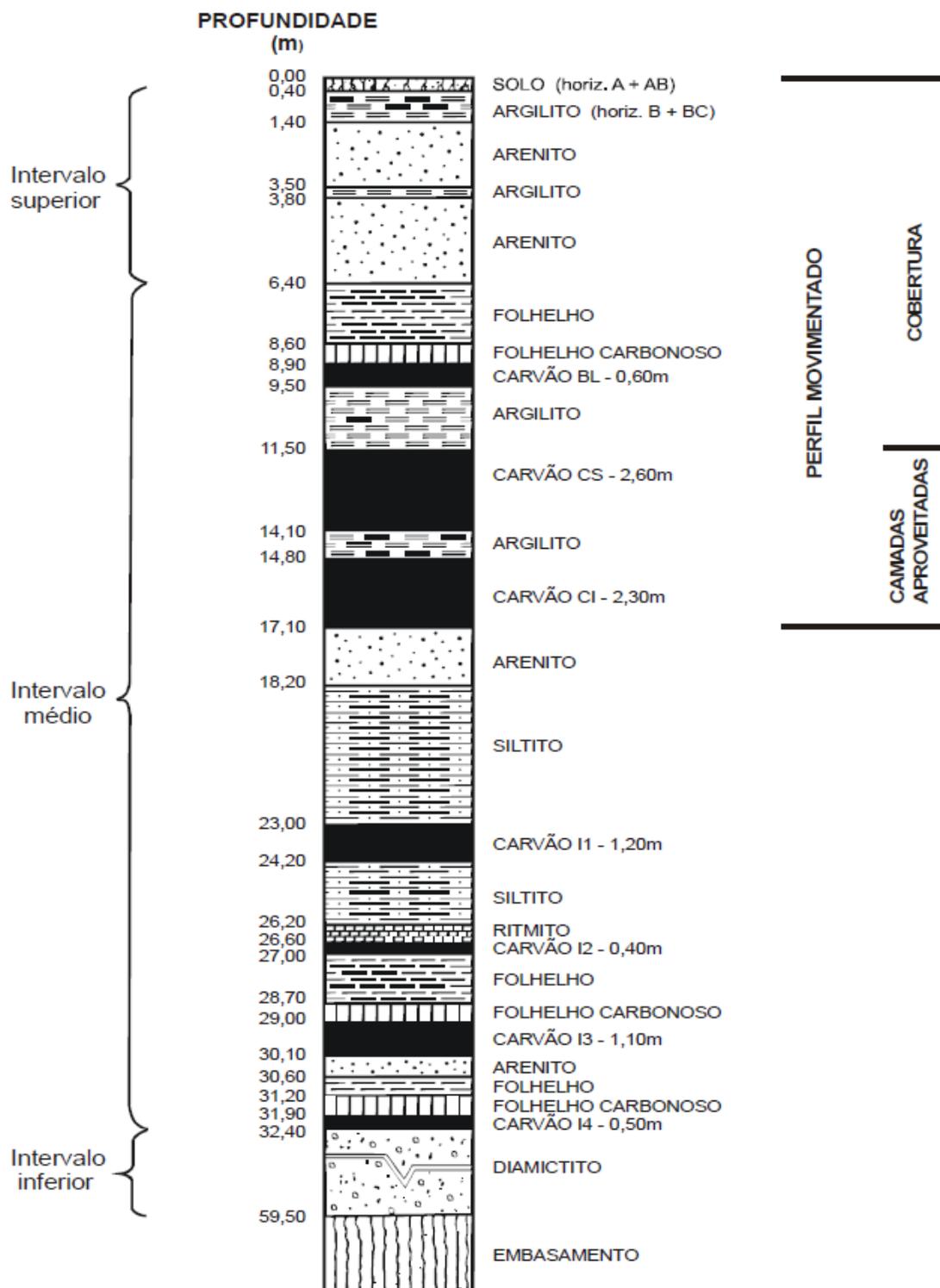
A jazida de Candiota, situada na borda Sul da Bacia do Paraná, é constituída pelas camadas de carvão, situadas na Formação Rio Bonito (270 milhões de anos), Grupo 21 Guatá, supergrupo Tubarão, do Permiano inferior da Bacia do Paraná (ADE, 1993). Na bacia carbonífera de Candiota afloram rochas do embasamento précambriano (Grupo Porongos) e unidades Eopaleozóicas (Grupo Bom Jardim e Camaquã), sendo que a sedimentação Gonduânica está assentada sobre estas litologias (ADE, 1993). A associação dinâmica entre as três calhas morfológicas: Candiota, Torrinhas e Jaguarão Chico, nas quais se depositaram os sedimentos gonduânicos, separa estratigraficamente a Bacia Carbonífera de Candiota em blocos altos e baixos (ADE, 1993).

A CRM possui, na jazida de Candiota, 15 áreas concedidas para pesquisa e lavra, as quais são denominadas de “malhas”, sendo que as malhas I e II já foram mineradas e atualmente as malhas IV e VII estão sendo exploradas. Nestas malhas

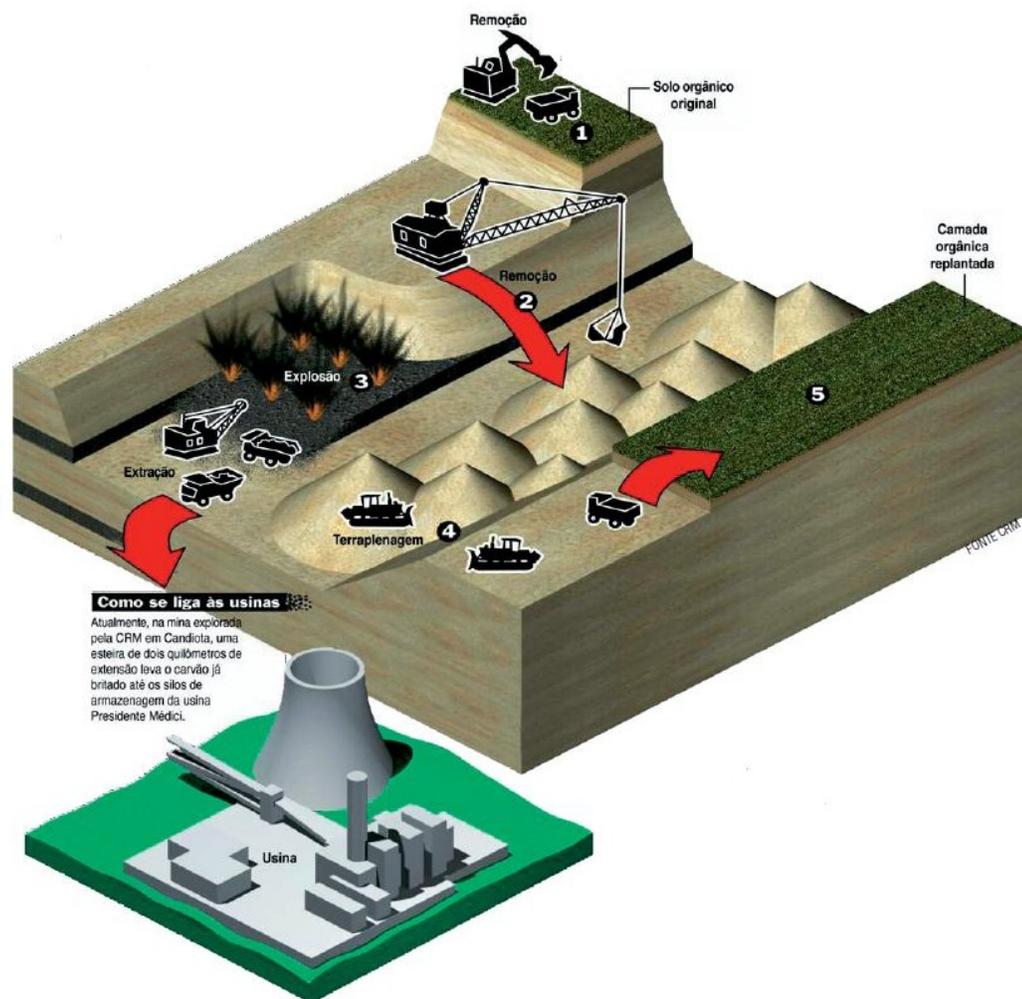
ocorrem até sete camadas de carvão de espessuras variáveis entre 0,10 m e 3,20 m, denominadas da base para o topo como Inferior 4, Inferior 3, inferior 2, Inferior 1, Camada Candiota Inferior (CI), Camada Candiota Superior (CS) e Camada Banco Louco (BL), respectivamente (Figura 1). A camada BL, por uma questão de economia, não é retirada, permanecendo incorporada ao solo construído, sendo esta a que propicia, através de uma série de reações, o caráter ácido dos solos construídos (PINTO, 1999).

Nestas áreas são mineradas a CI e a CS de características constantes em termos de espessura e qualidade. As camadas de carvão, os folhelhos carbonosos, folhelhos, arenitos e conglomerados que ocorrem nessa região pertencem à Formação Rio Bonito, a qual é localmente dividida em três intervalos faciológicos: fácies inferior, fácies intermediária e fácies superior. A CI e a CS estão alojadas na fácies intermediária, juntamente com siltitos e arenitos. Esses dois leitos totalizam uma espessura média de cinco metros intercalados por uma camada de argilito com espessura média de 0,7m (Figura 1) (KOPPE & COSTA, 2002).

A recomposição das áreas é feita paralelamente à extração do minério. No processo de extração é utilizada uma escavadeira chamada “*walking-drag-line*”, a qual faz a descobertura do carvão, onde são realizados cortes sucessivos em sistema “vaivém” na seguinte seqüência: 1) remoção do solo superficial (horizonte A) e da argila (horizontes B e C) com posterior perfuração e detonação do arenito; 2) remoção do arenito utilizando a “*walking-drag-line*”; 3) perfuração, detonação e extração do carvão da CS e da CI, com separação do argilito intermediário; 4) recomposição topográfica, constituída pelos materiais de cobertura, com ou sem o aproveitamento de vazios para deposição de cinzas; 5) deposição da “terra vegetal” sobre a área recomposta topograficamente e estabelecimento de práticas agronômicas de preparo, conservação e correção do solo com posterior plantio de espécies vegetais para cobertura do solo construído (PINTO, 1999). O processo de exploração, recomposição topográfica e transporte do carvão até a UPME, encontram-se ilustrado na Figura 2.



**Figura 1.** Perfil geológico da formação Rio Bonito na jazida de Candiotá - zona norte da malha IV. Adaptado de Pinto (1999).



**Figura 2.** Processo de mineração e recomposição topográfica da mina de Candiota/RS e transporte do carvão até a Usina Termelétrica Presidente Médici. Adaptado de Santucci (2009).

### 2.3 Legislação pertinente à mineração no Brasil

Segundo o artigo 225 da Constituição Federal de 1988 “todos têm o direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”.

Como forma de compensar e mitigar os danos causados ao meio ambiente pela mineração, a Constituição Federal, capítulo 6, artigo 225 e § 2º, prevê que aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado de acordo com a solução técnica exigida pelo órgão público competente, na força da lei.

A recuperação de áreas degradadas, em qualquer estado de degradação, encontra suporte também em normas infraconstitucionais e, há duas décadas, o tema constitui um dos pilares da Política Nacional do Meio Ambiente.

A Lei número 6.938, de 31/08/1981, a qual dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, determina em seu artigo 2º que a Política Nacional do Meio Ambiente tem por objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no País, condições ao desenvolvimento sócio econômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana, atendidos os seguintes princípios:

Da recuperação de áreas degradadas – Inciso VIII

O artigo 2º, inciso VIII da Política Nacional do Meio Ambiente, foi regulamentado na década de 1980 pelo decreto n. 97.632/89. Nele é previsto que “os empreendimentos que se destinam à exploração de recursos minerais deverão, quando da apresentação do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), submeter à aprovação do órgão ambiental competente o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) (artigo 1º). Este mesmo decreto, diz no seu artigo 2º, que “para efeito deste Decreto são consideradas como degradação os processos resultantes dos danos ao meio ambiente, pelos quais se perdem ou se reduzem algumas de suas propriedades, tais como a qualidade ou a capacidade produtiva dos recursos ambientais”. O artigo 3º determina que “a recuperação deverá ter por objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização, de acordo com um plano preestabelecido para uso do solo, visando à obtenção de uma estabilidade do meio ambiente”.

Segundo Corrêa (2009), em 1974, a Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos aproximou a conceituação teórica, dos fatos realmente práticos, definindo três termos que expressam processos, dificuldades e objetivos a serem atingidos ao se recuperar uma área degradada:

Restauração: reposição das exatas condições ecológicas da área degradada ou ao *status quo ante* (definido no Decreto n. 12.379). A restauração de um ecossistema é extremamente difícil e onerosa, só justificável para ambientes raros. A restauração é improvável quando o ambiente foi severamente degradado, como em áreas de mineração.

Reabilitação: retorno da função produtiva da terra, não do ecossistema, por meio da revegetação. Retorno de uma área a um estado biológico apropriado. Segundo Primack e Rodrigues (2002), é a recuperação de pelo menos algumas das funções do ecossistema e de algumas espécies originais.

Recuperação: estabilização de uma área degradada sem o compromisso ecológico. A recuperação é um processo genérico que abrange todos os aspectos de qualquer projeto, visando à obtenção de uma nova utilização para um sítio degradado e principalmente a estabilidade do meio ambiente.

De acordo com Li (2006), o termo recuperação, no contexto de áreas mineradas, refere-se aos processos realizados para que a área degradada volte a apresentar algum tipo de uso, trazendo benefícios.

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) define o termo recuperação como sendo o retorno de áreas degradadas a uma forma de utilização tecnicamente compatível, em conformidade com os valores ambientais, culturais e sociais locais (IBAMA 1990). Sendo assim, este termo encontra embasamento conceitual e técnico para que se adotem medidas na recuperação de áreas degradadas, pois estas áreas são ambientes criados pelo homem e a ecologia que rege seus processos, inclusive os de recuperação, ainda é pouco conhecida (CORRÊA, 2009).

O direito à exploração mineral é concedido pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). A política ambiental brasileira não permite que o passivo ambiental gerado seja transferido para a sociedade e para os cofres públicos e a legislação ambiental brasileira estabelece como estratégico o desenvolvimento de técnicas que incrementem e facilitem a recuperação de terras degradadas, para um posterior uso conservacionista, econômico ou social (CORRÊA, 2009).

O Código Florestal Brasileiro (Lei n. 4.771, de 15/09/65, artigo 2º, alterado pela Lei n. 7.803, de 18/07/89) utiliza a vegetação para garantir a proteção das águas e também dos terrenos susceptíveis à erosão e ao desmoronamento e de acordo com esta lei, fica proibida a exploração de recursos naturais e, portanto, proibida a exploração mineral em Áreas de Preservação Permanente (APP). A Lei n. 9.985, de 08/07/2000, proíbe a degradação do meio ambiente em Unidades de Conservação de Proteção Integral, e por consequência, fica proibida a exploração mineral em: refúgios de vida silvestre, estações ecológicas, monumentos naturais, reservas ecológicas, parques nacionais e similares nos Estados, Municípios e no Distrito Federal (CORRÊA, 2009).

#### **2.4 Recuperação de áreas degradadas por mineração**

Durante o processo de mineração e ao longo do processo de recuperação da área degradada, o carbono orgânico é perdido de várias formas. Inicialmente o carbono

é perdido de forma semelhante em solos de áreas mineradas e em solos de cultivo agrícola, devido à desintegração dos agregados do solo que expõem a matéria orgânica à decomposição (ADU & OADES, 1978; USSIRI & LAL, 2008). Os processos de erosão pela água e pelo vento, juntamente com os processos de mineração, são causas do declínio na quantidade de matéria orgânica do solo (LAL et al., 1998; SCHWENK et al., 2000). Mummey et al. (2002) observou a perda de carbono orgânico, de forma similar ao que ocorre na agricultura, durante o processo de construção de um solo após a mineração de urânio em Wyoming, EUA.

Solos construídos após mineração de carvão são geralmente caracterizados por mistura de horizontes (A, B, C), elevada densidade do solo, baixo pH, baixa disponibilidade de nutrientes, estrutura inadequada, baixa capacidade de retenção de água, baixo teor de MOS e baixa produção de biomassa vegetal (SHUKLA et al. 2004; SEVER & MAKINECI, 2008).

O processo de recuperação de áreas mineradas consiste basicamente no preenchimento das cavas de mineração mediante a utilização das litologias sobrejacentes às camadas de carvão, a fim de recompor topograficamente a paisagem e proporcionar ao solo condições para a recuperação da sua capacidade produtiva. A recomposição topográfica da paisagem é feita através da distribuição dos materiais estéreis extraídos no início da lavra. Entretanto, esses materiais são uma mistura heterogênea com litologias e grau de intemperização variados.

Para facilitar o processo de recuperação do solo construído, é ideal que os materiais utilizados na recuperação sejam dispostos na sequência original (KÄMPF et al., 2000), deixando o solo natural, constituído pelo horizonte A, espalhado superficialmente sobre a área reconstituída topograficamente (QUIÑONES, 2004). Entretanto, o que normalmente acontece é que os solos construídos apresentam, superficialmente, uma mistura de horizontes, A, B e C, o que dificulta ainda mais a sua recuperação devido a degradação dos atributos químicos, físicos e biológicos (LEAL, 2010). Estes solos apresentam ainda camadas subsuperficiais compostas pelos materiais estéreis de mineração removidos durante o processo de lavra (QUIÑONES, 2004).

Como pôde ser visto a recuperação de áreas degradadas por mineração de carvão é um processo lento e trabalhoso devido ao elevado grau de alteração e degradação do solo. Para que a recuperação seja bem sucedida, faz-se necessária a vegetação da área construída, com a intenção de proteger o solo dos processos erosivos e incorporar material orgânico ao solo, já que em áreas degradadas os níveis

de matéria orgânica são baixos e isso representa uma perda das funções vitais do solo, comprometendo sua qualidade e capacidade de produzir biomassa (SIQUEIRA et al., 2008).

Devido à influência que a MOS tem sobre os atributos químicos, físicos e biológicos, a prática de incorporação de matéria orgânica ao solo tem sido a solução para se construir um ambiente edáfico, pois ela eleva a fertilidade e cria condições favoráveis às plantas e aos organismos. Pouca matéria orgânica resulta frequentemente em grande número de plantas mortas quando da recuperação de áreas degradadas. Ao se elevar os teores de matéria orgânica dos substratos minerados a níveis adequados, há uma melhoria dos atributos do solo, que tornarão a área degradada mais propensa à vegetação (CORRÊA, 2009).

Mendes (2004) avaliando o potencial de recuperação do solo de uma área degradada, através da vegetação e do manejo microbiano, constatou que na vegetação do rejeito de mineração é fundamental a adição de matéria orgânica, como fonte de N, P e outros nutrientes essenciais ao estabelecimento de uma microbiota e de espécies vegetais.

### **2.5 Recuperação da matéria orgânica de solos minerados**

Devido à importância que a MOS tem para o funcionamento do ecossistema e para o sucesso da recuperação da área degradada, o entendimento da sua dinâmica é essencial em solos construídos (ANDERSON et al. 2008), sendo um dos principais indicadores da qualidade do solo. Rajan et al. (2010), buscando o melhor indicador da qualidade de solos degradados, avaliaram 12 indicadores da qualidade do solo, dentre eles: argila, densidade do solo, água disponível, micro-agregados do solo, nitrogênio e fósforo disponíveis, carbono orgânico e carbono da biomassa microbiana. Estes autores concluíram que o melhor indicador para solos degradados foi o carbono orgânico. De acordo com Shrestha & Lal (2006), a MOS é o indicador chave para solos construídos em recuperação.

O conceito de qualidade do solo começou a ser formulado no início da década de 90 (CONCEIÇÃO et al., 2005). Segundo a *Soil Science Society of America*, o termo “qualidade do solo” foi definido como: “a capacidade de um tipo particular de solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou gerenciado de forma a sustentar a produtividade vegetal e animal, manter ou aumentar a qualidade de água e sustentar a saúde e habitação humanas”. De acordo com o *National Research Council*,

a qualidade do solo é “a sua capacidade de promover o crescimento das plantas, proteger as bacias hidrográficas e prevenir a poluição da água e do ar” (ODUM, 2007).

Conforme postulado pelo USDA-NRCS (2008), a maneira mais prática para aumentar qualidade do solo é promover o aumento nos estoques de MOS.

Doran e Zeiss (2000), afirmam que para ser de utilidade prática, um indicador de qualidade do solo deve atender aos seguintes critérios: a) ser sensível às variações de manejo e de clima, para possibilitar intervenções, visando melhorar a qualidade do solo, quando este for o caso; b) ser bem correlacionado com funções do solo; c) ser de fácil mensuração e baixo custo; d) ser útil para elucidar processos do ecossistema, e e) ser útil e de fácil compreensão.

O monitoramento da qualidade do solo constitui uma importante etapa na definição e no ajuste de práticas conservacionistas de manejo que garantam a manutenção ou a melhoria da qualidade do solo (LIMA et al., 2009).

No sistema solo-planta, os processos que regulam as transformações, fluxos e dinâmica dos elementos químicos são interdependentes e regulados pelo estoque e frações de carbono e das transformações desses compartimentos de matéria orgânica (STEVENSON, 1986). Nos últimos anos, a busca por um bom indicador da qualidade do solo tem aumentado. Entretanto, sabe-se que nenhum indicador é capaz de caracterizar completamente o “status funcional” de um solo em situações variadas. De todos os atributos do solo, a matéria orgânica se relaciona positivamente com as características funcionais determinantes da qualidade do solo e, assim com a produtividade, sustentabilidade e integridade ambiental dos ecossistemas terrestres (SMITH et al., 2000).

De acordo com Islam e Weil (2000), os indicadores da qualidade do solo podem ser distinguidos em três grupos: os efêmeros, cujas alterações ocorrem em curto espaço de tempo ou são modificados pelas práticas de cultivo, tais como: umidade do solo, densidade, pH e disponibilidade de nutrientes; os permanentes: que são inerentes ao solo, tais como: profundidade, camadas restritivas, textura, mineralogia; e entre esses dois extremos, estão os indicadores intermediários, que demonstram uma crítica influência da capacidade do solo em desempenhar suas funções, tais como: agregação, biomassa microbiana, quociente respiratório e carbono orgânico. Para estes mesmos autores, os indicadores intermediários são os de maior importância para integrarem um índice de qualidade do solo.

Perdas de carbono resultam em baixos teores de matéria orgânica, gerando diminuição da qualidade do solo e afetando a sustentabilidade dos ecossistemas (SIQUEIRA et al., 2008).

Devido à grande influência que o teor de matéria orgânica exerce sobre os atributos do solo, a sua perda compromete as funções vitais do solo, levando à queda da produtividade e à degradação do solo. Sendo assim, práticas de manejo que resultem em aporte de carbono no solo podem reverter a tendência de degradação e promover a recuperação de áreas degradadas (SIQUEIRA et al., 2008).

A recuperação da qualidade de solos construídos é necessária para que os mesmos possam ter uma utilidade futura, como por exemplo: atividade agrícola, pecuária ou silvicultura. Entretanto, faz-se necessário o monitoramento dos indicadores da qualidade do solo, para que as melhores condições de manejo do solo degradado possam ser atingidas (SHUKLA et al., 2004).

Conceição et al. (2005) adotaram um modelo teórico sobre o desenvolvimento da qualidade do solo em sistemas de produção agrícola. Estes autores avaliaram dois experimentos de longa duração no Sul do Brasil, concluindo que houve um aumento na qualidade do solo com a redução do preparo e incremento nas adições de resíduos ao solo. Neste mesmo experimento foram avaliados o carbono e o nitrogênio total do solo, frações da MOS, o potencial de mineralização do carbono e do nitrogênio do solo e a biomassa microbiana como indicadores da qualidade do solo. Dentre estes indicadores, o mais sensível quanto às práticas de manejo e, portanto, o melhor indicador da qualidade do solo foi a fração particulada da MOS.

Existem basicamente dois tipos de fracionamento da MOS (químico e físico), originando diferentes frações. Estas frações podem ser utilizadas como indicadores da qualidade do solo, podendo ser mais sensíveis do que a própria MOS como um todo. Estudos têm demonstrado que frações de MOS são mais afetadas por manejos mais intensivos do solo que o carbono orgânico total, fazendo com que o uso destas frações seja recomendado como indicador da qualidade do solo (FREIXO et al., 2002a; LEITE et al., 2003).

Em atividades de mineração de carvão, onde ocorre a remoção da camada superficial do solo, o processo de sucessão vegetal torna-se difícil, uma vez que o banco de sementes é removido juntamente com a camada superficial do solo, que normalmente contém mais nutrientes e matéria orgânica (ÂNGELO et al. 2002).

Segundo Corrêa (2009), substratos minerados apresentam teores de MOS abaixo de 1% e elevar esse valor para 2%, no mínimo, é essencial para o sucesso de

uma vegetação. Ingram et al. (2005) avaliaram quatro áreas de solos, sendo três delas construídas após a mineração de carvão e uma delas após a mineração de urânio. Estes autores verificaram que o teor mínimo de matéria orgânica necessária para suprir as quantidades de nitrogênio exigidas pelos arbustos e espécies herbáceas avaliadas seria de 0,89%.

As formas de se adicionar matéria orgânica ao solo são bastante variadas, podendo ocorrer pela adição de material orgânico exógeno e serrapilheira, ou de forma indireta, através da revegetação ou vegetação da área.

Segundo Tordoff et al. (2000), a adição de materiais orgânicos ao solo desempenha três papéis principais: a) melhora a condição física e favorece o desenvolvimento de raízes, aumentando especialmente a capacidade de retenção de água e nutrientes; b) aumenta o fornecimento de nutrientes para as plantas e de energia e nutrientes para a microbiota, restabelecendo a atividade biológica e a ciclagem dos nutrientes essenciais à vegetação; c) em casos de solos contaminados, contribuem para amenizar a fitotoxidez dos contaminantes.

O estoque de MOS é resultado dos processos de adição e perda de material orgânico, sendo a biota representada principalmente por plantas e microorganismos, desempenhando papel fundamental nessa dinâmica. O principal processo de adição de material orgânico ao solo tem a planta como componente ativo (DICK et al., 2009).

Bendfelt et al. (2001), avaliaram os efeitos de materiais orgânicos na reabilitação de solo de mineração na Virgínia. Foram avaliados: serragem, lodo de esgoto, vegetação com *Pinus* sp. e *Festuca arundinaceae* e monitorou-se vários atributos do solo durante 16 anos. Houve efeito positivo da adição de material orgânico pela serragem e pelo lodo, assim como pela vegetação. Entretanto, estes autores concluíram que os efeitos da adição de serragem e lodo na qualidade do solo, não foram duradouros, melhorando o estoque de MOS apenas por curto período de tempo e o custo de transporte e aplicação, pode não justificar a melhoria na qualidade do solo. Já na adição de matéria orgânica ao solo através da vegetação, ficou evidente a vantagem deste processo, embora seja um pouco mais lento.

Em áreas não degradadas, o solo desenvolve-se por processos naturais de pedogênese a partir de seus materiais de origem. Entretanto, em solos construídos, estes processos têm de ser reiniciados, com os microorganismos e processos biológicos desempenhando papel fundamental. Sendo assim, a vegetação das áreas degradadas é necessária para impulsionar a biota heterotrófica do solo que se prolifera no ambiente (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006).

Diferentemente da textura e mineralogia do solo e do clima regional, fatores estes que interferem diretamente no estoque de carbono no solo, o uso e manejo da área degradada são controlados pelo homem, razão pela qual, dependendo de suas decisões, o estoque de MOS pode ser aumentado ou diminuído, promovendo uma condição de melhoria ou deterioração da qualidade do solo, respectivamente (DICK et al., 2009).

Além da incorporação de MOS através de material orgânico e da revegetação, outra possibilidade existente é a utilização de fungos micorrízicos e bactérias diazotróficas. A simbiose planta associada a bactérias diazotróficas e fungos micorrízicos, é um sistema funcional que adquire propriedades que não estavam presentes nos níveis hierárquicos inferiores, ou seja, essa associação representa a união de bactérias diazotróficas (fixadoras de  $N_2$ ), com espécies vegetais e fungos micorrízicos. Desta forma, as plantas noduladas e micorrizadas adquirem a capacidade de incorporar carbono e nitrogênio no solo, com maior capacidade de absorção de nutrientes, tornando-se mais tolerantes aos estresses ambientais (SOUZA e SILVA, 1996; FRANCO e FARIA, 1997; FRANCO et al., 2000; FRANCO e BALIEIRO, 2000; BALIEIRO et al., 2002).

Os impactos gerados pela mineração podem ocasionar perdas de até 99% no estoque original de MOS. Portanto, intervenções recuperadoras precisam ser capazes de elevar os teores de matéria orgânica destes solos degradados (SIQUEIRA et al. 2008). Na tabela 1, pode ser verificado o potencial degradador da atividade de mineração referente às perdas de MOS.

**Tabela 1.** Exemplos de teores e respectivas perdas de carbono orgânico (CO) em solos de áreas degradadas por diferentes tipos de mineração.

Tipo de mineração	Local	Área		Perda de CO de CO %	Referência
		Natural COS, dag kg <sup>-1</sup>	Degradada		
Carvão	Ohio, EUA	2,10	0,70	67	Akala & Lal, 2001
Bauxita	Poços de Caldas, BR	2,10	0,01	99	Carneiro et al. 2008
Bauxita	Porto Trombetas, BR	5,07	0,16	97	Costa et al. 1998
Serpentina	Holguín, Cuba	5,03	0,05	99	Izquierdo et al. 2005

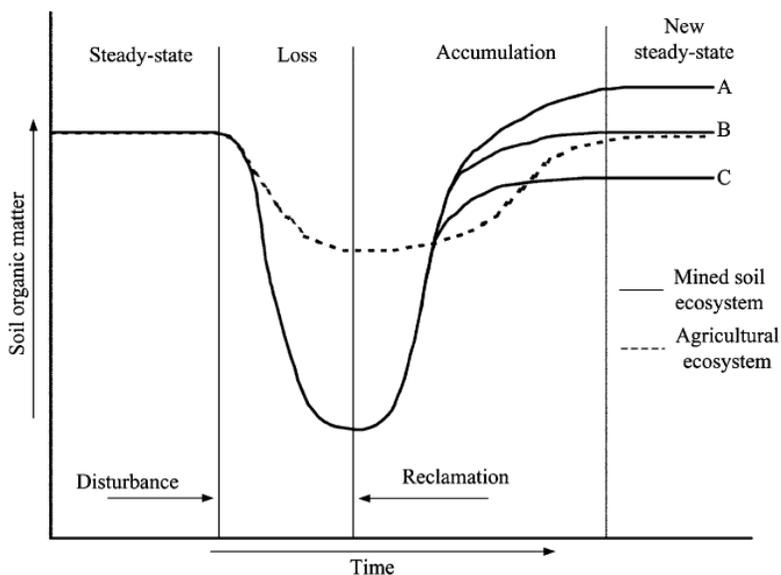
Adaptado de Siqueira et al. (2008).

Segundo Ussiri & Lal (2005) os solos construídos apresentam baixos teores de MOS, mas possuem potencial em seqüestrar carbono e incorporar na forma de matéria orgânica ao solo, principalmente nos primeiros anos após o início da recuperação da

área degradada, podendo ultrapassar os estoques de carbono orgânico do solo original (Figura 3). Entretanto, isto dependerá do manejo do solo e das espécies utilizadas para a vegetação.

Costa et al. (1998), trabalhando em sítios degradados por exploração de bauxita na Floresta Amazônica, em Oriximiná/PA, verificaram que mesmo após dez anos de vegetação, o carbono orgânico foi menor do que os valores encontrados na floresta nativa, evidenciando a dificuldade de retomar o conteúdo de carbono aos patamares iniciais, anteriores à degradação.

Quiñones et al. (2008), avaliando o teor de carbono orgânico da camada superficial de solos construídos após a mineração de carvão no Rio Grande do Sul, com diferentes idades (24 e 2 anos) de construção, encontraram em diferentes locais da área com 24 anos valores de 103 e 14g kg<sup>-1</sup> de carbono, cultivada com Eucalipto (camada de 0,00 a 0,04m) e coberta com capoeira (camada de 0,00 a 0,26m), respectivamente. No solo com 2 anos de construção, foram verificados teores de 3 e 15g kg<sup>-1</sup> em áreas cultivadas com gramíneas, nas partes inferior e superior de uma sequência em declive, respectivamente. Neste estudo, foi avaliado também um solo natural (Plintossolo), o qual apresentou 18g kg<sup>-1</sup> de carbono orgânico. Os autores justificaram a considerável variação nos teores de carbono pela heterogeneidade dos solos construídos, proveniente dos processos de mineração e construção dos solos.



**Figura 3.** Modelo conceitual da dinâmica da matéria orgânica em solos minerados, onde A, B, C simulam diferentes sistemas de manejo. Adaptado de Ussiri & Lal (2005).

Sever & Makineci (2008) avaliaram o conteúdo de carbono de um solo em recuperação após a mineração de carvão em Agacli, Turquia. A vegetação do solo construído foi realizada com Pinus (*Pinus pinaster*) e as amostras de solo foram coletadas após 17 anos de cultivo. Os autores avaliaram diversas camadas de solo: 0-1, 1-3, 3-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 e 40-50cm, sendo que o maior conteúdo de carbono foi encontrado na camada de 0-1cm (22,57g dm<sup>-3</sup>). Já as demais camadas não se diferenciaram entre si, com valores de carbono orgânico variando de 13,27 (1-3cm) a 9,16g dm<sup>-3</sup> (30-40cm). Neste experimento, também foi avaliado o conteúdo de nitrogênio total nas mesmas camadas, o qual apresentou comportamento semelhante ao carbono, sendo o maior valor (1,29g dm<sup>-3</sup>) encontrado na camada superficial (0-1cm). Entretanto, nas camadas subsuperficiais os valores diferenciaram-se entre si, ocorrendo um decréscimo de nitrogênio conforme o aumento de profundidade.

Anderson et al. (2008) avaliaram o teor de carbono orgânico de duas áreas em recuperação após a mineração de carvão em Wyoming, EUA. Nas duas áreas foi comparado o teor de carbono de um solo natural (vegetado principalmente por espécies arbustivas e algumas herbáceas) com o teor de carbono de um solo construído cultivado com gramíneas e outro cultivado com espécies arbustivas, ambos com 11 anos de cultivo. Na primeira área, o teor de carbono da camada de 0,00 a 0,05m do solo natural (17,9g kg<sup>-1</sup>) foi superior aos dos solos construídos cultivados com gramíneas (5,4g kg<sup>-1</sup>) e com arbustos (4,4g kg<sup>-1</sup>), assim como nas demais camadas avaliadas (5-15, 15-30cm). Na segunda área, o teor de carbono do solo natural (23,3g kg<sup>-1</sup>) foi superior ao do solo cultivado com gramíneas (16,1g kg<sup>-1</sup>) e igual ao do solo cultivado com arbustos (17,3g kg<sup>-1</sup>), na camada de 0,00 a 0,05m. Nesta mesma área, o teor de carbono foi igual para os três solos na camada de 5-15cm.

Ganjegunte et al. (2009) avaliaram o teor de carbono orgânico total da camada de 0-5cm de solos construídos após a mineração de carvão em duas localidades, Belle Ayr (BA) e Dave Johnston (DJ), no estado de Wyoming, EUA. Para fins comparativos, estes autores avaliaram em cada localidade um solo natural. Em BA, o solo natural apresentou 26,51g kg<sup>-1</sup> de carbono orgânico total, sendo superior aos teores apresentados por solos construídos com diferentes idades, com menos de um ano de construção (6,16g kg<sup>-1</sup>), com 16 anos (6,92g kg<sup>-1</sup>) e com 26 anos (14,20g kg<sup>-1</sup>). Entretanto, o solo com 14 anos apresentou teores iguais aos do solo natural (20,22g kg<sup>-1</sup>). Na localidade de DJ o solo natural apresentou teor de carbono (18,69g kg<sup>-1</sup>) mais elevado do que os solos construídos com cinco (6,67g kg<sup>-1</sup>) e 16 anos de recuperação

(7,43g kg<sup>-1</sup>). Já o solo construído com 10 anos, apresentou teor de 8,29g kg<sup>-1</sup> igualando-se tanto ao solo natural como aos demais solos. No solo natural e em ambas as localidades, a vegetação predominante era de gramíneas e arbustos. O fato de solos com idades intermediárias de construção terem apresentado teores de COT iguais ao do solo natural e até superiores aos teores de solos construídos mais antigos foi explicado pela qualidade superior do material utilizado para construção destes solos.

Comparando o estoque de matéria orgânica de solos construídos após a mineração de carvão em Ohio, EUA, Chatterjee et al. (2009) verificaram que áreas vegetadas com gramíneas apresentaram estoques de 29,7; 29,5 e 9,11Mg ha<sup>-1</sup>, após 30, nove e um ano de cultivo, respectivamente, na camada de 0-10cm. O solo construído reflorestado, após 11 anos de cultivo, apresentou um estoque de 21,9Mg ha<sup>-1</sup>, enquanto este valor foi de 31,9Mg ha<sup>-1</sup> para o solo natural adjacente à área experimental.

Akala & Lal (1999) em experimento de longa duração em Ohio, EUA, avaliaram duas áreas construídas após a mineração de carvão. Uma das áreas recebeu o “solo orgânico” quando da construção do solo, enquanto a outra não recebeu. Estes autores verificaram que a área que recebeu o solo orgânico apresentou maiores estoques de MOS, mesmo considerando que a área sem solo orgânico foi cultivada por 50 anos e a área com o solo orgânico foi cultivada por apenas 25 anos. Além disso, estes autores observaram que a pastagem apresentou maior potencial de acúmulo de MOS em relação à floresta, em ambas as áreas.

A heterogeneidade dos solos construídos é significativa e, portanto, a recuperação destes solos torna-se um processo pontual, característico de cada ambiente e situação. Por isso, a dinâmica da formação do solo e do acúmulo de carbono orgânico pelo processo de recuperação e durante a sucessão primária da vegetação em solos construídos após a mineração ainda não são bem entendidos (SOURKOVÁ et al., 2005).

## **2.6 Fracionamento da matéria orgânica do solo**

Os compartimentos da MOS são estabelecidos teoricamente e baseiam-se na complexidade estrutural dos compostos (biomoléculas, substâncias húmicas e carvão) ou na localização e/ou interação com a matriz mineral do solo (matéria orgânica particulada, matéria orgânica associada aos minerais e matéria orgânica dissolvida) (DICK et al., 2009).

A MOS consiste de um conjunto heterogêneo de compostos orgânicos diferindo em composição, grau de disponibilidade para microbiota e função no ambiente (CARTER, 2001). Os fracionamentos utilizados em estudos da MOS reduzem esta heterogeneidade, separando frações homogêneas quanto à natureza, dinâmica e função (CHRISTENSEN, 2001).

Estudos têm demonstrado que determinados compartimentos da MOS são capazes de detectar, mais rapidamente, as mudanças nos conteúdos de carbono no solo decorrentes do manejo, em relação à MOS (XAVIER et al., 2006). As frações da matéria orgânica vêm sendo utilizadas como indicadores sensíveis às práticas de manejo do solo (CAMBARDELLA & ELLIOT 1992; OYDELE et al., 1999; BAYER et al., 2004; SCHIAVO et al., 2009; ASHAGRIE et al., 2007; TAN et al., 2007; MAPFUMO et al., 2007; ROSA, 2010).

A escolha do método de fracionamento depende do objetivo do estudo que se conduz, seja ele para caracterização e identificação química de componentes específicos da MOS (fracionamento químico), ou para quantificação de compartimentos da MOS importantes e sua relação com funções essenciais como a ciclagem e liberação de nutrientes (fracionamento físico) (COLLINS et al., 1997).

### **2.6.1 Fracionamento químico**

Grande parte da matéria orgânica do solo consiste em uma série de compostos ácidos não humificados e macromoléculas humificadas. O primeiro grupo é representado pelos compostos orgânicos, incluindo carboidratos, gorduras, ceras e proteínas, e constituem de 10 a 15% da matéria orgânica dos solos minerais. Já o segundo grupo, e principal, é representado pelas substâncias húmicas, que constituem de 85 a 90% (PINHEIRO et al., 2004).

O fracionamento químico da MOS, com base na solubilidade em meio ácido e alcalino, geralmente é empregado para quantificar e caracterizar química e estruturalmente os componentes húmicos (humina, ácido húmico e ácido fúlvico), além de avaliar o seu grau de humificação e reatividade dos compartimentos químicos (DICK et al., 2009).

A distribuição da matéria orgânica em substâncias húmicas, ácido húmico (AH), ácido fúlvico (AF) e humina (HU), dependerá do tipo de solo e de vegetação existente sobre o solo, do uso e manejo do solo e das condições climáticas e de drenagem do local (DICK et al., 2009). Os AF são compostos de maior solubilidade por apresentar maior polaridade e menor tamanho molecular; e são responsáveis por transporte de

cátions no solo. Os AH são os compostos mais estudados e apresentam pouca solubilidade na acidez normalmente encontrada em solos tropicais, e são responsáveis pela maior parte da CTC de origem orgânica em camadas superficiais. A HU, apesar de apresentar baixa reatividade, é responsável pela agregação das partículas e, na maioria dos solos tropicais, representa boa parte do carbono humificado do solo (BENITES et al., 2003).

Estudos de MOS através das substâncias húmicas (AH, AF e HU) têm contribuído para o entendimento da pedogênese, da melhoria das propriedades físicas do solo, das interações organominerais e do impacto do manejo sobre indicadores da qualidade do solo. Porém, os métodos de fracionamento químico pouco têm contribuído para a identificação de compartimentos da MOS que diminuam sua magnitude sob manejo intensivo e de modo distinto ao longo do tempo, em virtude dos AH e AF, em geral, apresentarem baixa taxa de transformação e, assim, dificilmente se relacionam com processos de curto prazo (ROSCOE & MACHADO, 2002).

### **2.6.2 Fracionamento físico**

O fracionamento físico da MOS é considerado menos destrutivo no que se refere à estrutura e composição da MOS, e os resultados obtidos com as frações físicas são relacionados mais diretamente com a estrutura e função da MOS *in situ*, quando comparados aos do fracionamento químico (CHRISTENSEN, 1992, 2001; GOLCHIN et al., 1994). Esta técnica de fracionamento no estudo da MOS tem-se mostrado promissora, pois possibilita a separação de diferentes compartimentos orgânicos cada qual respondendo, de forma distinta, às práticas de manejo (COLLINS et al., 1997).

Os métodos de fracionamento físico da MOS utilizam dois princípios. O fracionamento densimétrico baseia-se na diferença de densidade das partículas orgânicas e minerais, enquanto o fracionamento granulométrico baseia-se na diferença de tamanho dos constituintes implicados no complexo organomineral e de outras partículas do solo.

O fracionamento granulométrico permite separar as frações da MOS de acordo com o seu tamanho e as respectivas interações com a fração mineral do solo. O carbono contido na fração da MOS de tamanho areia ( $> 0,053\text{mm}$ ) chama-se carbono orgânico particulado (COP) ou carbono da fração grosseira (CFG) e é composto, principalmente por restos vegetais em vários estágios de alteração e em geral se encontra em menor proporção, contribuindo com cerca de 3 a 20% do carbono orgânico total. O carbono das frações da MOS de tamanho silte e argila ( $< 0,053\text{mm}$ ) constituem-

se de material orgânico em estágio mais avançado de decomposição e concentram maiores proporções da MOS devido à grande área superficial específica dessas frações minerais, formando-se associações organo-minerais (CONCEIÇÃO, 2006; DIEKOW, 2003; GREGORICH et al., 2006).

O fracionamento densimétrico separa a MOS em dois compartimentos principais, baseando-se nas densidades específicas das frações orgânicas (RANGEL et al., 2007). Estes compartimentos são: a) fração leve (FL), a qual possui densidade inferior a  $1,7\text{kg dm}^{-3}$ , que consiste em um compartimento com grau de decomposição intermediário entre os resíduos vegetais e a MOS estabilizada e humificada e que apresenta normalmente, a menor fração do compartimento morto da MOS (10 a 30%); b) Fração pesada (FP), composta por materiais orgânico adsorvidos ou depositados pelos microorganismos na superfície das partículas minerais dos agregados, podendo conter mais de 90% da MOS. A FP é constituída de materiais orgânicos em elevado estágio de decomposição, os quais formam complexos ou associações com as partículas minerais do solo, principalmente com as argilas (CHRISTENSEN, 2001; GOLCHIN et al., 1994). Esta fração densimétrica é a mais estável, caracterizada por uma baixa taxa de ciclagem, pois sua estabilização envolve os três mecanismos de proteção: recalcitrância molecular, oclusão e interação com minerais (CHRISTENSEN, 2000).

Cabe salientar que a FL, correspondente à MOS não complexada e composta por resíduos vegetais, animais e microbianos em vários estágios de decomposição (GREGORICH, 2006), pode ainda ser dividida em fração leve livre (FLL) e fração leve oclusa (FLO). A FLL é a porção da FL encontrada entre os agregados, na qual atua somente um mecanismo de proteção contra a degradação, a recalcitrância molecular. Já a FLO corresponde à porção da FL que se encontra dentro dos agregados, na qual atuam dois mecanismos de proteção, a recalcitrância molecular e a oclusão (CONCEIÇÃO et al., 2008).

Uma das discussões em torno do fracionamento densimétrico é sobre a utilização indistinta de soluções de Iodeto de Sódio (NaI) e Politungstato de Sódio (PTS)  $[\text{Na}_6(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40})\cdot\text{H}_2\text{O}]$  em relação à outras soluções com toxidez elevada, para a separação das frações densimétricas.

Conceição et al. (2008), compararam o NaI e o PTS e verificaram que na densidade de  $1,8\text{g cm}^{-3}$  o NaI é menos eficiente na recuperação da FLO da MOS, não havendo diferença quanto à recuperação da FLL. Quando a densidade do reagente foi elevada a  $2\text{g cm}^{-3}$  os autores verificaram que o PTS apresentou um incremento na recuperação das frações FLL e FLO. Portanto, a utilização de PTS na densidade de  $2\text{g}$

cm<sup>-3</sup> tem sido recomendada em estudos de proteção física da MOS. A formação de complexos entre o lodo e a MOS resulta provavelmente no aumento da densidade da FLO e redução da eficiência de sua recuperação quando do uso da solução de NaI. Ao mesmo tempo, a baixa concentração de grupos funcionais capazes de reagir com o I<sup>-</sup> na estrutura da FLL deve explicar o comportamento semelhante entre as soluções de NaI e PTS na recuperação desta fração da MOS.

## **2.7 Efeito do manejo sobre as frações da MOS**

O estoque de carbono orgânico total e sua distribuição em diferentes compartimentos (frações) é determinado pela diferença entre as quantidades de carbono que são adicionadas e perdidas do solo em função da decomposição, erosão e lixiviação da MOS (DALAL & MAYER, 1986). Além disso, outros fatores como clima, textura, mineralogia, pH do solo, disponibilidade de nutrientes, meso e microfauna, quantidade de resíduos e sua composição química, afetam os estoques de carbono (ALVAREZ & LAVADO, 1998; EMPINOTTI, 1999).

As frações da MOS vem sendo utilizadas como indicadores de qualidade do solo, por serem mais sensíveis às alterações de manejo do solo do que o carbono orgânico total.

Lima et al. (2008) avaliaram três áreas, cada uma delas cultivada com pastagem, eucalipto e mata, em duas localidades distintas no Vale do Rio Doce, MG. Neste experimento foram realizados além dos fracionamentos químico e físico da MOS, a determinação do carbono microbiano, verificando-se que o carbono orgânico total e as frações FLL, AF, AH e HU foram as mais sensíveis às alterações de manejo do solo. Estes dados corroboram os encontrados no trabalho de Pulrolnik et al. (2009), no Vale do Jequitinhonha, MG, onde comparando solos característicos de cerrado com áreas de pastagem e eucalipto, verificaram que as frações FL, AF, AH e HU foram sensíveis em detectar as alterações na MOS provocadas por estes três diferentes cultivos do solo.

Pinheiro et al. (2004), realizaram o fracionamento densimétrico da matéria orgânica de solos sob diferentes sistemas de cultivo (cultivo mínimo, preparo convencional, plantio em nível, solo sem cobertura vegetal e tendo como referência um solo cultivado com gramíneas). Estes autores verificaram que a FLL foi a mais sensível à degradação da MOS pelo cultivo do solo.

Marinari et al. (2007) na Itália central, avaliaram duas áreas com 8 anos de cultivo agrícola, uma delas sobre cultivo orgânico e a outra sobre cultivo convencional. Neste experimento, o carbono orgânico total apresentou-se igual em ambas as áreas.

Entretanto, o carbono na forma húmica e a fração lábil foram sensíveis em indicar as alterações no manejo do solo, sendo mais elevados na área sobre cultivo orgânico.

Os fracionamentos da MOS tem sido amplamente utilizados em pesquisas que objetivam comparar solos de áreas naturais (não cultivados) com solos sob cultivo agrícola, em diferentes sistemas de manejo (MALIK & SCULLION, 1998; LEIRÓS et al., 2003; JACINTHE & LAL, 2009). Entretanto, os estudos referentes à matéria orgânica em solos construídos após a mineração têm-se limitado à determinação apenas do conteúdo total de carbono (FILCHEVA et al., 2000), havendo, portanto, carência de dados referentes ao comportamento das frações da MOS neste tipo de solo.

Para comparar sistemas de manejo quanto à capacidade de melhorar a qualidade do solo, vem sendo utilizado o índice de manejo de carbono (IMC) que considera a relação entre a fração lábil e não lábil da MOS e os estoques de carbono orgânico total. Este índice foi proposto inicialmente por Blair et al. (1995), onde, para oxidar a MOS, utilizava-se o permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ )  $333\text{mol L}^{-1}$ . A porção oxidada representava a fração lábil e a fração não oxidada representava a fração não lábil da MOS. Posteriormente, este índice foi adaptado para considerar as frações obtidas pelo fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica (DIEKOW et al., 2003; VIEIRA et al., 2007). O IMC passou considerar como fração lábil o CFG e como fração não lábil o CAM.

Sabendo-se que a área de mineração de carvão no estado do Rio Grande do Sul tende a aumentar (QUIÑONES et al., 2008), estudos abrangendo não só o conteúdo de matéria orgânica do solo, mas também a sua distribuição em compartimentos, torna-se uma ferramenta importante para propor manejos que acelerem os processos de recuperação dos solos construídos.

## **2.8 Caracterização espectroscópica da matéria orgânica do solo**

Baseando-se nas características de complexidade química e heterogeneidade da MOS e de seus constituintes húmicos, utilizar somente a informação quantitativa sobre o conteúdo de carbono no solo tem-se mostrado limitado, exigindo informações mais específicas (ABREU et al., 2009).

Atualmente, várias técnicas espectroscópicas tem sido utilizadas buscando avançar em tópicos relevantes associados ao sistema solo-água-plantas. Dentre as técnicas existentes podem ser citadas a Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e a Espectroscopia de Fluorescência Induzida a Laser (FIL).

Sendo assim, é fundamental que estas técnicas sejam incluídas como ferramentas de auxílio no entendimento das complexas reações existentes no solo (ABREU et al., 2009).

Quando as técnicas espectroscópicas são utilizadas para o estudo da MOS, faz necessária a realização de procedimentos de extração química e/ou física, pois a matéria orgânica, normalmente se apresenta em pequenas quantidades e associada aos constituintes do solo, requerendo que seja feita a sua concentração e na maioria dos casos, a purificação destas frações para evitar a influência de material inorgânico nas análises (ROSA, 2010).

Estas técnicas vêm sendo utilizadas em estudos de matéria orgânica e suas frações em solos sob diferentes sistemas de cultivo, espécies vegetais e rotações de culturas (DICK et al., 2008; FAVORETTO et al., 2008; DIAS et al., 2009; DOBBSS et al., 2009; ROSA, 2010).

Considerando-se que a MOS afeta os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, o conhecimento da sua composição em áreas de solos construídos após a mineração de carvão é fundamental para que o uso do solo seja otimizado, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais gerados nestas áreas (DICK et al., 2006). Entretanto, poucos são os trabalhos que caracterizam quimicamente a matéria orgânica e suas frações em solos construídos após a mineração de carvão (RUMPEL et al., 1998; DICK et al., 2006).

A Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) permite a observação de mudanças ambientais provocadas pelo manejo do solo. Em solos onde predominam sistemas que expõem mais a MOS aos agentes de decomposição, favorecendo a sua mineralização, após um período, permanece apenas a matéria orgânica mais recalcitrante, a qual apresenta características específicas como maior aromaticidade da estrutura (ROSA et al., 2010).

A espectroscopia de FTIR é uma técnica de fácil interpretação e vem sendo aplicada em estudos dos grupos funcionais da MOS (hidróxidos, carboxílicos, alifáticos e aromáticos, dentre outros). A porção na região do infravermelho de maior utilidade para a análise de moléculas orgânicas corresponde ao intervalo entre  $4000$  e  $400\text{nm}^{-1}$ , onde a energia dos fótons provoca movimentos vibracionais de átomos e grupos ligados covalentemente, permitindo a identificação desses movimentos rotacionais em grupos de ligações simples (ABREU et al., 2009).

As substâncias húmicas apresentam bandas típicas em espectros de infravermelho e esta técnica tem sido eficiente na caracterização qualitativa de

substâncias húmicas, facilitando o entendimento sobre a natureza, reatividade e arranjo estrutural dos seus grupos funcionais (ABREU et al., 2009). Na tabela 2 podem ser observadas as regiões do infravermelho características de AH.

**Tabela 2.** Região das bandas no infravermelho do ácido húmico.

Região (cm <sup>-1</sup> )	Origem
3380	Estiramento OH do grupo fenólico (contribuição de OH alifático H <sub>2</sub> O e possivelmente NH)
3030	Estiramento CH aromático
2930	Estiramento CH assimétrico
2840	Estiramento CH simétrico
2600	Estiramento OH de H ligado a -COOH
1720	Estiramento -C=O de -COOH
1610	Estiramento C=C aromático e/ou estiramento -COOH assimétrico
1520-1525	Estiramento C=C aromático, deformação N-H e estiramento C=N de amidas
1450	Deformação -CH de -CH <sub>3</sub> e dobramento -CH de CH <sub>2</sub>
1350	Estiramento -COOH simétrico e/ou dobramento -CH alifáticos
1270	Estiramento -C-O de fenólico
1225	Estiramento -C-O e de deformação OH de -COOH
1170	Estiramento -C-OH de alifáticos OH
1050 e 1040	Estiramento C-O de polissacarídeos ou derivados de polissacarídeos e Si-O de impurezas silicatadas
830	Vibração CH fora do plano, Impurezas argilosas
775	Vibração CH fora do plano

Fonte: Dick et al. (2009).

A Espectroscopia de Fluorescência Induzida a Laser (FIL) é uma técnica relativamente nova e que tem sido aplicada em amostras de solos inteiro, mostrando-se uma técnica eficiente e precisa para avaliar o grau de humificação da matéria orgânica. Além disso, constitui-se em uma técnica ágil, limpa e que avalia as amostras de solo em condições próximas as naturais (MILORI et al., 2002; MILORI et al., 2006).

O princípio da técnica consiste em excitar o solo com um laser, cuja emissão está na região do ultravioleta/azul, o que resulta na fluorescência de grupos funcionais da matéria orgânica relacionados com o processo de humificação. A fluorescência do solo está na matéria orgânica que apresenta grupos funcionais ricos em ligações insaturadas, que estão principalmente na matéria orgânica humificada. Ao iluminar a amostras de solo com luz azul, excitam-se preferencialmente as estruturas cuja concentração aumenta no processo de humificação (MILORI et al., 2006).

Outra informação importante que pode ser obtida por esta técnica é o grau de humificação da matéria orgânica (HFIL). Para tanto, o valor da área do espectro de fluorescência tem que ser dividido pelo teor de carbono orgânico da amostra. Com esse procedimento os valores de fluorescência são corrigidos para valores equivalentes de C orgânico, considerando o grau de humificação como única variável entre as amostras (MILORI et al., 2004).

### 3 ESTUDO 1. Influência de coberturas vegetais sobre as substâncias húmicas de um solo construído após a mineração de carvão.

#### 3.1 Introdução

No Rio Grande do Sul (RS), a principal reserva de carvão mineral está localizada no município de Candiota. Neste município, situa-se a Mina de Candiota, pertencente à Companhia Riograndense de Mineração (CRM), a qual está vinculada à secretaria das Minas e Energia do RS, atingindo reservas de  $1.406,63 \times 10^6$ t, dos quais  $839,18 \times 10^6$ t correspondem ao carvão que pode ser minerado a céu aberto (MIOLA, 2010). Este tipo de mineração de carvão dá origem a áreas de solos impactados, resultantes dos processos de extração e recomposição topográfica (KOPPE & COSTA, 2002). A legislação ambiental exige que as empresas mineradoras executem a recuperação destas áreas, possibilitando que os solos construídos propiciem condições para o desenvolvimento vegetal (PINTO, 1997).

Após a mineração, os horizontes e os materiais litológicos anteriormente retirados, são colocados sobre a superfície remanescente, dando origem aos solos denominados construídos. Estes solos normalmente apresentam mistura de horizontes (A, B, C), onde as camadas superficiais mais férteis, as quais armazenam matéria orgânica, são misturadas com as subsuperficiais menos férteis, dificultando as atividades de recuperação da área degradada (SHUKLA et al., 2004).

O declínio na quantidade de matéria orgânica do solo (MOS) desencadeia processos de degradação. Em casos extremos, estes processos levam o solo a perder a capacidade regenerativa, necessitando de interferência antrópica para restabelecer parte das suas funções mínimas, dando início ao processo de recuperação do solo (SIQUEIRA et al., 2008).

Devido à importância da MOS como indicadora da qualidade do solo, são necessárias intervenções visando o aporte de material orgânico, o que pode ser feito através da revegetação ou vegetação do solo, já que em áreas degradadas os níveis de matéria orgânica são baixos (SIQUEIRA et al., 2008). Considerando que a MOS afeta as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, o conhecimento da sua composição em áreas construídas após a mineração de carvão é essencial para que se estabeleçam estratégias de mitigação dos impactos negativos gerados nestas áreas e para que se potencialize o uso destes solos (DICK et al., 2006).

O fracionamento químico da MOS geralmente é empregado em estudos que objetivam caracterizar química e estruturalmente os componentes húmicos, além de

avaliar o grau de decomposição e reatividade dos compartimentos químicos (DICK et al., 2009). As frações químicas, ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HU), apresentam características químicas, físicas e morfológicas distintas, e a distribuição dessas frações pode indicar a qualidade da MOS (LIMA, 2004). Os AHs são compostos estáveis, ou seja, de difícil degradação (STEVENSON, 1994) e a caracterização da qualidade desta fração pode auxiliar na compreensão da dinâmica da MOS, funcionando como um indicador deste ambiente (MIRANDA et al., 2007).

A espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) tem sido utilizada para identificar os principais grupos funcionais da matéria orgânica de solos sob diferentes sistemas de cultivo agrícola, silvicultura e pecuária, para avaliar a influência da adição de compostos de lixo urbano sobre a qualidade da MOS e também como ferramenta para auxiliar na classificação de solos brasileiros (BENITES et al., 2001; CANELLAS et al., 2001; FONTANA, 2009; ROSA, 2010). Entretanto, poucos são os trabalhos que avaliam a distribuição do carbono nas frações químicas e a qualidade da matéria orgânica em solos degradados por mineração.

Filcheva et al. (2000) avaliaram a vegetação, com espécies florestais (*Pinus nigra* e *Robinia pseudoacacia*), de um solo construído após a mineração de carvão e concluíram que a espécie vegetal influenciou no teor de carbono orgânico total e na distribuição das frações AF, AH e HU no solo. Schiavo et al. (2007) utilizaram a espectroscopia de FTIR para avaliar o AH de um solo degradado após a extração de argila e vegetado com diferentes espécies, e observaram mudanças na composição desta fração de acordo com a espécie utilizada para vegetação.

Considerando-se que a área de mineração de carvão no RS tende a aumentar devido às novas exigências de carvão em virtude da expansão da UPME (CRM, 2010) e que, os estudos sobre a matéria orgânica de solos construídos e vegetados após a mineração de carvão são incipientes, este trabalho objetivou avaliar os estoques e a distribuição das frações húmicas da matéria orgânica e as características espectroscópicas do AH de um solo construído após a mineração de carvão e cultivado com coberturas vegetais desde 2003, no município de Candiota/RS.

## **3.2 Material e métodos**

### **3.2.1 Caracterização da área experimental**

A área experimental, com altitude de 230m e coordenadas 31° 33' 55,5"S e 53° 43' 30,6"W, localiza-se na região da Campanha do RS, na área de mineração de carvão

da CRM, localizada no município de Candiota/RS. Este município situa-se a 400 km da capital do Estado, Porto Alegre e a 140 km de Pelotas.

O clima da região é classificado como sendo do tipo Cfa (subtropical úmido) de acordo com a classificação de Wilhelm Köppen. O experimento encontra-se sobre uma área construída após a mineração de carvão, sendo o solo caracterizado pela mistura de horizontes, com predomínio de horizonte B e pertencente à classe textural argilosa (Tabela 1). Considerando a camada de 0,00 a 0,05m, o solo natural da frente de mineração foi classificado como Argissolo Vermelho Eutrófico típico (Embrapa, 2006) e pertence à classe textural franca.

**Tabela 1.** Granulometria e densidade do solo (Ds) da camada de 0,00 a 0,05m de um solo construído em área de mineração de carvão, cultivado com diferentes plantas de cobertura.

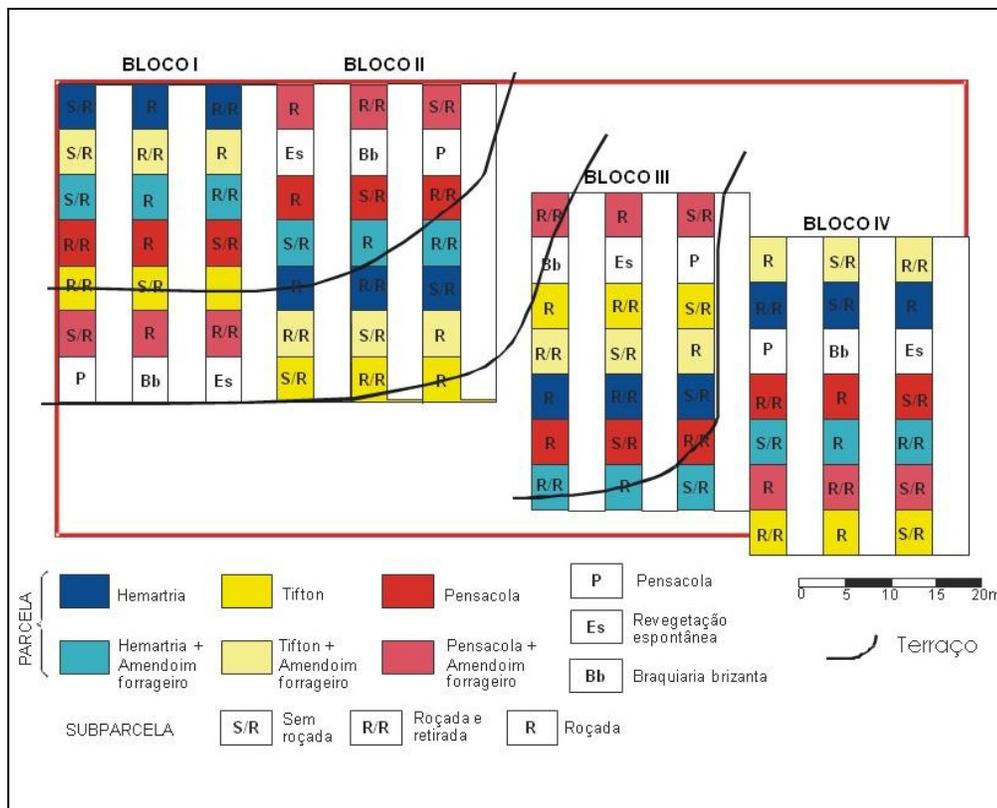
Tratamentos	Argila	Areia	Silte	Classe textural	Ds** Mg m <sup>-3</sup>
	-----g kg <sup>-1</sup> -----				
T1 - Hemária	463,7	298,1	238,3	Argilosa	1,36
T2 - Pensacola	474,2	291,9	233,9	Argilosa	1,46
T3 - Tifton	469,7	283,8	246,8	Argilosa	1,43
T4 - Braquiária	452,6	289,7	257,7	Argilosa	1,41
T8 - Solo descoberto	456,7	311,7	231,5	Argilosa	1,46
T9 - Solo natural	227,2	483,6	289,1	Franca	1,47
CV (%)	23*	24*	9*		4,18*

\*Valores referentes aos tratamentos 1, 2, 3 e 4. \*\* Dados de MIOLA (2010).

O experimento foi instalado em novembro/dezembro de 2003, em um delineamento experimental de casualização por blocos, com quatro repetições, sendo cada uma delas representada por uma parcela de 20 m<sup>2</sup> (4m x 5m). Os tratamentos foram compostos por diferentes espécies de coberturas vegetais, solteiras e consorciadas: Hemária (*Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf & C. E. Hubbard), Grama Tifton (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) + Amendoim forrageiro (*Arachis pintoí*); Hemária + Amendoim forrageiro; Pensacola (*Paspalum notatum* Flüggé); Grama Tifton; Pensacola + Amendoim forrageiro e Braquiária Brizantha (*Brachiaria brizantha* (Hochst.) Stapf).

Considerando que o amendoim forrageiro não se estabeleceu, conforme consta no Relatório Técnico do Projeto CRM (2007), foram avaliados apenas os tratamentos com os cultivos solteiros, procedendo a denominação dos tratamentos da seguinte forma: Hemária (T1), Pensacola (T2), Grama Tifton (T3) e Braquiária Brizantha (T4).

Para fins comparativos foram coletadas amostras em uma área adjacente ao experimento de um solo construído sem cobertura vegetal (T8) (Figura 2) e amostras de um solo natural (Argissolo) com vegetação nativa (T9) (Figura 3).



**Figura 1.** Croqui do experimento conduzido em solo construído sob diferentes espécies de coberturas vegetais desde 2003.



**Figura 2.** Solo construído descoberto (T8)      **Figura 3.** Solo natural com vegetação nativa.

Por ocasião da instalação do experimento, o solo foi escarificado a uma profundidade entre 0,10 e 0,15m. Posterior à escarificação foi realizada uma calagem com aplicação correspondente a 10,4ton ha<sup>-1</sup> de calcário com PRNT de 100% e uma adubação correspondente a 900kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 5-20-20 (NPK). Além disto, foram realizadas em todos os períodos correspondentes à estação da primavera

(outubro/novembro) adubações nitrogenadas utilizando sulfato de amônio na dose de 40kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio e capinas manuais com enxada, para a exclusão de plantas invasoras na área.

Em setembro de 2009 coletou-se amostras de solo, na camada de 0,00 a 0,03m, as quais foram secas ao ar e moídas em gral de ágata. As amostras indeformadas de solo foram coletadas utilizando-se anéis volumétricos de 3cm de altura e 4,85cm de diâmetro, na camada de 0,00 a 0,05m para a obtenção da densidade do solo (Ds).

### 3.2.2 Fracionamento químico da MOS

O fracionamento químico da MOS foi realizado com base na solubilidade em meio ácido e alcalino, conforme Dick et al. (1998) (Apêndice A). Em 20g de solo adicionou-se 60ml de ácido clorídrico (HCl) 0,5N e agitou-se horizontalmente por duas horas à 120 oscilações por minuto. Em seguida centrifugou-se a 2500rpm durante 15 minutos para extração das substâncias não húmicas (SNH). As SNH foram coletadas para posterior análise de teor de carbono. Utilizando-se 60ml de hidróxido de sódio (NaOH) 0,5mol L<sup>-1</sup>, agitou-se as amostras horizontalmente por três horas com 120 oscilações por minuto e logo após as mesmas foram centrifugadas a 2500rpm por 15 minutos. Desta forma, separou-se as substâncias húmicas (SH) (sobrenadante) da HU (precipitado). Para separar as SH em AF e AH, acidificou-se a solução contendo as SH com HCl 4N até pH entre 1,5 e 2,0, partindo-se de um pH inicial em torno de 12. Com isso o AH dissolvido nas SH, decantou durante 24h, permitindo a coleta do AF, o qual permanece dissolvido em pH ácido.

Após o fracionamento químico da MOS foram coletadas alíquotas de 20ml das frações SNH, SH e AF extraídas. O teor de carbono (C) nestas frações foi quantificado espectroscopicamente, medindo-se a absorbância a 580nm, após reação com solução ácida de dicromato de potássio 1,25mol L<sup>-1</sup>, durante 4 horas, a 60°C, empregando-se uma curva padrão de D-glucose anidra de 0 a 250mg C L<sup>-1</sup>. O teor de C na forma de AH e na fração HU foram estimados pelas diferenças  $C_{AH} = C_{SH} - C_{AF}$  e  $C_{HU} = C_{orgânico\ total} - (C_{SNH} + C_{SH})$ , respectivamente. O teor de carbono orgânico total (COT) foi determinado em analisador elementar TruSpec CHN.

Utilizando-se os teores de carbono nas frações da MOS foram calculados os índices de humificação: percentual de ácidos húmicos ( $HI = (C_{AH}/C_{SH}) \cdot 100$ ) e razão de humificação ( $HR = C_{AH}/C_{AF}$ ), segundo Chefetz et al. (1996).

Com base na Ds e nos teores de C de cada fração (SNH, SH, AF, AH e HU) calculou-se o estoque de C e sua distribuição como percentual do estoque de COT.

Os resultados de teores e estoques das frações da MOS, referentes aos tratamentos T1, T2, T3 e T4, foram submetidos à análise de variância e ao teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade. O tratamento T8 não foi incluído na análise estatística, pois não faz parte do delineamento experimental. O solo natural não foi incluído na análise estatística, pois suas condições não representam a realidade do solo da área experimental (solo construído).

### 3.2.3 Análises espectroscópicas

Para as análises de espectroscopia de FTIR, a fração AH foi purificada com solução de HCl+HF 5%/5% (v/v) visando eliminar contaminantes inorgânicos (DICK et al., 1997) e as quatro repetições de cada tratamento foram agrupadas, obtendo-se amostras compostas. As amostras de AH purificadas foram secas em estufa a 60°C, durante 24 horas. A análise por FTIR foi feita em pastilhas de brometo de potássio (KBr) no intervalo de 4000 a 400cm<sup>-1</sup>, resolução de 4cm<sup>-1</sup>, 21scans/min (Shimadzu 830 FTIR) na proporção amostra:KBr de 1:100. Os espectros de infravermelho foram interpretados segundo Dick et al. (2008).

### 3.3 Resultados e discussão

Após seis anos de experimento o teor de COT do solo não variou em função das diferentes coberturas vegetais utilizadas. Em média, as coberturas vegetais resultaram em um teor de COT de 13g kg<sup>-1</sup>. Teor de COT de 14g kg<sup>-1</sup> na camada de 0,00 a 0,03m foi encontrado por Sever & Makineci (2009) avaliando um solo construído após a mineração de carvão na Turquia, vegetado por 17 anos com *Pinus* (*Pinus pinaster*) e sem a utilização de nenhuma técnica para melhorar as condições do solo para o crescimento das plantas.

O solo sob as coberturas vegetais apresentou em média 5,77g kg<sup>-1</sup> de COT a mais do que os 7,18g kg<sup>-1</sup> apresentados pelo solo construído descoberto (T8) (Tabela 2), correspondendo a 1% a mais na concentração de matéria orgânica, mostrando o efeito benéfico das coberturas vegetais sobre a qualidade do solo degradado. Contudo, o teor de COT apresentado pelo solo natural foi, em média, 2,25 vezes maior que o apresentado pelos tratamentos T1, T2, T3 e T4, evidenciando o potencial de perda da MOS ocasionado pelos processos de mineração e recomposição topográfica da área.

As quatro coberturas vegetais utilizadas para vegetação não resultaram em diferentes teores de carbono nas frações SNH, AF e HU, sendo a fração AH a única sensível em detectar as alterações na composição da MOS em decorrência das

espécies utilizadas para vegetação. Considerando-se que  $SH = AH + AF$ , as diferenças existentes na fração SH, são explicadas pelo comportamento apresentado pelo AH, já que o AF variou somente  $0,67g\ kg^{-1}$  entre os tratamentos sob coberturas vegetais, enquanto que o AH variou  $1,44g\ kg^{-1}$  entre o teor mais elevado, observado no T4 e o teor mais baixo, observado no T3.

**Tabela 2.** Teor de carbono orgânico total (COT) e carbono nas substâncias não húmicas (SNH), substâncias húmicas (SH), ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HU) da matéria orgânica, na camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído e sob diferentes coberturas vegetais. Candiota/RS. Média de quatro repetições.

Tratamentos	COT	SNH	SH	AF	AH	HU
	-----g kg <sup>-1</sup> -----					
T1 - Hemátria	15,00 a	0,46 a	4,72 ab	2,46 a	2,26 ab	9,82 a
T2 - Pensacola	12,25 a	0,39 a	3,65 bc	2,16 a	1,48 bc	8,21 a
T3 - Tifton	10,95 a	0,40 a	3,31 c	2,07 a	1,24 c	7,24 a
T4 - Braquiária	13,58 a	0,52 a	5,43 a	2,74 a	2,68 a	7,64 a
T8 - Solo descoberto	7,18	0,36	2,24	1,80	0,45	4,58
T9 - Solo natural	29,10	1,00	10,84	6,10	4,73	17,26

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, ao nível de 5%.

O estoque de COT variou de  $4,60Mg\ ha^{-1}$  a  $5,92Mg\ ha^{-1}$ , não havendo diferença entre os tratamentos (Tabela 3). Isto pode ter ocorrido pelo fato de tratar-se de um solo recentemente construído e de as quatro espécies utilizadas para vegetação serem gramíneas. Apesar das plantas terem alterado de forma semelhante o estoque de COT, em média elas o elevaram em  $2,32Mg\ ha^{-1}$  (44%) em relação ao solo descoberto. Porém, o solo natural apresentou um estoque de COT  $7,0Mg\ ha^{-1}$  a mais do que o estoque médio apresentado pelo solo sob as diferentes coberturas vegetais, indicando que apesar de o solo degradado ter sido parcialmente recuperado, suas condições diferenciaram-se muito as do solo não minerado.

Chatterjee et al. (2009), compararam o estoque de COT da camada 0,00 a 0,10m de um solo construído após a mineração de carvão e vegetado durante 11 anos com espécies arbóreas (*Fraxinus americana* e *Pinus strobes*), com o de um solo natural e observaram que o solo natural apresentou  $10Mg\ ha^{-1}$  a mais de COT do que o solo construído. Segundo estes autores, o baixo estoque de COT dos solos construídos deve-se ao aumento da mineralização da MOS, erosão do solo proveniente da baixa agregação do mesmo e à lixiviação da MOS.

Assim como ocorreu com os teores de carbono nas frações da MOS, as coberturas vegetais avaliadas não proporcionaram diferentes estoques de SNH, AF e HU. Já o maior estoque de AH foi encontrado no tratamento T4, o qual não diferiu do T1 (Tabela 3). Isto sugere que a matéria orgânica nestes tratamentos encontra-se em um estágio

mais avançado de humificação. Entretanto, o solo natural apresentou  $1,2\text{Mg ha}^{-1}$  a mais de carbono na forma de AH em relação ao solo construído vegetado.

**Tabela 3.** Estoque de carbono orgânico total (COT) e nas frações substâncias não húmicas (SNH), substâncias húmicas (SH), ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (HU) da matéria orgânica, na camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído e sob diferentes coberturas vegetais. Candiota/RS. Média de quatro repetições.

Tratamentos	COT	SNH	SH	AF	AH	HU
	-----Mg ha <sup>-1</sup> -----					
T1 - Hemária	5,92 a	0,18 a	1,86 ab	0,97 a	0,89 ab	3,87 a
T2 - Pensacola	5,10 a	0,16 a	1,52 b	0,90 a	0,62 bc	3,42 a
T3 - Tifton	4,60 a	0,17 a	1,39 b	0,87 a	0,52 c	3,04 a
T4 - Braquiária	5,37 a	0,20 a	2,14 a	1,08 a	1,06 a	3,03 a
T8 - Solo descoberto	2,93	0,14	0,91	0,73	0,18	1,88
T9 - Solo natural	12,20	0,42	4,52	2,55	1,97	7,26

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, ao nível de 5%.

Em estudo realizado por Santos (2006), neste mesmo experimento, verificou-se que a Hemária (T1) apresentou uma produção de massa seca 48% superior à produção do Tifton (T3), o que pode favorecer a formação de ácidos húmicos. Schiavo et al. (2007) verificaram que em solos drasticamente modificados, como no caso de solos minerados, o maior aporte de material orgânico pode provocar um aumento nos estoques de substâncias húmicas.

Em relação ao solo descoberto, além de terem aumentado os estoques de AH as coberturas vegetais também aumentaram os estoques de AF, apesar de a espécie vegetal não ter influenciado no estoque de carbono desta fração. Pinheiro et al. (2003), avaliando diferentes sistemas de cultivo na camada de 0,00 a 0,05m de um Latossolo Vermelho verificaram que uma gramínea (Capim colônia - *Panicum maximum*), assim como as quatro gramíneas avaliadas neste experimento, aumentou os conteúdos de AF e AH da MOS em relação a um solo descoberto. Segundo os autores, a explicação deve-se ao denso sistema radicular da vegetação, que em contato com as partículas minerais, pode proporcionar o aumento na quantidade e na qualidade da MOS, favorecendo o incremento de carbono nas frações mais humificadas. Estes dados corroboram com os encontrados por Filcheva et al. (2000). Em estudo na Bulgária estes autores compararam as frações da MOS de solos construídos após a mineração de carvão vegetados por 25 anos com duas espécies arbóreas (*Pinus nigra* e *Black locust*), com a MOS de um solo construído sem vegetação e verificaram que devido a vegetação, os estoques de AH e AF foram elevados em relação ao solo descoberto.

Em todos os tratamentos, os maiores estoques de carbono foram encontrados na fração HU, não havendo diferença entre tratamentos (Tabela 3). As coberturas vegetais

propiciaram um estoque de HU 44% maior do que o do solo descoberto (T8), porém 54% inferior ao do solo natural (T9). Maior estoque de carbono na HU em solo sob sistemas naturais foi encontrado por Júnior & Melo (2000) em um Latossolo, quando comparado à diferentes sistemas de cultivo (milho, cana-de-açúcar e café). O maior estoque de HU em relação às demais frações da MOS deve-se a sua insolubilidade, à ligação mais estável com a fração mineral do solo e à maior resistência à biodegradação, pois esta fração química é a mais recalcitrante (STEVENSON, 1982; DICK et al., 2009; SANTOS, 2003).

A distribuição das frações da matéria orgânica em relação ao COT pode ser utilizada como indicativo da qualidade do húmus e a mesma influencia as características do solo, como a estrutura, a capacidade de troca catiônica e a disponibilidade de nutrientes. Portanto, alterando-se a distribuição destas frações, as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo são afetadas.

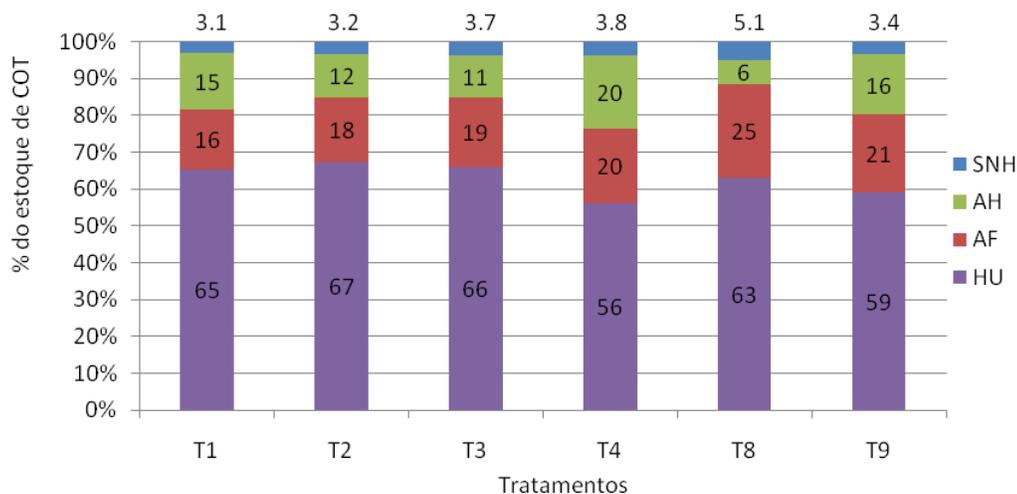
Apesar das alterações decorrentes dos processos de mineração de carvão, o solo construído manteve uma distribuição decrescente das frações químicas na seqüência HU>AF>AH (Figura 4), a qual foi mais compatível com a distribuição das frações no solo natural (Argissolo) do que com a do solo construído descoberto (T8). Além disso, a distribuição das frações no solo vegetado foi semelhante à distribuição das frações considerando a média dos Argissolos brasileiros, onde há o predomínio da HU e baixos conteúdos de AH (Canellas & Santos, 2005). Resultados semelhantes ao deste experimento foram encontrados por Miranda et al. (2007) avaliando a distribuição das frações da MOS de um Argissolo sob mata nativa e sob cultivo de eucalipto, verificando que a distribuição das frações decresceu na mesma seqüência, HU>AF>AH.

Segundo Kögel-Knaber et al. (1988) os AH geralmente são encontrados em menor proporção nos solos brasileiros, mas assumem um papel importante como indicador da qualidade da MOS devido ao fato de que esta fração é a que mais sofre alterações estruturais durante o processo de humificação.

A HU representou em média 63,5% nos tratamentos T1, T2, T3 e T4, valor muito próximo ao ocorrido no solo construído descoberto (63%). Já a fração AH representou em média 14,5% nos tratamentos com as coberturas vegetais e somente 6% no tratamento T8. Já para o AF estes valores foram 18,3% e 25%, respectivamente (Figura 4).

Entre as coberturas vegetais avaliadas, nota-se que os tratamentos T1, T2 e T3 apresentaram comportamento semelhante quanto à distribuição das frações da MOS (Figura 4), enquanto o T4 mostrou-se com uma distribuição diferenciada, com menor

proporção de HU e maiores proporções de AH e AF, provavelmente em decorrência do maior aporte de resíduos orgânicos ao solo pela Braquiária. No T8, a menor representatividade do AH em relação ao estoque de COT, ocorreu possivelmente devido à ausência de coberturas vegetais neste solo.

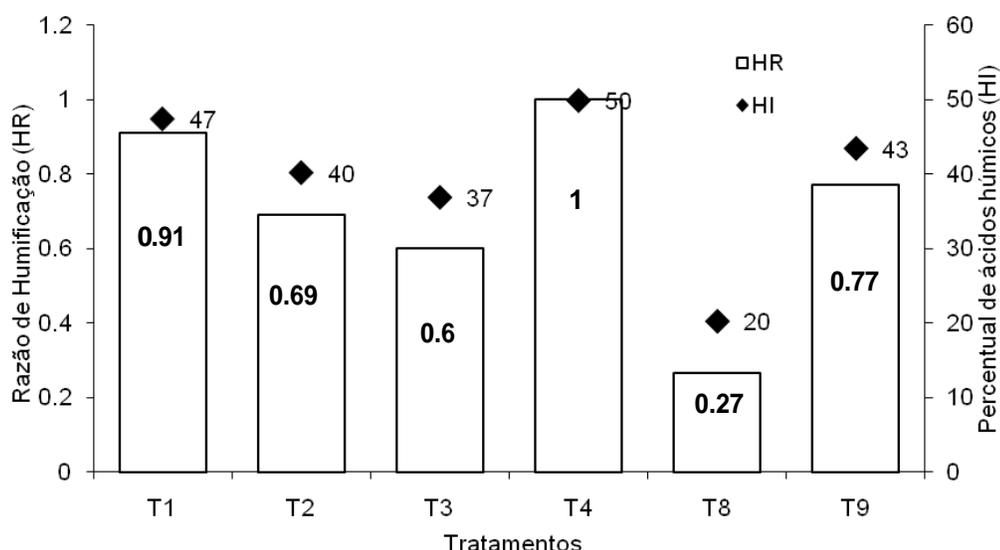


**Figura 4.** Distribuição das substâncias não húmicas (SNH), do ácido húmico (AH), do ácido fúlvico (AF) e da humina (HU) como percentual do estoque de carbono orgânico total (COT), na camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído e sob diferentes coberturas vegetais. Candiota/RS. Média de quatro repetições. Hemária (T1), Pensacola (T2), Tifton (T3), Braquiária (T4), Solo construído descoberto (T8) e Solo natural (T9).

O índice HR, indicador de condensação da MOS (LABRADOR MORENO, 1996), variou de 0,27 (T8) a 1 (T4) e entre os tratamentos com as coberturas vegetais o HR decresceu na seqüência T4>T1>T2>T3 (Figura 5). O maior índice HR do T4 (Figura 5) deve-se principalmente ao maior teor de AH (2,68g kg<sup>-1</sup>) apresentado neste tratamento em relação aos demais, fazendo com que o mesmo se diferenciase, já que os teores de AF foram iguais entre os tratamentos (Tabela 2). De acordo com Martins et al. (2009) maiores índices HR indicam maior mobilidade do carbono no sistema. Segundo Canellas et al. (2002) em solos onde há menor intensidade do processo de humificação, em decorrência da intensa mineralização dos resíduos, das restrições edáficas e do baixo conteúdo de bases trocáveis, como frequentemente é o caso de solos construídos, o índice HR normalmente é menor do que 1, pois nestes casos há a restrição das atividades biológicas. Filcheva et al. (2000) encontraram valores de HR de 0,45 e 0,81 na camada de 0 a 0,05m de solos construídos após a mineração de carvão e vegetados com as espécies arbóreas *Pinus nigra* e *Black locust*, respectivamente.

As coberturas vegetais que proporcionaram maiores índices HI foram a Hemártria e a Braquiária, 47 e 50, respectivamente (Figura 5), indicando uma matéria orgânica mais humificada. Como o HI indica o percentual de SH que é formado por AH e considerando que os teores de AF nos tratamentos não diferiram, as variações ocorridas nos valores de HI são explicadas pelas variações nos teores de AH. Na tabela 1 nota-se que os teores de AH decresceram na seqüência T4>T1>T2>T3 e os valores do índice HI obedeceram a mesma ordem (Figura 5).

O solo descoberto (T8) foi o que apresentou o menor HR e o menor HI, pois este tratamento apresentou um teor de AF 4 vezes maior do que o de AH, enquanto que esta relação foi, em média, de apenas 1,3 para o solo vegetado. Já o solo natural (T9) por tratar-se de um ambiente equilibrado, apresentou índices HI e HR intermediários, entre o solo construído vegetado e o solo construído descoberto (Figura 5).



**Figura 5.** Índices de humificação: razão de humificação (HR) e percentual de ácidos húmicos (HI) da matéria orgânica, na camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído e sob diferentes coberturas vegetais. Candiota/RS. Média de quatro repetições. Hemártria (T1), Pensacola (T2), Tifton (T3), Braquiária (T4), Solo construído descoberto (T8) e Solo natural (T9).

Os espectros de FTIR do AH dos tratamentos T1, T2, T4 e T9 foram semelhantes entre si. Já o dos tratamentos T3 e T8 assemelharam-se e foram distintos dos demais. (Figura 6). Sendo assim, para uma melhor discussão, os tratamentos foram separados em dois grupos G1 = T1, T2, T4 e T9 e G2 = T3 e T8.

No G1 observa-se uma banda de absorção entre  $3.670\text{cm}^{-1}$  e  $3.130\text{cm}^{-1}$ , com um pico intenso centrado em  $3.400\text{cm}^{-1}$  (Figura 6). De acordo com Bertoncini (2002) a

região de 3.750–3.400  $\text{cm}^{-1}$  é característica de estiramento e deformações de ligações O-H e Si-O, ou seja, caracterizada pela presença de impurezas minerais e segundo Potes (2009), bandas entre 3.600 e 3.400  $\text{cm}^{-1}$ , são atribuídas a vibração O-Al-OH da gibssita, indicando que este mineral juntamente com a caulinita, está associado às frações AH da MOS. Dias et al. (2009) avaliaram AHs extraídos da camada de 0,00 a 0,10m de um Latossolo submetido a diferentes tratamentos (mata, adubação NPK mineral para a cultura do milho, e doses crescentes de lodo de esgoto aplicado ao solo) e encontraram bandas na região de 3.700 a 3.400 $\text{cm}^{-1}$ . Estes autores verificaram, assim como no presente estudo, banda na região de 3.440 a 3.300 $\text{cm}^{-1}$  e segundo eles esta banda se refere ao estiramento COOH em ponte de H, de modo que a força das ligações intramoleculares indica a extensão do alargamento; quanto mais pontes, mais ácido é o material analisado e mais larga é a absorção nessa região.

A região de 3.400 $\text{cm}^{-1}$  também é característica de grupos N-H, entretanto, não foi possível observar este grupamento, devido à sobreposição de bandas.

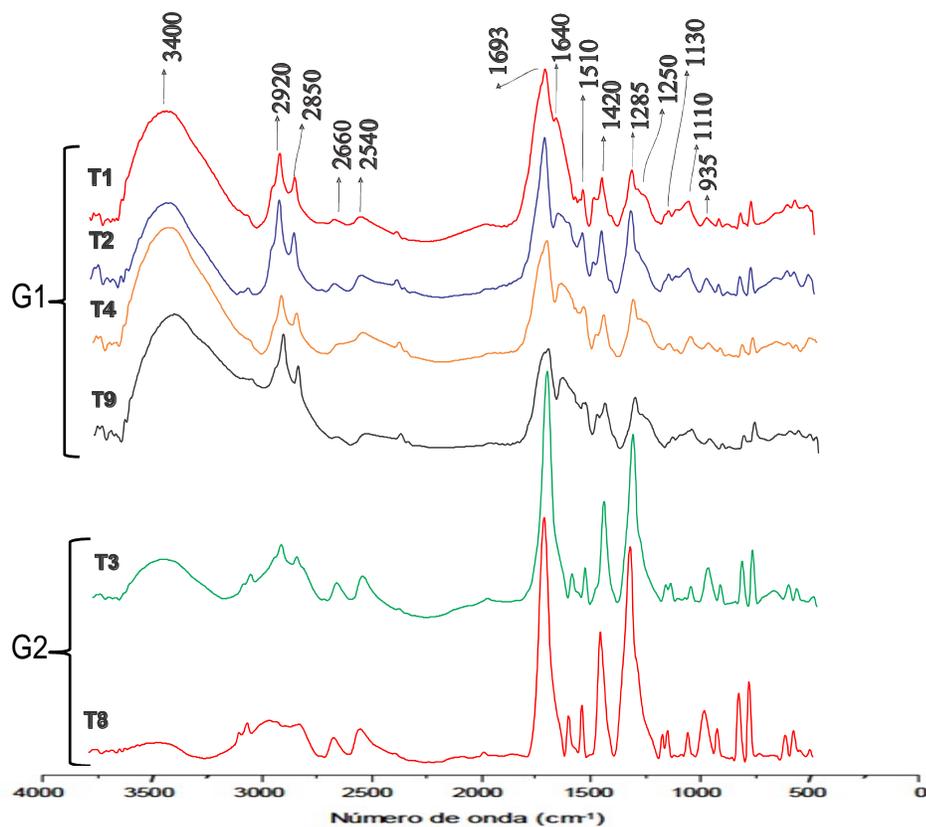
No G2, diferentemente do G1, os picos na região de 3.400 $\text{cm}^{-1}$  foram menos intensos, o que pode ter ocorrido por uma presença menos relevante de AH nos tratamentos que compõem este grupo (T3 e T8) (Tabela 3), já que esta região espectral indica a associação do AH com minerais do solo.

Observou-se no G1, bandas de absorção bem definidas na faixa espectral de 2.920 e 2.850 $\text{cm}^{-1}$  referentes aos grupos metil ( $\text{CH}_2$ ) e metileno ( $\text{CH}_3$ ) sendo atribuídas ao estiramento C-H alifático (DICK et al. 2003). No G2, estas bandas não foram verificadas com a mesma intensidade. Neste mesmo grupo, verificou-se bandas de absorção em 2.660 e 2.540 $\text{cm}^{-1}$ , o que segundo Dias et al. (2009) podem ser atribuídas ao estiramento axial de OH de grupo carboxílico.

Na região de 1.700 $\text{cm}^{-1}$  foram observadas, tanto no G1 como no G2, bandas de absorção em 1.693 $\text{cm}^{-1}$ . Miranda et al. (2007) verificaram bandas de absorção na região de 1.700 $\text{cm}^{-1}$  em AH extraídos de um Argissolo sob cultivos abandonados de eucalipto com 14, 16 e 18 anos, e atribuíram as bandas à absorção de carbonilas de cetonas. Entretanto, diferentemente do G2, o G1 apresentou uma banda de absorção em 1.640 $\text{cm}^{-1}$ , a qual se refere à vibração C=C aromática, com contribuição de C=O de  $\text{-COO}^-$  (Dick et al., 2008).

Schiavo et al. (2007), avaliaram a camada de 0,00 a 0,10m de um solo construído após a extração de argila e vegetado com Braquiária e Acácia por quatro anos e verificaram, no solo com Braquiária, uma banda de absorção do AH em 1.643 $\text{cm}^{-1}$ , atribuindo a banda à presença do íon carboxilato e à presença de duplas ligações

conjugadas. Ainda neste mesmo experimento foi verificado para ambas as coberturas vegetais, banda de absorção variando de  $1.550$  a  $1.507\text{cm}^{-1}$ , o que segundo os autores ocorreu devido à presença de amidas. De forma similar, tanto no G1 como no G2, observou-se a presença de uma banda em  $1.510\text{cm}^{-1}$ .



**Figura 6.** Espectros de FTIR da fração ácido húmico da MOS na camada de 0,00 a 0,03m, de um solo construído após a mineração de carvão. Candiota/RS. Grupo 1 (G1) = Hemária (T1), Pensacola (T2), Braquiária (T4) e Solo natural (T9). Grupo 2 (G2) = Tífton (T3) e Solo construído descoberto (T8).

A região de  $1.420$  a  $910\text{ cm}^{-1}$ , conhecida como impressão digital dos AH, corresponde à faixa de absorção dos grupamentos funcionais pouco afetados pelo restante da molécula, sendo, portanto, uma região característica de cada espectro de AH (MIRANDA et al., 2007).

De acordo com Dick et al. (2008) a banda observada em G1 e G2 na região entre  $1.420\text{cm}^{-1}$  e  $1.285\text{cm}^{-1}$  é atribuída à ligação C-H alifático. Observando-se os espectros de FTIR (Figura 6), nota-se que os picos do G2 nestas bandas são mais acentuados em relação ao G1.

O G1 apresentou uma banda em  $1.250\text{cm}^{-1}$ , o que de acordo com Benites et al. (2001), deve-se a uma maior concentração de grupos carboxílicos, o que sugere um AH mais reativo. Dobbss et al. (2009) avaliaram o AH da camada superficial de sete Latossolos de diferentes Estados do Brasil (RJ, RS, MG e DF) e observaram a presença de uma banda de absorção bem definida centrada em  $1.249\text{cm}^{-1}$ , a qual foi atribuída a presença de deformação de O-H em grupos carboxílicos e ligações éster (C-O) e ainda a presença de fenóis.

Em ambos os grupos foram observadas pequenas bandas em  $1.130$  e  $1.110\text{cm}^{-1}$ , as quais podem ser atribuídas à presença de polissacarídeos nos AH (SCHIAVO et al., 2007; DOBBSS et al., 2009). A banda de absorção em  $935\text{cm}^{-1}$  foi mais evidente no G2 e corresponde a formação de CH aromático (MIRANDA et al., 2007).

### **3.4 Conclusões**

A) As coberturas vegetais promoveram uma recuperação parcial do estoque de carbono orgânico total e das frações húmicas (HU, AH e AF) em relação ao solo construído descoberto. Entretanto, os seis anos de cultivo foram insuficientes para aproximar estes estoques dos valores do solo natural.

B) O ácido húmico foi a única fração sensível em detectar as alterações na matéria orgânica decorrentes das espécies utilizadas para vegetação. A Hemártria e a Braquiária proporcionaram maiores aumentos de AH no solo, elevando o grau de humificação da matéria orgânica.

C) A análise de infravermelho permitiu identificar diferenças na estrutura dos ácidos húmicos. O ácido húmico do solo sob Braquiária, Hemártria e Pensacola foi semelhante ao do solo natural, com caráter mais alifático e reativo. Por outro lado, o ácido húmico do solo sob Tífton apresentou caráter mais aromático assemelhando-se ao do solo construído descoberto.

D) A Hemártria e a Braquiária mostraram-se com maior potencial para recuperação da matéria orgânica do solo construído.

- 4 ESTUDO 2.** Frações físicas e grau de humificação da matéria orgânica de um solo construído e vegetado há seis anos após a mineração de carvão.

#### 4.1 Introdução

O carvão mineral é conhecido por ser o principal combustível para geração de energia no planeta. Cerca de 40% da geração de energia elétrica no mundo é feita com carvão e, segundo a Agência internacional de Energia, em 2030, será de 44%. Nos Estados Unidos metade de toda a eletricidade gerada provém do carvão e na China, estes valores chegam a dois terços (SANTUCCI, 2009). No Brasil as principais reservas de carvão mineral encontram-se nos estados do Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina, com 28,8 e 3,36 bilhões de toneladas, representando respectivamente 89 e 10,5% dos estoques do país (32,6 bilhões de toneladas).

No RS, somente a região de Candiota possui praticamente a metade das reservas de carvão do Estado (12,28 bilhões de toneladas), tornando-se um importante pólo para geração de energia. Neste município o carvão é explorado a céu aberto, em tiras (*strip mining*), pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM) (SANTUCCI, 2009). Após a mineração os solos são construídos, utilizando-se os rejeitos de mineração e os horizontes superficiais do solo inicialmente decapados quando do início do processo de extração mineral.

A recuperação dos solos construídos, exigida pela Constituição Federal de 1988, requer a vegetação da área. Entre os inúmeros benefícios da vegetação, como a melhoria da infiltração de água e agregação do solo, ressaltam-se a proteção contra os processos erosivos e a incorporação de matéria orgânica, já que esta é um dos principais indicadores da qualidade do solo (CORRÊA, 2009). Em sua maioria, estudos que avaliam o manejo de solos evidenciam que o carbono orgânico total (COT) é menos sensível às alterações no manejo do que as suas frações (LEITE et al., 2003). O fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS) tem demonstrado grande potencial em estudos qualitativos da MOS associados à caracterização espectroscópica (BAYER et al., 2000). As frações físicas em comparação às químicas, identificam-se melhor com a localização e função do material orgânico no solo, permitindo a obtenção de informações referentes ao grau de proteção física e coloidal da MOS (DIECKOW, 2003).

As frações físicas podem ser obtidas com base em dois procedimentos distintos, separação das partículas por tamanho (fracionamento granulométrico) e separação por

densidade (fracionamento densimétrico). No fracionamento granulométrico são obtidas duas frações. A fração tamanho areia ( $> 0,053\text{mm}$ ), que também é denominada carbono associado à fração grosseira do solo (CFG) ou carbono orgânico particulado (COP), é composta por resíduos vegetais e animais em estágio inicial de decomposição e, em geral, se encontra em menor proporção, sendo considerada a fração mais lábil da MOS. A fração denominada carbono associado aos minerais (CAM) ( $< 0,053\text{mm}$ ), corresponde à moléculas orgânicas que apresentam interação com os minerais da fração silte e argila e, geralmente, se encontram num estágio mais avançado de decomposição e em maior proporção no solo (CHRISTENSEN, 2001). Estas duas frações podem compor um Índice de Manejo de Carbono (IMC), o qual é eficiente para prever a qualidade de sistemas de manejo do solo (BLAIR et al., 1995). Quanto maior o valor do IMC, maior a qualidade do manejo (ROSA, 2010).

O fracionamento densimétrico separa a MOS em dois compartimentos principais, a fração leve (FL) e a fração pesada (FP), baseando-se nas densidades específicas das frações orgânicas. A FL, com densidade menor que  $1,7 \text{ kg dm}^{-3}$ , consiste de um compartimento com grau de decomposição intermediário entre os resíduos vegetais e a matéria orgânica estabilizada e humificada. Esta fração pode ser dividida em FL-livre (FLL) e FL-oclusa (FLO), correspondendo à FL que ocorre entre agregados e dentro dos agregados, respectivamente (RANGEL et al., 2007). A FP constitui-se numa fração orgânica em estágio mais avançado de decomposição, em associação com os minerais do solo. Nesta fração, em adição aos mecanismos de recalcitrância e de oclusão, a estabilidade química atua como mecanismo de estabilização (CHRISTENSEN, 1992; SOLLINS et al., 1996).

Todas estas frações vêm sendo estudadas buscando-se um indicador de qualidade do solo sensível às práticas de manejo agrícola. Loss et al. (2009), comparando sistemas de uso do solo, concluíram que o CFG foi mais sensível às alterações no manejo do solo quando comparado ao COT. Da mesma forma, Portugal et al. (2008), avaliando diferentes coberturas vegetais (mata, seringal, citros e pastagem), observaram que a FL da MOS foi mais sensível do que o COT em detectar as alterações na matéria orgânica decorrentes do manejo.

Além das técnicas de fracionamento, as análises espectroscópicas são ferramentas úteis para identificar o grau de humificação da MOS. Simplicidade, sensibilidade e rapidez são vantagens do uso da técnica de Fluorescência Induzida a Laser (FIL), além de não ter impedimento analítico em relação à presença de  $\text{Fe}^{3+}$  no solo, como as técnicas de ressonância paramagnética eletrônica (EPR<sup>6</sup>) e de

ressonância magnética nuclear (RMN), podendo, assim, ser usada para determinar o grau de humificação do solo inteiro (FAVORETTO et al., 2008). Com base na área sobre a curva de fluorescência e nos teores de COT do solo, é possível calcular o índice de humificação (HFIL) da MOS (MILORI et al., 2005). Em estudo comparativo do HFIL da superfície de um solo sob plantio direto (PD), plantio convencional e preparo mínimo, Favoretto et al. (2008) concluíram que o menor grau de humificação ocorreu no sistema PD, devido as diferentes intensidades de mobilização do solo e maior aporte de matéria orgânica fresca.

Tratando-se da recuperação de áreas degradadas e do manejo de solos construídos após a mineração de carvão, estudos avaliando a qualidade destes solos utilizando as frações físicas da MOS, bem como, utilizando a técnica de FIL para determinação HFIL ainda são incipientes.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi quantificar os estoques de COT e de carbono nas frações físicas da MOS, assim como avaliar a qualidade da matéria orgânica de um solo construído após a mineração de carvão vegetado desde 2003, no município de Candiota/RS.

## **4.2 Material e métodos**

### **4.2.1 Caracterização da área experimental**

A área experimental, com altitude de 230m e coordenadas 31° 33' 55,5"S e 53° 43' 30,6"W, localiza-se na região da Campanha do RS, na área de mineração de carvão da CRM, localizada no município de Candiota/RS. Este município situa-se a 400 km da capital do Estado, Porto Alegre e a 140 km de Pelotas.

O clima da região é classificado como sendo do tipo Cfa (subtropical úmido) de acordo com a classificação de Wilhelm Köppen. O experimento encontra-se sobre uma área construída após a mineração de carvão, sendo o solo caracterizado pela mistura de horizontes, com predomínio de horizonte B e pertencente à classe textural argilosa (Tabela 1). Considerando a camada de 0,00 a 0,05m, o solo natural, da frente de mineração, foi classificado como Argissolo Vermelho Eutrófico típico (Embrapa, 2006) e pertence à classe textural franca.

O experimento foi instalado em novembro/dezembro de 2003, em um delineamento experimental de casualização por blocos, com quatro repetições, sendo cada uma delas representada por uma parcela de 20 m<sup>2</sup> (4m x 5m). Os tratamentos foram compostos por diferentes espécies de coberturas vegetais, solteiras e consorciadas: Hemátria (*Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf & C. E. Hubbard), Grama

Tifton (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) + Amendoim forrageiro (*Arachis pintoï*); Hemártria + Amendoim forrageiro; Pensacola (*Paspalum notatum* Flüggé); Grama Tifton; Pensacola + Amendoim forrageiro e Braquiária Brizantha (*Brachiaria brizantha* (Hochst.) Stapf).

Considerando que o amendoim forrageiro não se estabeleceu, conforme consta no Relatório Técnico do Projeto CRM (2007) foram avaliados apenas os tratamentos com os cultivos solteiros, e procedeu-se a denominação dos tratamentos da seguinte forma: Hemártria (T1), Pensacola (T2), Grama Tifton (T3) e Braquiária Brizantha (T4). Para fins comparativos foram coletadas, em áreas adjacentes ao experimento, quatro amostras do mesmo solo construído sem cobertura vegetal (T8) e amostras de um solo natural com vegetação nativa (arbustos e herbáceas) da frente de mineração (T9).

**Tabela 1.** Granulometria e densidade do solo (Ds) da camada de 0,00 a 0,05 m de um solo construído em área de mineração de carvão, cultivado com diferentes plantas de cobertura.

Tratamentos	Argila	Areia	Silte	Classe textural	Ds**
	-----g kg <sup>-1</sup> -----				Mg m <sup>-3</sup>
T1 - Hemártria	463,7	298,1	238,3	Argilosa	1,36
T2 - Pensacola	474,2	291,9	233,9	Argilosa	1,46
T3 - Tifton	469,7	283,8	246,8	Argilosa	1,43
T4 - Braquiária	452,6	289,7	257,7	Argilosa	1,41
T8 - Solo descoberto	456,7	311,7	231,5	Argilosa	1,46
T9 - Solo natural	227,2	483,6	289,1	Franca	1,47
CV (%)	23*	24*	9*		4,18*

\*Valores referentes aos tratamentos 1, 2, 3 e 4. \*\* Dados de MIOLA (2010).

Por ocasião da instalação do experimento, o solo foi escarificado a uma profundidade entre 0,10 e 0,15m. Foi realizada uma calagem com aplicação correspondente a 10,4ton ha<sup>-1</sup> de calcário com PRNT de 100% e uma adubação correspondente a 900kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 5-20-20 (N-P-K). Além disto, foram realizadas adubações nitrogenadas utilizando sulfato de amônio na dose de 40kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio em todos os períodos correspondentes à estação da primavera (outubro/novembro) e capinas manuais com enxada, sempre que surgissem plantas invasoras na área.

Em setembro de 2009, foram coletadas, com pá de corte, amostras minimamente deformadas, preservando-se os agregados, na camada de 0,00 a 0,03m para os fracionamentos físicos (densimétrico e granulométrico) da MOS as quais foram secas ao ar e passadas em peneiras de 9,52mm e de 2mm (TFSA) respectivamente. As amostras indeformadas de solo foram coletadas utilizando-se anéis volumétricos de 3cm de altura e 4,85cm de diâmetro, na camada de 0,00 a 0,05m para a obtenção da densidade do solo (Ds).

#### 4.2.2 Fracionamento físico da MOS

Para o fracionamento físico granulométrico da MOS (Apêndice B), usou-se 20g de terra fina seca ao ar (TFSA) e 60mL de hexametáfosfato de sódio ( $5,0\text{g L}^{-1}$ ) (CAMBARDELLA e ELLIOT, 1992). O carbono (C) do material retido na peneira de malha igual a 0,053mm corresponde ao CFG, enquanto que CAM foi obtido pela diferença entre o COT e o CFG. Os teores de COT, CFG e nitrogênio total (NT) foram determinados em analisador elementar TruSpec CHN. Calculou-se os estoques de COT, NT e das frações CFG e CAM, com base nos teores de C e NT e na Ds (Tabela 1).

Com esses dados calculou-se a distribuição das frações CFG e CAM como percentual do estoque de COT. O Índice de Manejo de Carbono (IMC), adaptado de Blair et al. (1995) e descrito por Diekow (2003), foi calculado para cada sistema utilizando-se o CFG como a porção lábil da MOS e a CAM como porção não lábil. De acordo com Campos (2006) o sistema referência para o cálculo do IMC pode ser o solo em estado natural ou uma área degradada. Como referência utilizou-se o solo construído sem cobertura vegetal (T8), já que o solo natural (T9) não representa as condições da área experimental, servindo somente como comparativo.

$$\text{IMC} = \text{IEC} \times \text{IL} \times 100$$

Onde:

Índice de Estoque de Carbono (IEC) = C total do tratamento / C total do solo referência (T8);

Labilidade (L) = C lábil / C não lábil;

Índice de Labilidade (IL) = L tratamento / L do solo referência (T8).

O fracionamento físico densimétrico da MOS foi realizado conforme descrito em Conceição et al. (2008) (Apêndice C) e constitui de agitação manual leve do tubo de centrífuga contendo 10g de solo pesadas proporcionalmente entre agregados maiores e menores que 2,0mm e 80mL de solução de politungstato de sódio (PTS), com densidade de  $2,00\text{g cm}^{-3}$ . Após a centrifugação (2000g por uma hora), o sobrenadante contendo a fração leve livre (FLL), foi filtrado em filtro de fibra de vidro, o qual havia sido previamente pesado. A solução de PTS foi recolocada sobre o material que restou no tubo que foi submetido à dispersão por sonicação. A energia adequada para a máxima dispersão dos agregados do solo foi previamente determinada (exemplo no Apêndice D) para as três situações do experimento, solo construído com cobertura vegetal (T1, T2,

T3, T4), solo construído descoberto (T8) e solo natural (T9), obtendo-se os valores de 430, 360 e 576J mL<sup>-1</sup>, respectivamente.

Após a dispersão, o material foi centrifugado e filtrado novamente para obtenção da fração leve oclusa (FLO). A fração restante no tubo de centrífuga correspondeu à fração pesada (FP). As FLL e FLO foram secas em estufa a 50° C, moídas em gral e analisadas quanto ao teor de C (analisador elementar TruSpec CHN). O carbono da FP foi obtido por diferença entre o COT e as frações leves, de acordo com a fórmula: FP = [(COT-(FLL+FLO)]. A magnitude dos mecanismos de proteção da MOS foi estimada pela participação relativa do estoque de C de cada fração em relação ao estoque de COT.

Os resultados de teores e estoques de COT, NT e das frações físicas granulométricas (CFG, CAM) e densimétricas (FLL, FLO e FP) da MOS, referentes aos tratamentos T1, T2, T3 e T4, foram submetidos à análise de variância e ao teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade para comparação de médias dos tratamentos. O tratamento T8 não foi incluído na análise estatística, pois não faz parte do delineamento experimental. O solo natural não foi incluído na análise estatística, pois suas condições não representam a realidade do solo da área experimental (solo construído).

#### **4.2.3 Análises espectroscópicas**

A análise de FIL foi realizada em um sistema portátil de FIL, nas dependências da Embrapa Instrumentação Agropecuária em São Carlos/SP. Para a realização das medidas de FIL, amostras de solo inteiro passado em peneira de malha 9,52mm, foram moídas em gral e colocadas em um porta amostra com janela de quartzo. Realizaram-se quatro medidas por amostra, sendo obtidos quatro espectros de FIL por amostra. O cálculo do HFIL baseia-se na razão entre o valor da área sob o espectro de emissão de fluorescência (ACF), compreendida entre 475 e 660nm e o valor da concentração de COT presente na amostra (MILORI et al., 2006).

#### **4.3 Resultados e discussão**

Os teores de COT do solo sob as coberturas vegetais variaram de 10,95g kg<sup>-1</sup> (T3) a 15g kg<sup>-1</sup> (T1), porém não diferiram entre si (Tabela 2). Apesar da semelhança nos teores de COT do solo vegetado, nota-se que o mesmo encontra-se em processo de recuperação, observando-se o teor de COT do solo construído descoberto (T8) (7,18g kg<sup>-1</sup>). Em média, as coberturas vegetais elevaram os teores de COT em 45% em relação

ao T8. Todavia, após seis anos de experimento, o teor de COT do solo vegetado representou, em média, somente 55% do teor de COT do solo natural (T9), evidenciando a degradação que a mineração de carvão provoca e o lento processo de recuperação da qualidade do solo construído é lento.

Não houve diferença quanto aos teores de NT entre os tratamentos avaliados, seguindo a mesma tendência do COT, o que pode ser explicado pelo fato de as quatro espécies utilizadas para vegetação serem gramíneas e terem recebido a mesma adubação. Assim como para os teores de COT, os teores de NT do solo sob as coberturas vegetais foram intermediários, maiores que o solo descoberto (T8) e menores que o solo natural (T9) (Tabela 2).

**Tabela 2.** Teores de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), carbono da fração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais (CAM), carbono da fração leve livre (FLL), carbono da fração leve oclusa (FLO) e carbono da fração pesada (FP), da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão. Média de quatro repetições.

Tratamentos	COT	NT	CFG	CAM	FLL	FLO	FP
	----- g kg <sup>-1</sup> -----						
T1 - Hemária	15,00 a	0,743 a	6,65 a	8,35 a	3,09 a	2,77 a	9,15 a
T2 - Pensacola	12,25 a	0,768 a	4,86 a	7,39 a	2,04 b	1,46 b	8,75 a
T3 - Tifton	10,95 a	0,745 a	4,12 a	6,83 a	1,97 b	2,44 a	6,54 a
T4 - Braquiária	13,58 a	0,810 a	5,98 a	7,60 a	3,21 a	2,16 ab	8,20 a
T8 - Solo descoberto	7,18	0,587	1,99	5,19	0,75	0,17	6,25
T9 - Solo natural	29,10	1,217	10,20	18,90	6,33	4,45	18,32

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, ao nível de 5%.

Os teores de carbono na fração granulométrica CFG variaram de 4,12g kg<sup>-1</sup> a 6,65g kg<sup>-1</sup>, não havendo diferença significativa. Entretanto nota-se que estes valores são maiores do que o apresentado pelo T8 (1,99g kg<sup>-1</sup>) (Tabela 2). O mesmo ocorreu para a fração CAM, onde os teores variaram de 6,83g kg<sup>-1</sup> (T3) a 8,35g kg<sup>-1</sup> (T1), superando o do T8 (5,19g kg<sup>-1</sup>). Isto indica que apesar de o CAM ser uma fração mais estável da MOS, ela foi afetada, mesmo que de forma igual, pelas plantas de cobertura. Os teores de CFG e CAM do solo natural são 47% e 60% superiores, respectivamente, quando comparado às médias do solo vegetado. Segundo Conceição et al. (2005) a fração CFG é mais sensível em detectar as diferenças na composição da MOS do que a fração CAM e o COT. De acordo com Dieckow (2003), o CFG é um importante indicador da qualidade do sistema de manejo do solo em curto prazo, de três a quatro anos.

Entretanto, neste estudo, até o presente momento, após seis anos de experimento, o CFG não foi eficiente em detectar diferenças ocasionadas pelas coberturas vegetais.

Quanto ao teor de carbono na FLL, a Hemártria e a Braquiária foram as coberturas que proporcionaram maiores teores, com 3,09 e 3,21g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Além disso, estes valores, juntamente com o das demais coberturas foram bem superiores ao apresentado pelo T8 (0,75g kg<sup>-1</sup>). Entretanto, o teor de carbono na FLL do solo natural foi, 2,5 vezes maior do que a média do solo vegetado. Assim como a FLL, a FLO também foi eficiente em indicar diferenças nos teores de carbono nos compartimentos da MOS, em virtude das espécies vegetais utilizadas para vegetação do solo construído. A Hemártria e o Tifton apresentaram os maiores teores, diferenciando-se da Pensacola. Já a Braquiária apresentou valor intermediário, não diferindo dos demais tratamentos. Estes dados indicam que a matéria orgânica do solo construído encontra-se mais protegida no interior dos agregados no solo cultivado com Hemártria e Tifton, não diferindo da Braquiária, o que do ponto de vista da recuperação da área degradada é importante para elevação dos estoques de COT do solo e para a melhoria da qualidade do mesmo.

Os tratamentos não se diferenciaram quanto ao teor de carbono na FP e apresentaram-se, em média, 23% maiores que o solo descoberto e 55% inferiores ao solo natural.

Os estoques de COT não diferiram entre os tratamentos (Tabela 3), o que pode ter ocorrido pelo fato de todas as espécies avaliadas serem gramíneas e devido à pouca sensibilidade do COT em detectar as diferenças ocasionadas pelas coberturas vegetais. Uma vez que, o solo vegetado apresentou estoques de COT maiores que o T8 e menores que o T9, pode-se dizer que o estoque de COT deste solo foi recuperado em 43%. Anderson et al. (2008) avaliando um solo natural e um solo construído após mineração de carvão e vegetado por 11 anos com gramíneas, verificaram que o solo natural, vegetado com arbustos (*Artemisia tridentata*, *Artemisia cana* e *Ericameria nauseos*) e gramíneas apresentava um estoque de carbono 59% superior ao solo vegetado.

Não houve diferença entre tratamentos quanto ao estoque de NT, o que pode ter ocorrido pelo fato de todas as espécies serem gramíneas e terem recebido a mesma adubação, com provável semelhante acúmulo ou extração de nitrogênio. Como as condições de clima e solo são as mesmas, as transformações do nitrogênio em termos de ganhos e perdas provavelmente foram semelhantes. Entretanto, os tratamentos apresentaram estoque de NT intermediário, 23% maiores que T8 e 37% menores que

T9, indicando que após seis anos houve uma melhora neste parâmetro, causada pela vegetação estabelecida no local.

**Tabela 3.** Estoques de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), carbono da fração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais, carbono da fração leve livre (FLL), carbono da fração leve oclusa (FLL) e carbono da fração pesada (FP) da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão. Média de quatro repetições.

Tratamentos	COT	NT	CFG	CAM	FLL	FLO	FP
	----- Mg ha <sup>-1</sup> -----						
T1 - Hemártria	5,92 a	0,293 a	2,61 a	3,31 a	1,22 a	1,09 a	3,61 a
T2 - Pensacola	5,10 a	0,320 a	2,02 a	3,09 a	0,86 b	0,61 b	3,64 a
T3 - Tifton	4,60 a	0,313 a	1,73 a	2,87 a	0,83 b	1,02 a	2,75 a
T4 - Braquiária	5,37 a	0,320 a	2,36 a	3,01 a	1,27 a	0,86 ab	3,25 a
T8 - Solo descoberto	2,93	0,239	0,82	2,11	0,31	0,69	1,88
T9 - Solo natural	12,20	0,51	4,27	7,92	2,65	1,87	5,50

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, ao nível de 5%.

A relação C/N dos tratamentos T1, T2, T3, T4, T8 e T9, foram 20, 16, 15, 17, 12 e 24, respectivamente. Menor relação C/N da camada superficial de um solo construído após mineração de carvão, vegetado por cinco anos, em relação a um solo natural adjacente também foi verificado por Ganjegunte et al. (2009). A maior relação C/N do T9 se deve provavelmente à presença de arbustos na área, adicionando material orgânico de mais difícil decomposição sobre o solo.

O estoque de carbono na fração CFG variou de 1,73Mg ha<sup>-1</sup> a 2,61Mg ha<sup>-1</sup> e o estoque de CAM variou de 2,87Mg ha<sup>-1</sup> a 3,31Mg ha<sup>-1</sup> (Tabela 3). Entretanto, assim como os estoques de COT e NT, as frações granulométricas CFG e CAM não foram sensíveis em detectar os efeitos das diferentes coberturas vegetais sobre o solo construído. Bayer et al. (2004), em um experimento de seis anos, com quatro sistemas de rotação de culturas em plantio direto e um sistema em plantio convencional observaram, na camada de 0,00 a 0,025m, diferenças significativas nos estoques das frações CFG e CAM, entre os sistemas em plantio direto, assim como entre sistemas em plantio direto comparados ao plantio convencional. Estas diferenças foram justificadas pela inclusão de espécies leguminosas nos sistemas, diminuindo a relação C/N do material vegetal, facilitando assim a sua decomposição e pela manutenção dos resíduos na superfície do solo sob plantio direto, protegendo os agregados dos repetidos ciclos de umedecimento e secagem e do impacto das gotas da chuva, contribuindo para a estabilização e para a manutenção do carbono no interior dos agregados.

Apesar da não diferença entre os tratamentos avaliados quanto aos estoques de CFG e CAM, os mesmos apresentaram-se, em média, 62% e 31% maiores do que os estoques do solo descoberto (T8), respectivamente (Tabela 3). O CFG é derivado de resíduos de plantas e hifas que ainda apresentam estruturas celulares reconhecíveis. Como não foram utilizadas coberturas vegetais no T8 e como o estoque de CAM depende da quantidade de material orgânico que é transferido do CFG, justificam-se os menores estoques de CFG e CAM neste tratamento, o que também foi observado por Dieckow (2003) em um solo descoberto.

O solo natural apresentou os maiores valores para os estoques de CFG e CAM em relação aos demais tratamentos, justificado pela constante adição de resíduos de plantas na superfície deste solo ao longo dos anos e pela não perturbação do mesmo pelos processos de mineração de carvão e construção do solo, favorecendo o aumento do estoque de CFG e conseqüentemente o estoque de CAM. Rosa (2010) avaliou os estoques de CFG e CAM de um Planossolo na camada de 0,00 a 0,025m de um solo natural e de solos sob sistemas de cultivo de arroz (convencional e arroz-pousio), e observou que o solo sob vegetação natural apresentou estoques 76% e 63% superiores de CFG e CAM, respectivamente, em relação aos solos cultivados.

Diferentemente do fracionamento granulométrico, o fracionamento densimétrico detectou diferenças nos compartimentos da MOS em decorrência das espécies vegetais utilizadas para vegetação do solo construído (Tabela 3). Os maiores estoques de carbono na FLL ocorreram nos tratamentos T1 e T4. Segundo Miola (2010) a Hemátria é uma planta que se desenvolve bem em solos com pH 5,5-6,5, tolera períodos de seca, geadas e frio de até -10°C, possui alta velocidade de crescimento e alto potencial de adição de biomassa, por períodos maiores que outras gramíneas. A Braquiária Brizantha é uma planta de crescimento rápido, adaptada a solos de textura argilosa, prefere pH entre 5,0 e 7,5, tem média tolerância à seca e é adaptada a condições de menor fertilidade. Portanto, estas plantas adaptam-se melhor às condições encontradas no solo construído da área experimental. Por outro lado, o Tífton e a Pensacola apresentam características como maior exigência em fertilidade e crescimento lento, respectivamente, isso faz com que a Hemátria e a Braquiária tenham maior potencial de aporte de biomassa e, conseqüentemente, resultando num maior estoque de carbono na FLL. Em estudo realizado por Santos (2006), neste mesmo experimento, verificou-se que a Hemátria (T1) apresentou uma produção de massa seca 48% superior à produção do Tífton (T3), o que justifica o comportamento da FLL.

Segundo Golchin et al. (1997), a FLL é formada principalmente por restos vegetais e contém quantidades razoáveis de subprodutos microbianos e da microfauna, assim como hifas fúngicas, esporos esqueletos, fragmentos de raízes e sementes. Pulrolnick et al. (2009), comparando o aporte de resíduos orgânicos de solos sob plantio de eucalipto, pastagem e Cerrado com vegetação natural constataram que o aporte de resíduos pelo eucalipto foi 46% e 64% superior ao de Cerrado e ao de pastagem, respectivamente, o que, segundo os autores, refletiu em um maior estoque de carbono na FLL na camada superficial do solo.

Os maiores estoques de carbono na FLO foram apresentados pelos tratamentos Hemártria e Tifton. Já a Pensacola apresentou o menor estoque. A Braquiária apresentou um estoque intermediário aos demais tratamentos, não diferindo dos mesmos (Tabela 3). Gonçalves (2008) avaliou neste mesmo experimento, o diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados na camada de 0,00 a 0,05m do solo. Analisando os resultados obtidos  $T1 = 1,46\text{mm}$ ,  $T3 = 1,27\text{mm}$ ;  $T4 = 1,25\text{mm}$  e  $T2 = 1,15\text{mm}$  nota-se que os valores de DMP, decresceram na mesma sequência observada no presente trabalho para os valores de estoques da FLO,  $T1 > T3 > T4 > T2$ . Segundo este autor o maior valor do DMP no T1 (Hemártria) se explica pela maior incorporação de carbono orgânico e pela maior cobertura da superfície do solo. Conseqüentemente, o maior estoque de carbono na FLO encontrado na Hemártria (T1) poderia ser explicado pelo seu maior potencial de agregação do solo, assim como o menor estoque de carbono na FLO encontrado na Pensacola pode ser devido ao seu menor potencial de agregação do solo em comparação aos demais tratamentos.

Conceição (2006) obteve uma alta correlação ( $r = 0,95$ ) entre o carbono da FLO e o DMP da camada de 0,00 a 0,05m de um Argissolo Vermelho submetido a cinco sistemas de cultivo diferentes. Segundo este autor, isto reforça a idéia da possível influência de plantas na agregação do solo e conseqüentemente na oclusão do carbono, servindo o material orgânico de núcleo formador dos agregados e os produtos de sua decomposição estabilizando os mesmos, o que diminui o acesso de microorganismos e suas enzimas aos compostos orgânicos.

Os estoques de carbono na FP da MOS variaram de  $2,75\text{Mg ha}^{-1}$  a  $3,64\text{Mg ha}^{-1}$ , não diferindo entre os tratamentos (Tabela 3). Esta fração é constituída de materiais orgânicos em elevado estágio de decomposição, os quais formam complexos ou associações com as partículas minerais do solo, em especial com as argilas e caracteriza-se por ser a fração densimétrica mais estável, apresentando baixa taxa de ciclagem, pois na sua estabilização estão envolvidos os três mecanismos de proteção

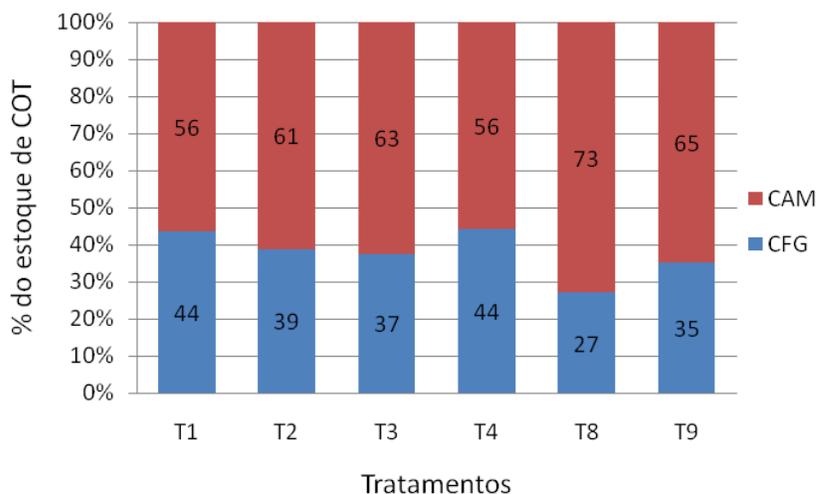
(recalcitrância química, oclusão e interação com minerais) (CHRISTENSEN, 2000, 2001). Devido à estabilidade da FP, as coberturas vegetais avaliadas não foram capazes de alterá-la de forma distinta e significativa.

Tanto nas frações FLL, FLO como na FP, o solo descoberto foi o que apresentou os menores valores de estoques de carbono, ao contrário do solo natural que apresentou os maiores valores (Tabela 3). Essas diferenças podem ser explicadas pelo fato de o solo natural receber constante aporte de resíduos orgânicos e por sofrer ao longo de muitos anos o processo de agregação, favorecendo o acúmulo de carbono nestas frações. Como o solo descoberto não recebeu resíduos vegetais em superfície, o seu estoque de carbono na FLL foi menor, o que conseqüentemente prejudicou os estoques de carbono na FLO e na FP.

Para uma melhor avaliação da magnitude dos mecanismos de estabilização da MOS, calculou-se a proporção dos estoques de carbono das frações granulométricas e densimétricas, em relação ao estoque de COT, conforme consta nas figuras 1 e 2, respectivamente. O estoque de CFG em relação ao COT variou de 27% a 44% (Figura 1). Apesar de se tratar de um solo construído, onde o horizonte superficial original foi modificado pelo processo de mineração, os resultados obtidos para CFG estão dentro do esperado para solos de regiões de clima temperado, de 25 a 50% (CAMBARDELLA e ELLIOT 1992; SHANG e TIESSSEN, 1997).

O CFG é um importante compartimento por ser fonte de energia para a biota do solo e por atuar como fonte de nutrientes às plantas, principalmente o nitrogênio (GREGORICH e JANSEN, 1996). Devido à sua área superficial específica reduzida e baixa densidade superficial de carga, a fração tamanho areia ( $> 0,053\text{mm}$ ) apresenta pouco ou nenhum material orgânico ligado a ela, tendo por isso, menor participação na manutenção da matéria orgânica no solo (BALDOCK et al., 1992; CHRISTENSEN, 1992).

O estoque da fração CAM representou a maior parte do COT, de 56% a 73% (Figura 1). Esta fração contém material mais humificado, sendo constituinte fundamental da MOS (CHRISTENSEN, 1996; FELLER & BEARE, 1997). Conceição et al. (2005), também observaram uma menor representatividade do CFG (12 a 23%) em relação ao CAM (88 a 77%) na camada de 0,00 a 0,05m de um Argissolo Vermelho sob vegetação nativa e submetido a dois sistemas de rotação de culturas em plantio convencional e em plantio direto.

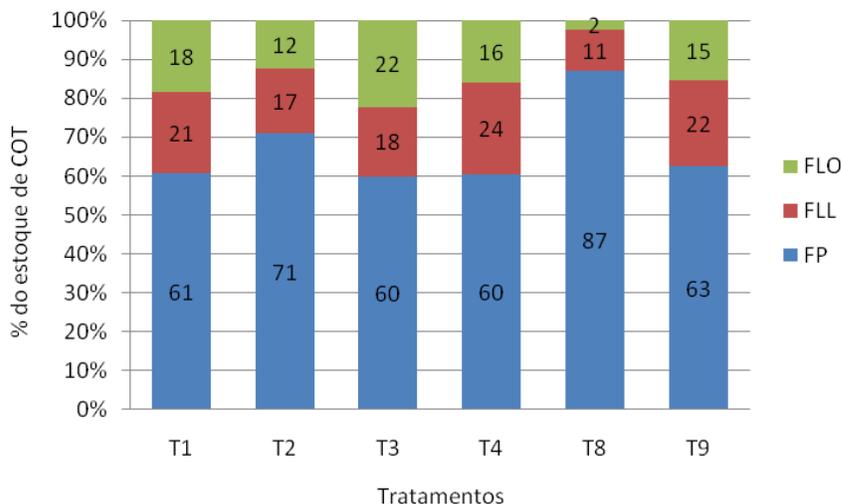


**Figura 1.** Proporção do estoque de carbono associado aos minerais (CAM) e de carbono da fração grosseira (CFG) em relação ao estoque de carbono orgânico total (COT). Hemártria (T1), Pensacola (T2), Tífton (T3), Braquiária (T4), Solo construído descoberto (T8) e Solo natural (T9).

De forma geral, quanto às frações densimétricas, a representatividade das mesmas em relação ao estoque de COT decresceu na seqüência FP>FLL>FLO, com valores médios de 67, 19 e 14% respectivamente (Figura 2). Estes dados diferem dos encontrados por Conceição (2006) e Rosa (2010) na camada superficial de um Argissolo Vermelho e de um Planossolo Háplico, respectivamente, onde a proporção das frações da MOS decresceu na seqüência FP>FLO>FLL. Estes autores avaliaram solos submetidos a diferentes sistemas de cultivo, plantio direto, convencional e solo natural e justificaram seus resultados pelos mecanismos de proteção atuantes em cada fração. Na FLL somente a recalcitrância química é responsável pela estabilidade da MOS, enquanto na FLO a proteção física, ou oclusão da matéria orgânica no interior dos agregados do solo também contribui para a manutenção da MOS. Já na FP, os três mecanismos de estabilização atuam conjuntamente (NASCIMENTO et al., 2009). Por esse motivo a FP, seguida da FLO, possuem um tempo maior de ciclagem do que a FLL.

A menor representatividade da FLO em relação à FLL neste experimento, de forma geral, pode ser explicada pela degradação física do solo que ocorre no processo de sua remoção para extração do carvão e pela posterior construção do solo, onde há o rompimento de agregados expondo a MOS à decomposição, fazendo com que uma

menor parcela da MOS seja encontrada no interior de agregados. No solo natural, a menor representatividade da FLO em relação à FLL pode ter ocorrido pela constante adição de resíduos em superfície e pelo fato de o solo natural apresentar 48% de areia na camada de 0,00 a 0,05m (Tabela 1), fazendo com que o processo de agregação e, conseqüente oclusão da MOS seja pouco eficiente nesta camada.



**Figura 2.** Proporção do estoque de carbono da fração leve livre (FLL), carbono da fração leve oclusa (FLO) e carbono da fração pesada (FP) em relação ao estoque de carbono orgânico total (COT). Hemártria (T1), Pensacola (T2), Tifton (T3), Braquiária (T4), Solo construído descoberto (T8) e Solo natural (T9).

Em função da distribuição do estoque de carbono nas frações granulométricas da MOS, considerado o CFG o compartimento lábil e o CAM a fração não lábil, calculou-se o índice de estoque de carbono (IEC), a labilidade do carbono (L), o índice de labilidade (IL) e o índice de manejo do carbono (IMC) para cada tratamento, considerando a camada de 0,00 a 0,03m (Tabela 4). O IMC é um indicador de qualidade do manejo e permite avaliar o processo de ganho ou perda de qualidade do solo, ou seja, quanto maior o IMC, maior a sua qualidade e vice versa.

Todas as coberturas vegetais aumentaram o IL, o IEC, o IMC e a L do carbono, em comparação ao tratamento referência (T8) (Tabela 3), mostrando a capacidade das espécies em melhorar a qualidade do solo.

Entre as coberturas vegetais avaliadas, as que proporcionaram maiores IMCs, foram a Hemártria e a Braquiária (Tabela 4), provavelmente devido à maior adaptação destas espécies ao solo construído, que permitiram uma maior produção de biomassa e

consequentemente uma maior quantidade de carbono na fração lábil da MOS, elevando os índices IEC, L, IL e IMC.

Dieckow et al. (2003), avaliando um Argissolo submetido a diferentes sistemas de cultura e adubação nitrogenada em plantio direto, tendo como referência o campo nativo, observaram que no sistema com maior aporte de resíduos o IMC foi maior (256), enquanto que no solo descoberto o IMC foi o mais baixo (56).

**Tabela 4.** Índice de estoque de carbono (IEC), labilidade do Carbono (L), índice de labilidade (IL) e índice de manejo do carbono (IMC) da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão. Solo descoberto (T8) utilizado como referência.

Tratamento	IEC	L	IL	IMC
T1 - Hemátria	2,02	0,81	2,19	427
T2 - Pensacola	1,74	0,64	1,74	299
T3 - Tifton	1,57	0,61	1,65	249
T4 - Braquiária	1,83	0,80	2,15	373
T8 - Solo descoberto	1,00	0,48	1,00	100
T9 - Solo natural	3,76	0,55	1,44	578

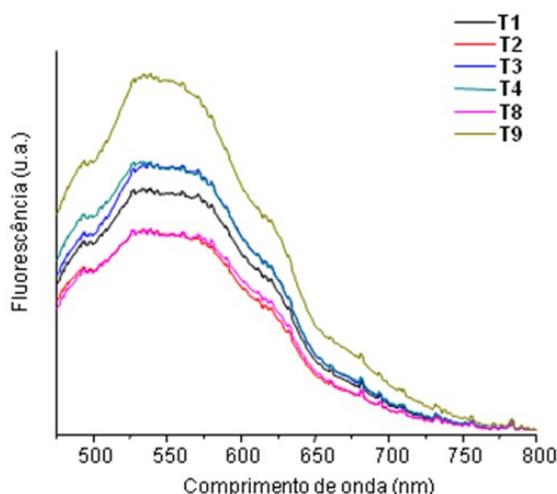
Apesar de as coberturas vegetais terem elevado o IMC em até quatro vezes em relação ao do solo descoberto (referência), os seis anos de cultivo não foram suficientes para que fosse alcançado o IMC do solo natural (Tabela 4). Portugal et al. (2008) avaliaram o IMC de solos sob diferentes cultivos e verificaram que o mesmo apresentou maior IMC (100) do que os solos sob pastagem (54), seringal (69) e citrus (70), mostrando que o cultivo destas espécies causou uma perturbação e conseqüente perda da qualidade do solo, verificada através do menor IMC.

A Hemátria e a Braquiária, apesar de não terem alcançado o IMC do solo natural, aumentaram em 4,27 e 3,73 vezes o IMC, respectivamente, em relação ao solo descoberto, mostrando maior potencial para preservação e recuperação do carbono e seus compartimentos no solo, em relação à Pensacola e ao Tifton.

Na Figura 3, pode-se observar os espectros de FIL da MOS. A origem da fluorescência do solo é a matéria orgânica, principalmente nos grupos funcionais ricos em ligações insaturadas que estão presentes na matéria orgânica mais humificada. Portanto, ao iluminar as amostras com luz ultravioleta próximo ou no azul, excitam-se preferencialmente as estruturas mais recalcitrantes, ou seja, cuja concentração aumenta no processo de humificação (ABREU Jr. et al., 2009), sendo principalmente grupos funcionais ricos em ligações insaturadas, tais como OH fenólicos livres e ligados,

estruturas de quinona, grupos carboxílicos ligados e anéis aromáticos que estão presentes na matéria orgânica mais humificada (MILORI et al., 2006).

As áreas sob as curvas de fluorescência, normalizadas pelos teores de carbono, fornecem o HFIL que pode ser diretamente relacionado com o grau de humificação da MOS. O HFIL da MOS decresceu na sequência T8>T3>T4>T1>T2>T9 (Tabela 5), indicando que o solo construído e mantido com coberturas vegetais apresentou valores intermediários, menores que o solo descoberto e maiores que o solo natural. Isto pode ter ocorrido devido aos processos de degradação e construção, causando uma diminuição da proteção física da MOS, acelerando assim a sua decomposição. Ao mesmo tempo, estes valores intermediários indicam que as coberturas vegetais estão promovendo a recuperação do solo construído, através da adição de biomassa.



**Figura 3.** Emissão de fluorescência da matéria orgânica de um solo construído após a mineração de carvão. Hemária (T1), Pensacola (T2), Tifton (T3), Braquiária (T4), Solo construído descoberto (T8) e Solo natural (T9).

Rosa (2010) avaliando a camada de 0,00 a 0,25m de um Planossolo Háplico cultivado com arroz em sistema convencional e sob plantio direto após 18 anos, verificou um menor HFIL do solo em plantio direto em relação ao solo em plantio convencional, o que foi justificado pela manutenção e maior aporte de resíduos sobre o solo no plantio direto, o que juntamente com o não revolvimento do solo, promoveu uma degradação mais lenta da matéria orgânica, resultando em um menor HFIL.

Estes resultados corroboram com os apresentados por Milori et al. (2005) que analisando amostras de solo por FIL sob diferentes sistemas de manejo encontraram

menor humificação da matéria orgânica nos solos sob plantio direto em comparação ao plantio convencional, evidenciando que o revolvimento do solo quebra os agregados e expõe a matéria orgânica à maior decomposição, sendo assim, a matéria orgânica que permanece no solo é aquela em associação com os minerais, mais humificada e estabilizada. Isto pode ter ocorrido no solo construído, por ocasião dos processos de mineração e construção do solo, onde a matéria orgânica presente é aquela com maior resistência à decomposição, remanescente do solo natural, como pode ser verificado pela representatividade de 73% do CAM (Figura 1) e 87% da FP (Figura 2), proporções estas, superiores às dos demais tratamentos.

**Tabela 5.** Área sob a curva de fluorescência (ACF) ponderada pelos teores de carbono orgânico total (COT) como índice do grau de humificação (HFIL) da matéria orgânica de um solo construído após a mineração de carvão.

Tratamentos	COT (g kg <sup>-1</sup> )	ACF	HFIL
T1 - Hemária	15,00	76793	5120
T2 - Pensacola	12,25	63436	5075
T3 - Tifton	10,95	83372	7579
T4 - Braquiária	13,58	85322	6274
T8 - Solo descoberto	7,2	64118	8905
T9 - Solo natural	29,1	111897	3845

#### 4. Conclusões

- A) Após seis anos, as coberturas vegetais elevaram os estoques de nitrogênio total, de carbono orgânico total e de carbono nas frações físicas da matéria orgânica na camada superficial do solo construído.
- B) As frações leve livre e leve oclusa foram as únicas eficientes em detectar as alterações na matéria orgânica do solo ocasionadas pela vegetação.
- C) A qualidade da matéria orgânica do solo construído vegetado foi intermediária entre o solo construído descoberto e o solo natural, sugerindo sua recuperação parcial.
- D) Os estoques de carbono nas frações leve livre e leve oclusa e o índice de manejo de carbono do solo construído e vegetado com Hemária e com Braquiária Brizantha indicam maior potencial destas espécies para recuperação da área degradada pela mineração de carvão em Candiota/RS.

### **ESTUDO 3.** Fracionamento físico e qualidade da matéria orgânica de um solo construído e vegetado após mineração de carvão.

#### **5.1 Introdução**

No município de Candiota no Rio Grande do Sul (RS) está localizada a maior jazida de carvão mineral do país, com reservas de um bilhão de toneladas passíveis de serem mineradas a céu aberto. Nesta cidade o carvão é explorado pela Companhia Riograndense de Mineração (CRM), atendendo a Usina Termelétrica Presidente Médici. Com o aumento da capacidade instalada da usina, prevista para 2011, a quantidade de carvão necessária para abastecer a usina passará de dois para cinco milhões de toneladas anuais (CRM, 2010), aumentando as extensões de áreas degradadas.

Após a exploração mineral, há a necessidade de recuperar a área degradada, atendendo à exigência da legislação ambiental brasileira. Sendo assim, é feita a recomposição topográfica da área, utilizando-se materiais litológicos e solo natural sobrejacentes às camadas de carvão, dando origem aos chamados solos construídos. Estes solos caracterizam-se por apresentar alto grau de degradação, com densidade do solo elevada, estrutura inadequada, baixa fertilidade e baixo teor de matéria orgânica (MOS), dificultando o processo de recuperação da qualidade do solo (QUIÑONES, 2004).

A MOS afeta os atributos químicos, físicos e biológicos e por isso, é um dos principais indicadores da qualidade do solo. Em solos construídos, a vegetação é essencial para iniciar o processo de recuperação, protegendo o solo da erosão e incorporando material orgânico (NICOLINI & TOPP, 2005). Com o intuito de detectar indicadores de qualidade do solo mais sensíveis do que o teor total de carbono orgânico, tem-se realizado o fracionamento da MOS. De acordo com Bayer et al. (2004), o carbono pode acumular em frações lábeis ou estáveis da matéria orgânica no solo, o que pode ter implicações na durabilidade do seu efeito quanto à retenção de carbono atmosférico, bem como nas alterações das propriedades dos solos.

Através das frações físicas é possível avaliar a eficiência dos sistemas de manejo em aportar matéria orgânica lábil ao solo, a qual irá abastecer o seu compartimento estável (associado aos minerais) (SALTON et al., 2005). Esta avaliação pode ser feita através do Índice de Manejo de Carbono (IMC) (DIECKOW, 2003).

As frações físicas podem ser obtidas com base em dois princípios, diferença de tamanho de partículas (fracionamento granulométrico) e diferença de densidade de partículas (fracionamento densimétrico). Com estes fracionamentos separam-se as

frações mais lábeis das mais recalcitrantes, o que permite inferir sobre os mecanismos de proteção da MOS.

Além das frações físicas e do IMC, as técnicas espectroscópicas podem ser utilizadas para avaliar a humificação da MOS. Geralmente estas técnicas exigem a extração e fracionamento da matéria orgânica. Entretanto, no sentido de se viabilizar a análise da MOS num estado mais próximo possível do natural, tem-se utilizado a espectroscopia de Fluorescência Induzida a Laser (FIL) (ABREU et al., 2009). Com base no teor de carbono orgânico total (COT) do solo e na área sob a curva de fluorescência do mesmo, é possível calcular o índice de humificação (HFIL), o qual indica o grau de humificação da MOS (MILORI et al., 2004). Entretanto, estes métodos quantitativos e qualitativos, têm sido pouco utilizados para avaliar a matéria orgânica de solos construídos após a mineração de carvão, sendo empregadas mais comumente em estudos de matéria orgânica de solos sob cultivo agrícola e silvicultura (ZSCHORNACK, 2007; LIMA et al., 2008).

Dieckow et al. (2005) utilizaram a espectroscopia de FIL para avaliar solos sob plantio direto (PD) e convencional (PC) e observaram que o solo sob PD apresentou maior concentração de COT e menor HFIL em relação ao solo sob PC, o qual apresentou uma MOS de natureza menos lábil. Em experimento semelhante, Campos (2006) utilizou o IMC para comparar a qualidade de manejo de solos sob PD e PC e observou que o PD aumentou este índice, indicando uma melhoria na qualidade de manejo do solo.

O fracionamento físico da MOS associado com análises espectroscópicas pode contribuir para a melhor compreensão da dinâmica da matéria orgânica (COSTA et al., 2004), que é essencial para a recuperação da qualidade de solos construídos.

Sabendo-se que a mineração de carvão gera áreas degradadas, e que o estudo quantitativo e qualitativo da MOS dos solos construídos permite a adoção de estratégias de manejo para acelerar o processo de recuperação destas áreas, este trabalho objetivou quantificar os estoques de COT e de carbono nas frações físicas granulométricas e densimétricas, bem como avaliar o grau de humificação da matéria orgânica de um solo construído após a mineração de carvão e vegetado desde 2007, no município de Candiota/RS.

## 5.2 Material e métodos

### 5.2.1 Caracterização da área experimental

A área experimental, com altitude de 230m e coordenadas 31° 33' 55,5"S e 53° 43' 30,6"W, localiza-se na região da Campanha do RS, na área de mineração de carvão da Companhia Riograndense de Mineração (CRM), localizada no município de Candiota/RS. Este município situa-se a 400 km da capital do Estado, Porto Alegre e a 140 km de Pelotas.

O clima da região é classificado como sendo do tipo Cfa (subtropical úmido) de acordo com a classificação de Wilhelm Köppen. O experimento encontra-se sobre uma área construída após a mineração de carvão, sendo o solo caracterizado pela mistura de horizontes, com predomínio de horizonte B e pertencente à classe textural argilosa. Considerando a camada de 0,00 a 0,05m, o solo natural, da frente de mineração, foi classificado como Argissolo Vermelho Eutrófico típico (Embrapa, 2006) e pertence à classe textural franca (Tabela 1).

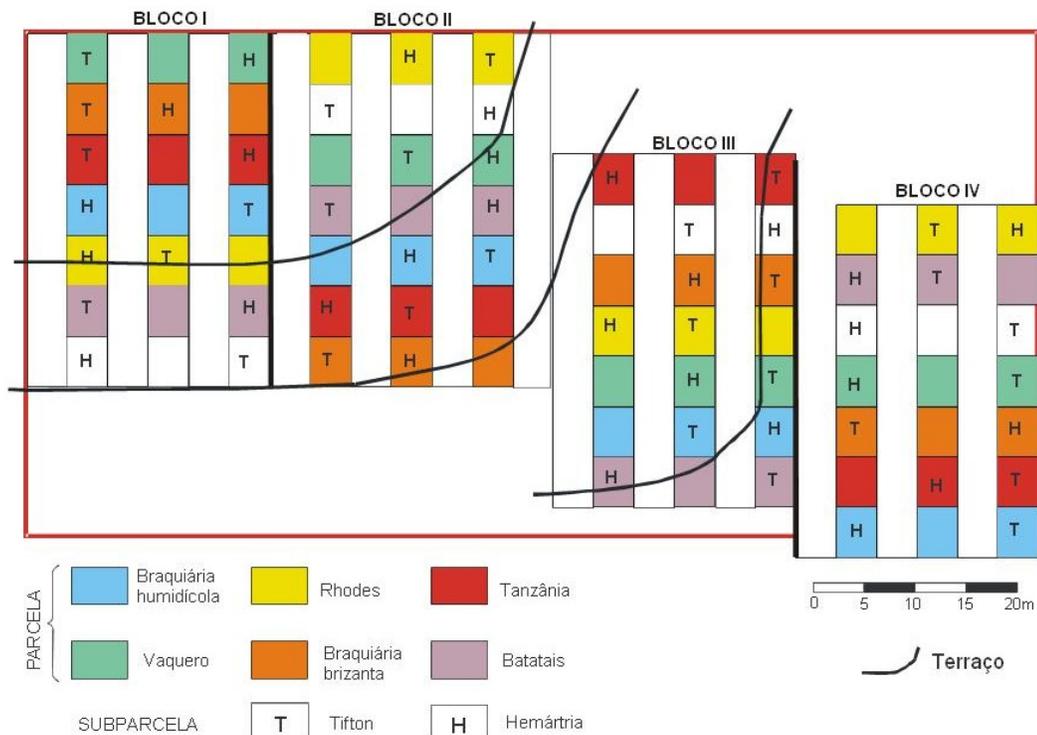
**Tabela 1.** Granulometria e densidade do solo (Ds) da camada superficial (0,00 a 0,05 m) de um solo construído em área de mineração de carvão, cultivado com diferentes plantas de cobertura.

Tratamentos	Argila	Areia	Silte	Classe textural	Ds Mg m <sup>-3</sup>
	-----g kg <sup>-1</sup> -----				
T1 - Vaqueiro	468,04	312,83	219,13	Argilosa	1,48
T2 – Braquiária Briz.	455,51	318,92	225,57	Argilosa	1,39
T3 – Tanzânia	475,37	307,00	217,63	Argilosa	1,43
T4 – Braquiária Hum.	479,55	313,33	207,11	Argilosa	1,41
T5 – Hemátria	463,88	314,33	221,79	Argilosa	1,42
T6 – Tifton	461,41	315,75	222,84	Argilosa	1,41
T8 – Solo descoberto	456,66	311,7	231,5	Argilosa	1,46
T9 – Solo natural	227,2	483,6	289,1	Franca	1,47
CV (%)	1,92*	1,26*	2,95*		2,10*

\*Valores referentes aos tratamentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

O experimento foi instalado em setembro/outubro de 2007, em um delineamento experimental de casualização por blocos, com quatro repetições, sendo cada uma delas representada por uma parcela de 20 m<sup>2</sup> (4m x 5m) e os tratamentos compostos pelas seguintes espécies de coberturas vegetais: T1 – Vaqueiro (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.); T2 – Braquiária (*Brachiaria brizantha* (Hochst.) Stapf); T3 – Tanzânia (*Panicum maximum* Jacq); T4 – Braquiária humidícola (*Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweickt); T5 – Hemátria (*Hemarthria altissima* (Poir.) Stapf & C. E. Hubbard) e T6 – Tifton (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.) (Figura 1).

Para fins comparativos foram coletadas amostras em uma área adjacente ao experimento de um solo construído sem cobertura vegetal (T8) e amostras de um solo natural (Argissolo) com vegetação nativa (T9).



**Figura 1.** Croqui do experimento conduzido em solo construído sob diferentes espécies de coberturas vegetais desde 2007.

Por ocasião da instalação do experimento, o solo foi escarificado a uma profundidade de aproximadamente 0,10 a 0,15m. Posterior à escarificação foi realizada uma calagem com aplicação correspondente a 10,4ton ha<sup>-1</sup> de calcário com PRNT de 100% e uma adubação correspondente a 900kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 5-20-20 (NPK). Além disto, foram realizadas em todos os períodos correspondentes à estação da primavera (outubro/novembro) adubações nitrogenadas utilizando sulfato de amônio na dose de 40kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio e capinas manuais com enxada, para a exclusão de plantas invasoras na área.

Em setembro de 2009, foram coletadas, com pá de corte, amostras minimamente deformadas visando preservar os agregados, na camada de 0,00 a 0,03m as quais foram secas ao ar e passadas em peneiras de 9,52mm e de 2mm (TFSA) para os fracionamentos densimétrico e granulométrico da MOS, respectivamente. As amostras indeformadas de solo foram coletadas utilizando-se anéis volumétricos de 3cm de altura

e 4,85cm de diâmetro, na camada de 0,00 a 0,05m para a obtenção da densidade do solo (Ds).

### 5.2.2 Fracionamento físico da MOS

Para o fracionamento físico granulométrico da MOS (Apêndice B), usou-se 20g de terra fina seca ao ar (TFSA) e 60mL de hexametáfosfato de sódio ( $5,0\text{g L}^{-1}$ ) (CAMBARDELLA e ELLIOT, 1992). O carbono (C) do material retido na peneira de malha igual a 0,053mm corresponde ao CFG, enquanto que CAM foi obtido pela diferença entre o COT e o CFG. Os teores de COT, CFG e nitrogênio total (NT) foram determinados em analisador elementar TruSpec CHN. Calculou-se os estoques de COT, NT e das frações CFG e CAM, com base nos teores de C e NT e na Ds (Tabela 1).

Com esses dados calculou-se a distribuição das frações CFG e CAM como percentual do estoque de COT. O Índice de Manejo de Carbono (IMC), adaptado de Blair et al. (1995) e descrito por Diekow (2003), foi calculado para cada sistema utilizando-se o CFG como a porção lábil da MOS e a CAM como porção não lábil. De acordo com Campos (2006) o sistema referência para o cálculo do IMC pode ser o solo em estado natural ou uma área degradada. Como referência utilizou-se o solo construído sem cobertura vegetal (T8), já que o solo natural (T9) não representa as condições da área experimental, servindo somente como comparativo.

$$\text{IMC} = \text{IEC} \times \text{IL} \times 100$$

Onde:

Índice de Estoque de Carbono (IEC) = C total do tratamento / C total do solo referência (T8);

Labilidade (L) = C lábil / C não lábil;

Índice de Labilidade (IL) = L tratamento / L do solo referência (T8).

O fracionamento físico densimétrico da MOS foi realizado conforme descrito em Conceição et al. (2008) (Apêndice C) e constitui de agitação manual leve do tubo de centrífuga contendo 10g de solo pesadas proporcionalmente entre agregados maiores e menores que 2,0mm e 80mL de solução de politungstato de sódio (PTS), com densidade de  $2,00\text{g cm}^{-3}$ . Após a centrifugação (2000g por uma hora), o sobrenadante contendo a fração leve livre (FLL), foi filtrado em filtro de fibra de vidro, o qual havia sido previamente pesado. A solução de PTS foi recolocada sobre o material que restou no tubo que foi submetido à dispersão por sonicação. A energia adequada para a máxima

dispersão dos agregados do solo foi previamente determinada (exemplo no Apêndice D) para as três situações do experimento, solo construído com cobertura vegetal (T1, T2, T3, T4, T5 e T6), solo construído descoberto (T8) e solo natural (T9), obtendo-se os valores de 430, 360 e 576J mL<sup>-1</sup>, respectivamente.

Após a dispersão, o material foi centrifugado e filtrado novamente para obtenção da fração leve oclusa (FLO). A fração restante no tubo de centrífuga correspondeu à fração pesada (FP). As FLL e FLO foram secas em estufa a 50° C, moídas em gral e analisadas quanto ao teor de C (analisador elementar TruSpec CHN). O carbono da FP foi obtido por diferença entre o COT e as frações leves, de acordo com a fórmula:  $FP = [(COT - (FLL + FLO))]$ . A magnitude dos mecanismos de proteção da MOS foi estimada pela participação relativa do estoque de C de cada fração em relação ao estoque de COT.

Os resultados de teores e estoques de COT, NT e das frações físicas granulométricas (CFG, CAM) e densimétricas (FLL, FLO e FP) da MOS, referentes aos tratamentos T1, T2, T3, T4, T5 e T6 foram submetidos à análise de variância e ao teste de Duncan ao nível de 5% de probabilidade para comparação de médias dos tratamentos. O tratamento T8 não foi incluído na análise estatística, pois não faz parte do delineamento experimental. O solo natural não foi incluído na análise estatística, pois suas condições não representam a realidade do solo da área experimental (solo construído).

### **5.2.3 Análises espectroscópicas**

As análises de FIL foram realizadas em um sistema portátil de FIL, nas dependências da Embrapa Instrumentação Agropecuária em São Carlos/SP. Para a realização das medidas de FIL, as amostras de solo inteiro passado em peneira de malha 9,52mm, foram colocadas em um porta amostra com janela de quartzo. Realizaram-se quatro medidas por amostra, sendo obtidos quatro espectros de FIL por amostra. Estes dados foram utilizados para o cálculo do HFIL. O cálculo deste índice baseia-se na razão entre o valor da área sob o espectro de emissão de fluorescência (ACF), compreendida entre 475 e 660nm, e o valor da concentração de COT presente na amostra (MILORI et al., 2006).

## **5.3 Resultados e discussão**

Os teores de COT variaram de 9,70g kg<sup>-1</sup> a 12,73g kg<sup>-1</sup>. Entretanto, esta diferença não foi significativa (Tabela 2). Em média, o solo construído com as coberturas

vegetais apresentou  $3,62\text{g kg}^{-1}$  a mais de COT em relação ao solo construído descoberto (T8). Apesar desta elevação, o solo natural apresentou  $18,3\text{g kg}^{-1}$  a mais de COT do que a média apresentada pelo solo vegetado. Considerando um teor inicial de COT de  $7,18$ , referente ao solo descoberto, pode-se dizer que as coberturas vegetais recuperaram em média,  $12\%$  do teor de COT do solo natural. As coberturas vegetais resultaram em diferentes teores de NT do solo, sendo o maior teor apresentado pelo T3 ( $0,843\text{g kg}^{-1}$ ) e o menor pelo T4 ( $0,588\text{g kg}^{-1}$ ). Os teores de NT apresentados pelo solo vegetado foram intermediários, maiores do que o T8 e menores que o T9, comportamento igual ao apresentado pelo COT.

Diferentemente do teor de COT, as coberturas vegetais influenciaram o teor de CFG. O T2 apresentou o maior teor de carbono nesta fração ( $5,46\text{g kg}^{-1}$ ), já os menores teores foram apresentados pelos tratamentos T1, T4, T5 e T6, com teores que variaram de  $2,44\text{g kg}^{-1}$  a  $3,42\text{g kg}^{-1}$ . O T3 apresentou teor de CFG intermediário, não diferindo dos demais (Tabela 2). Quanto aos teores de CAM, o maior teor foi apresentado pelo T3 ( $8,68\text{g kg}^{-1}$ ), e os menores teores foram apresentados pelos tratamentos T1, T2, e T6, com T4 e T5 não diferindo dos demais tratamentos (Tabela 2).

Por ser a fração granulométrica mais estável da MOS o CAM é menos sensível do que o CFG em detectar as alterações na matéria orgânica decorrentes do manejo do solo (CONCEIÇÃO et al., 2005), mas como pôde ser visto, o teor de CAM foi influenciado pelas coberturas vegetais avaliadas em apenas dois anos de cultivo, o que pode ter ocorrido pelo aporte de biomassa vegetal diferenciado entre as espécies vegetais, pois a passagem do CFG para o CAM é função da adição de resíduos vegetais ao solo. Portanto, o teor de CAM depende da quantidade de CFG que é transformada pelos microorganismos no solo, e da interação organo-mineral (ZANATTA, 2006). Sensibilidade do CAM em detectar alterações induzidas pelo manejo do solo foi observada por Bayer et al. (2002), Loss et al. (2009) e Portugal et al. (2008), avaliando Argissolos sob sistemas de cultivo agrícola em experimentos com nove, 12 e sete anos de duração, respectivamente.

Em ambas as frações granulométricas, CFG e CAM, o solo construído vegetado apresentou teores intermediários, maiores que o T8 e menores que T9. Assim como o CFG e o CAM, a FLL e a FLO foram eficientes em detectar as alterações nos teores de carbono dos compartimentos da MOS provocadas pelas espécies utilizadas para vegetação do solo construído. Quanto à FLL, o T2 apresentou o maior teor ( $2,33\text{g kg}^{-1}$ ) e o T5 apresentou o menor teor ( $0,90\text{g kg}^{-1}$ ).

O CFG e a FLL da MOS são compostos basicamente por resíduos vegetais pouco decompostos (AMADO et al., 2006; GREGORICH et al., 1994; 2006) sendo o único mecanismo de proteção a recalcitrância molecular (ROSCOE & MACHADO, 2002; ROSA, 2010). Na mesma área experimental do presente estudo, Stumpf et al. (2010) avaliaram a produção de biomassa de T1, T2, T3 e T4, obtendo os valores: 39kg ha<sup>-1</sup>, 238kg ha<sup>-1</sup>, 122kg ha<sup>-1</sup> e 103kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, ou seja, os maiores teores de CFG e carbono na FLL apresentados pelo T2, podem ter sido influenciados pelo maior aporte de biomassa vegetal da Braquiária Brizantha (T2) sobre o solo.

**Tabela 2.** Teores de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), carbono da fração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais, carbono da fração leve livre (FLL), carbono da fração leve oclusa (FLL) e carbono da fração pesada (FP) da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão. Média de quatro repetições.

Tratamentos	COT	NT	CFG	CAM	FLL	FLO	FP
T1 - Vaqueiro	10,10 a	0,645 bc	3,42 b	6,68 b	1,32 bc	1,23 b	7,55 a
T2 – Braquiária	12,15 a	0,753 ab	5,46 a	6,70 b	2,33 a	2,40 a	7,43 a
T3 – Tanzânia	12,73 a	0,843 a	4,04 ab	8,68 a	1,92 ab	1,92 ab	8,89 a
T4 – Braquiária hum.	9,70 a	0,588 c	2,44 b	7,27 ab	1,09 bc	0,89 b	7,72 a
T5 – Hemária	10,18 a	0,655 bc	2,98 b	7,20 ab	0,90 c	1,43 ab	7,85 a
T6 – Tifton	10,08 a	0,665 bc	3,38 b	6,70 b	1,27 bc	1,46 ab	7,35 a
T8 – Solo descoberto	7,18	0,587	1,99	5,19	0,75	0,17	6,25
T9 – Solo natural	29,10	1,217	10,20	18,90	6,33	4,45	18,32

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, ao nível de 5%.

O T2 também apresentou o maior teor de carbono na FLO, enquanto que o menor teor nesta fração foi apresentado por T1 e pelo T4. Além da produção de biomassa vegetal, Stumpf et al. (2010) também avaliaram, na camada de 0,00 a 0,05m, o diâmetro médio ponderado (DMP) nos tratamentos T1, T2, T3 e T4 e verificaram que o maior DMP foi apresentado pelo T2 (2,0mm), o que justifica o maior teor de carbono na FLO apresentado por este tratamento, o que está de acordo com a teoria de formação de agregados (BAVER et al., 1973), onde o DMP aumenta de acordo com o aumento de carbono orgânico.

Segundo Costa et al. (2004), o maior carbono orgânico determina maior estabilidade de agregados, e esta, por sua vez, maior proteção física da matéria orgânica, estabelecendo-se assim uma relação de causa e efeito entre a agregação e a MOS, onde o aumento da estabilidade de agregados do solo, é ao mesmo tempo, uma causa e uma consequência dos maiores teores de MOS. Portanto, o aumento do COT promove um aumento na agregação e conseqüentemente um aumento de carbono na FLO.

Conceição (2006) obteve uma alta correlação ( $r = 0,95$ ) avaliando o carbono presente na FLO e o DMP da camada de 0,00 a 0,05m de um Argissolo Vermelho submetido a cinco sistemas de cultivo diferentes, o que segundo este autor, reforça a idéia da possível influência de plantas na agregação do solo e consequentemente na oclusão do carbono, devido ao mecanismo de auto-proteção existente entre a MOS e os agregados, o que diminui o acesso de microorganismos e suas enzimas aos compostos orgânicos.

Os teores de carbono na FP variaram de  $7,35\text{g kg}^{-1}$  a  $8,89\text{g kg}^{-1}$ , mas ao contrário do ocorrido nas frações leves, as coberturas vegetais não proporcionaram teores diferenciados de carbono na FP (Tabela 2), o que pode ter ocorrido pela maior estabilidade desta fração em relação à FLL e à FLO.

Os estoques de COT foram iguais em todos os tratamentos, variando de  $4,09\text{Mg ha}^{-1}$  a  $5,44\text{Mg ha}^{-1}$  (Tabela 3). Apesar da igualdade entre os tratamentos, em média, eles elevaram o estoque de COT em 36% em relação ao T8, o que segundo Reeves (1997) promove o aumento na qualidade do solo. Entretanto, este incremento não foi suficiente para aproximá-lo do solo natural, o qual apresentou um estoque de COT 62% superior, em média, ao do solo vegetado. Anderson et al. (2008), avaliando um solo natural e um solo construído após a mineração de carvão e vegetado por 11 anos com gramíneas, verificaram que o solo natural, vegetado com arbustos (*Artemisia tridentata*, *Artemisia cana* e *Ericameria nauseos*) e gramíneas apresentava um estoque de carbono 59% superior ao solo vegetado.

**Tabela 3.** Estoques de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), carbono da fração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais (CAM), carbono da fração leve livre (FLL), carbono da fração leve oclusa (FLL), carbono da fração pesada (FP) na camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído e sob diferentes coberturas vegetais. Candiota-RS. Média de quatro repetições.

Tratamentos	COT	NT	CFG	CAM	FLL	FLO	FP
	-----Mg ha <sup>-1</sup> -----						
T1 - Vaqueiro	4,47 a	0,286 bc	1,52 b	2,95 a	0,58 bc	0,54 a	3,35 a
T2 - Braquiária	5,07 a	0,313 ab	2,27 a	2,80 a	0,96 a	1,00 a	3,12 a
T3 - Tanzânia	5,44 a	0,361 a	1,73 ab	3,71 a	0,82 ab	0,82 a	3,80 a
T4 - Braquiária hum.	4,09 a	0,248 c	1,02 b	3,07 a	0,46 c	0,37 a	3,26 a
T5 - Hemátria	4,32 a	0,279 bc	1,26 b	3,06 a	0,38 c	0,61 a	3,34 a
T6 - Tifton	4,26 a	0,282 bc	1,41 b	2,85 a	0,53 bc	0,62 a	3,10 a
T8 - Solo descoberto	2,93	0,239	0,82	2,11	0,31	0,69	1,88
T9 - Solo natural	12,20	0,51	4,27	7,92	2,65	1,87	5,50

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, ao nível de 5%.

Os estoques de NT foram afetados pelas coberturas vegetais, sendo o maior estoque apresentado pelo T3, o qual não diferiu do T2 (Tabela 3). Da mesma forma que o COT, os estoques de NT do solo vegetado foram maiores que T8 ( $0,239\text{Mg ha}^{-1}$ ) e menores que T9 ( $0,51\text{Mg ha}^{-1}$ ). Avaliando todos os tratamentos do experimento, foi obtida uma correlação linear positiva ( $r = 0,89$ ) entre os estoques de COT e NT. Portanto, apesar da igualdade nos estoques de COT, a superioridade de T3 em relação aos demais tratamentos quanto ao estoque de NT, pode ser explicado pelo maior estoque de COT neste tratamento (valores brutos). Da mesma forma, observa-se que o T4 apresentou tanto o menor estoque de COT (valor bruto) quanto o menor estoque de NT (Tabela 3). Conceição et al. (2005) avaliaram a camada de 0,00 a 0,05m de dois Argissolos Vermelhos submetidos a diferentes sistemas de cultivo agrícola e também verificaram correlação linear positiva entre o COT e o NT ( $r = 0,95$ ).

O estoque de CFG comportou-se da mesma forma que o teor de carbono nesta fração, sendo o maior estoque apresentado pelo T2, não diferindo do T3, o que pode ser atribuído a uma maior adição de biomassa vegetal ao solo por estas espécies. Bayer et al. (2004) avaliaram a camada de 0,00 a 0,025m de um Latossolo Vermelho sob sistemas de rotação de culturas em plantio direto (PD) e comparou a um cultivo em plantio convencional (PC), verificando que o aumento nos estoques de CFG devido ao PD variaram de 192% a 241% em relação ao PC, o que segundo o autor pode estar relacionado ao maior aporte de resíduos na superfície do solo sob PD.

Em relação ao solo descoberto, o aumento do estoque de CFG devido às coberturas vegetais variou de 19% (T4) a 64% (T2). Entretanto, o solo natural apresentou um estoque de CFG 64% superior à média do solo vegetado. Maior estoque de CFG na camada de 0,00 a 0,025m de um solo natural em relação a um solo descoberto e a um solo cultivado com gramíneas (Aveia/Milho) foi verificado por Dieckow (2003), o que de acordo com o autor, refletiu a adição de biomassa vegetal de cada tratamento.

Não houve diferença nos estoques de CAM nos tratamentos com as coberturas vegetais (Tabela 3) e em todos os tratamentos maiores estoques de carbono foram encontrados nesta fração em relação ao CFG. O CAM é considerado um compartimento altamente resistente à transformação ou ao ataque microbiano e normalmente, menos modificado pelo manejo adotado, principalmente a curto prazo (STEVENSON, 1994; FELLER & BEARE, 1997; BAYER et al., 2004). Esta fração interage com a superfície de partículas minerais, forma complexos organominerais e é protegida pelo mecanismo de proteção coloidal, o que diminui sua taxa de ciclagem (CHRISTENSEN, 1996). Estes

fatores fazem com que o CAM predomine em relação ao CFG. Maiores estoques de CAM em relação ao CFG foram observados por Neves et al. (2005) na camada de 0,00 a 0,10m de um Latossolo cultivado com culturas anuais (aveia/algodão), pomar de citrus e em floresta tropical nativa.

Assim como ocorreu com o estoque de CFG, os estoques de CAM do solo sob as coberturas vegetais avaliadas foram maiores do que o T8 e menores que T9 (Tabela 3). O comportamento do estoque de CAM no T8 pode ser explicado pela menor adição de biomassa e menor proteção do solo em relação aos demais tratamentos, expondo-o aos processos erosivos, rompendo agregados e acelerando a perda de matéria orgânica. A manutenção de matéria orgânica protegida nos agregados do solo natural aumenta o período de interação do material particulado com os argilominerais devido ao maior tempo de ciclagem da MOS nos macroagregados, permitindo que as reações de complexação entre estes ocorram mais efetivamente (SIX et al., 1998). Isto foi evidenciado pelo estoque de CAM  $4,85\text{Mg ha}^{-1}$  superior no solo natural em relação a média do estoque de CAM do solo vegetado.

Rosa (2010) ao avaliar a camada de 0,00 a 0,025m de um Planossolo Háplico sob campo natural e sob sistemas de cultivo de arroz e verificou que o campo natural apresentou um estoque de CAM  $6,7\text{Mg ha}^{-1}$  superior aos demais tratamentos. O autor justificou o ocorrido pelo maior tempo de interação da MOS com a fração mineral no campo natural em relação às áreas cultivadas.

Em relação ao estoques de carbono nas frações densimétricas da MOS, apenas a FLL foi um indicador sensível as alterações decorrentes da espécie utilizada para vegetação do solo. Estes resultados concordam com os de outros estudos (JANZEN et al., 1992; PINHEIRO et al., 2004; FARIA et al., 2008; LIMA et al., 2008), em que as frações mais lábeis da MOS, como a FLL, tem-se apresentado como indicador sensível as mudanças decorrentes das diferentes formas de uso do solo. Roscoe e Machado (2002) afirmam que o único mecanismo de proteção da FLL é a recalcitrância dos seus materiais constituintes, tornando-a mais disponível para a microbiota do solo, e conseqüentemente, mais sensível em detectar alterações na MOS, antes que os teores de carbono orgânico presentes em compartimentos mais estáveis da MOS, como a FLO e a FP sejam alterados de maneira significativa.

O T2 apresentou o maior estoque de carbono na FLL ( $0,96\text{Mg ha}^{-1}$ ), não diferindo de T3 ( $0,82\text{Mg ha}^{-1}$ ), o que provavelmente ocorreu pelo maior aporte de biomassa destas culturas em relação às demais. De acordo com Six et al. (2002), a FLL é fortemente influenciada pela quantidade e qualidade de resíduo depositado no solo.

Lima et al. (2008) avaliaram a camada de 0,00 a 0,05m de um Latossolo cultivado com pastagem e eucalipto e observaram que o solo sob eucalipto apresentou maior estoque de carbono na FLL em relação ao solo sob pastagem, em decorrência do maior aporte de resíduos orgânicos do eucalipto em superfície.

As coberturas vegetais elevaram o estoque de carbono na FLL em 50% em relação ao solo construído descoberto. A recuperação da FLL é importante, pois ela constitui um compartimento de rápida ciclagem, que pode favorecer a biota do solo e servir como fonte de nutrientes ao sistema (CHRISTENSEN, 2000; LIMA et al., 2008), desencadeando o processo de recuperação do solo construído. Entretanto, esta recuperação ocorre de forma lenta, devido à degradação dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, frequentemente encontrada em solos construídos. Esta dificuldade fica evidente quando se observa que o solo natural apresentou, em média, um estoque de carbono na FLL 77% superior ao apresentado pelo solo vegetado.

Os estoques de carbono na FLO variaram de 0,37Mg ha<sup>-1</sup> a 1,00Mg ha<sup>-1</sup> (Tabela 3), não havendo diferença entre os tratamentos. Isto pode ter ocorrido pelo curto período de experimento (dois anos), o qual pode ter sido insuficiente para a oclusão de carbono no interior dos agregados, de forma diferenciada em decorrência das espécies utilizadas. De acordo com Conceição et al. (2008) a estabilidade da FLO resulta da recalcitrância molecular e da proteção física decorrente da oclusão matéria orgânica no interior dos agregados do solo, fazendo com que esta fração seja menos sensível às alterações na MOS provocadas pelo manejo do solo, do que a FLL. Maior sensibilidade da FLL em relação à FLO em detectar modificações na MOS em virtude de diferentes manejos do solo foi verificada por Pinheiro et al. (2004) na camada de 0,00 a 0,05m de um Latossolo sem cobertura vegetal, coberto com gramíneas e submetido a diferentes sistemas de cultivo de oleráceas.

Diferentemente de todas as demais frações, sejam elas granulométricas ou densimétricas, a média do estoque de carbono na FLO do solo vegetado (0,66Mg ha<sup>-1</sup>) foi semelhante a do estoque apresentado pelo solo descoberto (0,69Mg ha<sup>-1</sup>). Além do fato de os processos de agregação do solo vegetado ainda serem incipientes, isto pode ter ocorrido devido à escarificação do solo quando da instalação do experimento (não realizada na área do solo construído descoberto), a qual pode ter ocasionado o rompimento de agregados e a mineralização do carbono presente no interior dos mesmos. Pinheiro et al. (2004) encontraram menor estoque de carbono na FLO na camada de 0,00 a 0,05m de um Latossolo em plantio convencional de oleráceas, quando comparado ao cultivo mínimo destas espécies, pois, de acordo com o autor, no

sistema plantio convencional a maior mobilização da área para o plantio favoreceu a ruptura dos agregados do solo contribuindo para uma maior mineralização do carbono da FLO.

O solo natural apresentou, em média,  $1,21\text{Mg ha}^{-1}$  a mais de carbono na FLO quando comparado ao solo vegetado. O estímulo dos processos de agregação devido ao maior tempo de interação da fração orgânica com a mineral à que o solo natural foi submetido explica os resultados obtidos.

A FP é caracterizada por ser a fração orgânica densimétrica em estágio mais avançado de decomposição, em estreita associação com a fração mineral, onde atua em adição aos mecanismos de recalcitrância e de oclusão, a estabilidade química (CHRISTENSEN, 1992; SOLLINS et al., 1996). Isto faz com que esta fração seja menos sensível do que as frações leves em detectar alterações na MOS, explicando a ausência de efeito das coberturas vegetais no estoque de carbono da FP (Tabela 3).

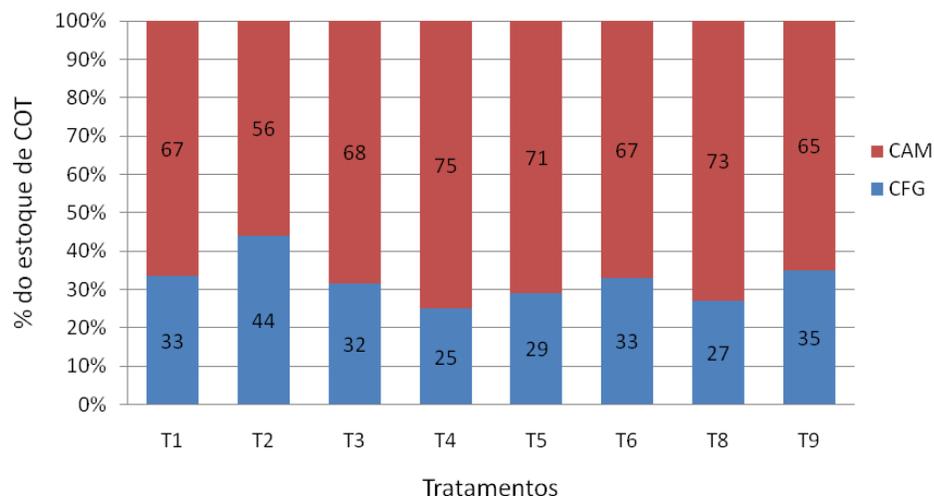
O solo natural apresentou um estoque de carbono na FP 1,7 vezes superior ao apresentado pelo solo vegetado, o que provavelmente ocorreu devido à estabilidade do sistema natural, onde não houveram perturbações como aquelas ocorridas quando da mineração de carvão e construção do solo. Rosa (2010) verificou menores estoques de carbono da FP da camada de 0,00 a 0,025m de um Planossolo cultivado com arroz em plantio direto e convencional quando comparado aos estoques de carbono na FP de um campo nativo. Justificado devido a não utilização agrícola do campo nativo, o que contribui para a manutenção do carbono nesta fração.

Uma melhor avaliação da magnitude dos mecanismos de estabilização da MOS, pode ser obtida a partir da distribuição dos estoques de carbono das frações granulométricas e densimétricas, em relação ao estoque de COT, conforme consta nas figuras 1 e 2, respectivamente.

Quanto às frações granulométricas, o CFG representou em média 32% do estoque de COT, o que está dentro do esperado para solos de áreas temperadas, de 25 a 50% (CAMBARDELLA e ELLIOT 1992; SHANG e TIESSEN, 1997). A maior parte, 68%, do COT encontra-se associado aos minerais do solo, devido à maior estabilidade desta fração (DIECKOW, 2003).

Costa et al. (2004) analisaram a camada de 0,00 a 0,05m de um Latossolo cultivado com espécies agrícolas por 21 anos em plantio direto e convencional e encontraram representatividade de 26% e 31% do CFG, respectivamente. Maior proporção de CFG foi encontrada por Santos et al. (2009) que avaliaram a camada de 0,00 a 0,025m de um Argissolo Vermelho sob floresta homogênea de eucalipto,

campo nativo e um sistema agrosilvipastoril, obtendo valores de 49,5%, 43,84% e 51,30% de CFG, respectivamente, refletindo o potencial de aporte de resíduos orgânicos na superfície do solo nos tratamentos avaliados.

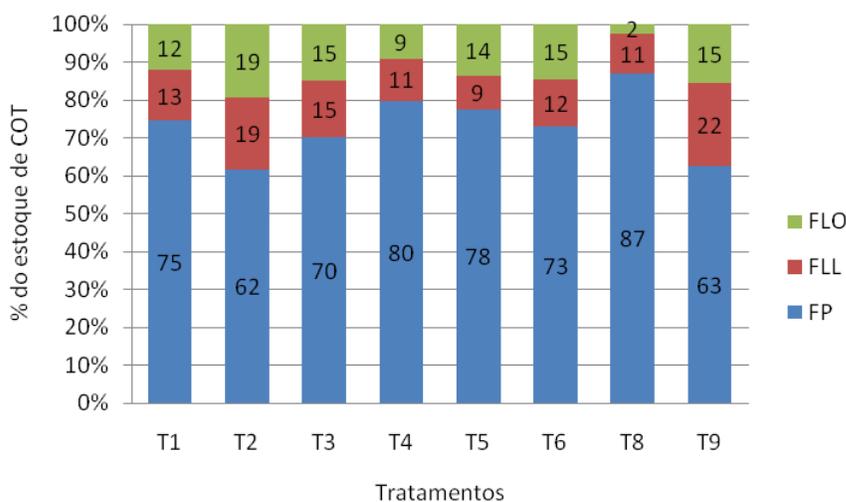


**Figura 2.** Proporção do estoque de carbono associado aos minerais (CAM) e de carbono da fração grosseira (CFG) em relação ao estoque de carbono orgânico total (COT). Vaqueiro (T1), Braquiária Brizantha (T2), Tanzânia (T3), Braquiária Humidícola (T4), Hemátria (T5), Tifton (T6), solo construído descoberto (T8) e solo natural (T9).

Em todos os tratamentos a fração densimétrica predominante foi a FP, com valores que variaram de 62% a 87% (Figura 3). Esta fração representa a matéria orgânica do solo em estágio avançado de decomposição, sendo mais estável e com maior tempo de residência no solo do que as frações leves, fazendo com que ela seja proporcionalmente mais representativa (CHRISTENSEN, 2001). Maior representatividade da FP em relação à FLL e à FLO também foi verificada por outros autores (SOUZA et al., 2006; CONCEIÇÃO et al., 2007; ZSCHORNACK, 2007; ROSA, 2010).

Nos tratamentos T1, T4 e T8, a representatividade das frações densimétricas decresceu na sequência FP>FLL>FLO (Figura 3), com valores médios de 80%, 12% e 8%, respectivamente, indicando que o mecanismo de proteção da matéria orgânica por oclusão foi menos representativo do que o mecanismo de recalcitrância molecular. Maior representatividade da FLL em relação à FLO foi verificada em outros estudos (ROSCOE et al., 2001; SOHI et al., 2001; FREIXO et al., 2002b; PINHEIRO et al., 2004). Entretanto, estes dados são incompatíveis com os mecanismos de

proteção atuantes nas duas frações, ou seja, a FLO deveria ser mais representativa do que a FLL, cuja estabilidade advém apenas da recalcitrância intrínseca da biomolécula à degradação microbiana (CONCEIÇÃO et al., 2008). Um conjunto de fatores como a ruptura dos agregados quando da construção do solo, o menor aporte de biomassa, o menor estímulo à agregação do solo e conseqüentemente a menor oclusão do carbono, pode explicar o comportamento destas duas frações nestes tratamentos. Nos tratamentos T2, T3 e T5, a FP também predominou e a representatividade da FLO foi igual ou superior a da FLL (Figura 3), indicando que estas espécies proporcionaram maior oclusão do carbono no interior de agregados em relação às demais espécies avaliadas, o que é fundamental para o processo de recuperação da área degradada.



**Figura 3.** Proporção do estoque de carbono da fração leve livre (FLL), carbono da fração leve oclusa (FLO) e carbono da fração pesada (FP) em relação ao estoque de carbono orgânico total (COT). Vaqueiro (T1), Braquiária Brizantha (T2), Tanzânia (T3), Braquiária Humidícola (T4), Hemátria (T5), Tifton (T6), solo construído descoberto (T8) e solo natural (T9).

A maior representatividade da FLL (22%) em relação à FLO (15%) no solo natural (Figura 3), provavelmente ocorreu por dois motivos. O aporte de resíduos orgânicos neste solo pela mata nativa incrementou o estoque de carbono na FLL e além disso, na camada de 0,00 a 0,05m, este solo apresenta 22,7% de argila e 48,6% de areia (Tabela 1). Em solos de textura arenosa, a presença de quartzo provoca uma maior distância entre as demais partículas do solo, o que acarreta em uma menor estabilidade estrutural quando comparados aos solos argilosos, já que a fração areia tem pequena capacidade de se manter quimicamente ligada a outras

partículas, pois sua CTC é menor que a do húmus. Portanto, a oclusão de carbono em agregados no solo natural foi dificultada devido à sua textura. Segundo Costa et al. (2004) solos argilosos proporcionam uma maior proteção física da MOS.

Em função da distribuição do carbono nas frações físicas granulométricas da MOS, sendo o CFG considerado o compartimento lábil e o CAM a fração não lábil, calculou-se o índice de estoque de carbono (IEC), a labilidade do carbono (L), o índice de labilidade (IL) e o índice de manejo do carbono (IMC) para cada tratamento, considerando a camada de 0,00 a 0,03m (Tabela 4). O IMC é um indicador de qualidade do manejo e permite avaliar o processo de ganho ou perda de qualidade do solo, ou seja, quanto maior o IMC, maior a sua qualidade e vice versa.

Todas as coberturas vegetais aumentaram o IL, o IEC, o IMC e a L do carbono, em relação ao tratamento referência (T8) (Tabela 3), com exceção do T4 que apresentou valores de L e IL menores que o T8 (Tabela 4). A baixa labilidade do carbono no T4, representando 25% do estoque de COT, pode explicar este comportamento. Entretanto, como o T4 apresentou um estoque de COT 28% superior ao do T8, isto resultou em um IMC de 120, ou seja, superior ao tratamento referência (Tabela 4).

Entre as coberturas vegetais, a Braquiária Brizantha (T2) e o capim Tanzânia (T3), apresentaram os IMCs mais elevados, 376 e 223, respectivamente. Observando-se os dados brutos da tabela 3, nota-se que estes dois tratamentos apresentaram os maiores estoques de COT e CFG, provavelmente devido à maior adição de biomassa ao solo, o que explica o maior IMC destes tratamentos.

**Tabela 4.** Índice de estoque de carbono (IEC), labilidade do Carbono (L), índice de labilidade (IL) e índice de manejo do carbono (IMC) da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão. Solo descoberto (T8) utilizado como referência.

Tratamento	IEC	L	IL	IMC
T1 - Vaqueiro	1,53	0,52	1,34	209
T2 – Braquiária	1,73	0,82	2,10	376
T3 – Tanzânia	1,86	0,46	1,19	223
T4 – Braquiária hum.	1,40	0,34	0,86	120
T5 – Hemária	1,47	0,41	1,06	156
T6 – Tifton	1,45	0,52	1,34	193
T8 – Solo descoberto	1	0,39	1	100
T9 – Solo natural	4,16	0,55	1,4	578

Dieckow et al. (2003) avaliaram um Argissolo submetido a diferentes sistemas de cultura e adubação nitrogenada em plantio direto, tendo como referência o campo nativo

e observaram que no sistema com maior aporte de resíduos o IMC foi maior (256), enquanto o IMC no solo descoberto foi o mais baixo (56).

Apesar de as coberturas vegetais terem elevado o IMC em relação ao T8, o solo natural foi o que apresentou o maior IMC (578), mostrando que apenas dois anos de cultivo das coberturas vegetais não foram suficientes para alcançar o IMC do solo natural.

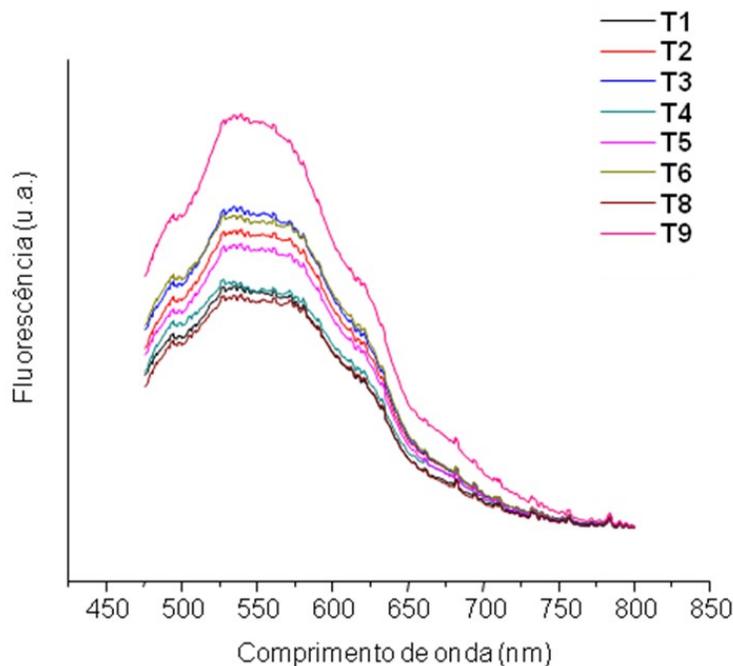
Leite et al. (2003) avaliaram o IMC da camada de 0,00 a 0,10m de um Argissolo cultivado com milho, adubado constantemente com adubos minerais e compostos orgânicos e utilizou um sistema natural como referência (Floresta Atlântica). O tratamento que mais se aproximou do solo referência (IMC = 100) foi o adubado com compostos orgânicos, o qual apresentou um IMC de 81. De forma semelhante, Campos (2006) utilizou um campo nativo como referência para avaliar o IMC de um Latossolo submetido a três sistemas de rotação de culturas em plantio direto e em plantio convencional. O tratamento que mais se aproximou do IMC do campo nativo (100) foi a rotação gramíneas/leguminosas, em plantio direto que apresentou IMC de 78. Estes dois autores concluíram que a partir do momento que um sistema natural é perturbado, a recuperação do IMC é dificultada devido à perda de equilíbrio no sistema.

A origem da FIL é a MOS, excitando-se preferencialmente as estruturas mais recalcitrantes, cuja concentração aumenta no processo de humificação, principalmente grupos funcionais ricos em ligações insaturadas, tais como OH fenólicos livres e ligados, estruturas de quinona, grupos carboxílicos ligados e anéis aromáticos que estão presentes na matéria orgânica mais humificada (MILORI et al., 2006). Na figura 4 observa-se os espectros de FIL da MOS.

O HFIL decresceu na sequência T8>T6>T5>T4>T3>T2>T1>T9 (Tabela 5), ou seja, o solo construído vegetado apresentou um HFIL menor do que o solo construído descoberto, provavelmente devido à adição de resíduos na superfície do solo construído, incrementando a fração lábil da MOS.

O revolvimento do solo e a mistura de horizontes devido aos processos de mineração e construção do solo podem ter quebrado os agregados, expondo a MOS à oxidação e aumentando o HFIL do solo. Isto explica o menor HFIL do solo natural em relação ao solo construído, seja ele coberto ou descoberto. Segundo Bayer (1996), a matéria orgânica originada de áreas cultivadas apresenta um estágio de humificação mais avançado do que o solo sob vegetação nativa, o aumento da humificação ocorre devido a mudanças no regime microclimático do solo e pela quebra de agregados quando da mobilização do solo.

Favoretto et al. (2008) avaliaram o HFIL de um Latossolo cultivado com a mesma rotação de culturas em três sistemas de manejo do solo, plantio convencional, preparo mínimo e plantio direto, verificando que quanto mais o solo era mobilizado, maior era o HFIL, em virtude do rompimento crescente de agregados. Além disso, o aporte de resíduos orgânicos frescos na superfície do solo em plantio direto causou uma diluição da matéria orgânica mais humificada, resultando em altos teores de carbono e baixo grau de humificação da matéria orgânica.



**Figura 4.** Emissão de fluorescência da matéria orgânica de um solo construído após a mineração de carvão. Vaqueiro (T1), Braquiária Brizantha (T2), Tanzânia (T3), Braquiária Humidícola (T4), Hemátria (T5), Tifton (T6), solo construído descoberto (T8) e solo natural (T9).

Dieckow et al. (2005) utilizaram as técnicas espectroscópicas de FIL, Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR) e Ressonância Magnética Nuclear (RMN  $^{13}\text{C}$ ) para avaliar o grau de humificação da MOS de dois Latossolos e um Argissolo, ambos sob vegetação nativa e cultivados em plantio direto e convencional de culturas como milho e soja. Os autores verificaram que os dados obtidos a partir das três técnicas espectroscópicas foram condizentes e que o plantio convencional aumentou o HFIL em relação ao plantio direto e ao solo sob vegetação nativa, devido à maior mobilização do solo em plantio convencional.

**Tabela 5.** Área sob a curva de fluorescência (ACF) ponderada pelos teores de carbono orgânico total (COT) como índice do grau de humificação (HFIL) da matéria orgânica de um solo construído após a mineração de carvão.

Tratamento	COT (g kg <sup>-1</sup> )	ACF	HFIL
T1 - Vaqueiro	10,10	65716	6507
T2 – Braquiária	12,15	80971	6637
T3 – Tanzânia	12,73	86085	6778
T4 – Braquiária hum.	9,70	69011	7115
T5 – Hemártria	10,18	76746	7524
T6 – Tifton	10,08	86480	8562
T8 – Solo descoberto	7,18	64118	8905
T9 – Solo natural	29,10	111896	3845

#### 5.4 Conclusões

A) Em dois anos de experimento, as coberturas vegetais mostram uma tendência de elevação dos estoques de carbono orgânico total e de carbono em todas as frações da matéria orgânica, com exceção da fração leve oclusa, quando comparadas ao solo descoberto.

B) As frações grosseira e leve livre foram eficientes em detectar alterações na matéria orgânica do solo causadas pelas espécies vegetais. O acúmulo de carbono nestas frações foi favorecido pelo cultivo da Braquiária e do capim Tanzânia.

C) O solo construído vegetado, independente das coberturas vegetais, apresentou índice de manejo de carbono e grau de humificação intermediários entre o solo construído descoberto e o solo natural, indicando uma recuperação parcial do solo.

D) Os estoques de carbono das frações grosseira e leve livre e o índice de manejo de carbono do solo construído e vegetado com Braquiária Brizantha e com capim Tanzânia indicam maior potencial destas espécies para recuperação da área degradada pela mineração de carvão em Candiota/RS.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mineração de carvão requer processos de recuperação da área degradada, dando origem a um solo construído caracterizado por baixos estoques de matéria orgânica, quando comparado ao solo natural.

De forma geral, as frações químicas e as frações físicas (granulométricas e densimétricas) foram mais eficazes do que o COT em detectar as alterações na MOS decorrentes das espécies vegetais utilizadas para vegetação. A FLL se mostrou sensível a estas alterações em ambos os experimentos, mesmo naquele experimento recentemente instalado.

As espécies vegetais promoveram a recuperação parcial da qualidade do solo construído em ambos os experimentos, com destaque para a Hemátria e a Braquiária Brizantha, no experimento iniciado em 2003 e para o capim Tanzânia e a Braquiária Brizantha, no experimento iniciado em 2007.

Estas melhorias puderam ser evidenciadas pela elevação dos estoques de COT, NT, do IMC e de carbono em todas as frações da MOS, em relação ao solo construído sem coberturas vegetais. O único comportamento distinto foi encontrado no carbono da FLO do experimento mais recente, o qual, em média, foi menor do que o solo descoberto, o que pode ser justificado pela escarificação do solo da área experimental, rompendo os agregados e expondo a MOS à decomposição, já que o solo descoberto foi coletado em uma área adjacente ao experimento e não sofreu escarificação.

A espectroscopia de FTIR permitiu diferenciar aqueles AHs mais parecidos com o encontrado no solo natural (Hemátria, Pensacola e Braquiária Brizantha) daqueles mais parecidos com o AH encontrado no solo construído descoberto (Tífton). Em virtude da adição de resíduos vegetais em superfície, em ambos os experimentos o grau de humificação (HFIL) da MOS do solo sob as coberturas vegetais apresentou-se intermediário, maior do que o do solo natural e menor do que o solo construído sem coberturas vegetais, indicando a entrada de material orgânico recente no solo. Portanto, as espectroscopias de FTIR e FIL foram capazes de diferenciar qualitativamente os tratamentos.

Mesmo não sendo possível uma análise temporal dos dados, pois se tratam de dois experimentos diferentes, nota-se que há um processo de evolução na recuperação dos estoques de carbono orgânico total e de suas frações com o passar do tempo, assim como uma melhoria no índice de manejo de carbono e no grau de humificação da MOS.

## 7. ESTUDOS FUTUROS

A matéria orgânica desempenha papel fundamental na qualidade e na sustentabilidade do solo, seja ele construído ou não. Para um melhor entendimento da dinâmica da matéria orgânica em solos construídos, têm-se nos fracionamentos (químico e/ou físico), uma ferramenta capaz de auxiliar na indicação das espécies vegetais mais eficientes para a recuperação do solo degradado, em virtude da maior sensibilidade das frações da MOS em comparação ao seu conteúdo total. Entretanto, são poucos os trabalhos que avaliam as frações da matéria orgânica de solos construídos.

Os fracionamentos apresentados neste trabalho foram os primeiros a serem realizados desde a instalação dos dois experimentos, portanto, servirão de base para possíveis fracionamentos futuros, onde poderia ser feita uma análise temporal dos dados e assim obter informações adicionais do efeito das plantas sobre a matéria orgânica do solo construído. Desta forma, seria possível avaliar se as plantas que apresentaram os melhores resultados até o presente momento se comportariam de forma similar a médio e longo prazo.

Por se tratar de um solo construído recentemente, os estoques de MOS são baixos, sendo assim, avaliou-se a camada superficial do solo (0,00 a 0,03m), onde são esperadas as principais diferenças entre os tratamentos. Para os próximos estudos, além da camada superficial, recomenda-se a realização das análises quantitativas e qualitativas da MOS nas camadas subjacentes, para observação dos efeitos das coberturas vegetais em subsuperfície.

Como forma de complementar os estudos futuros sobre a matéria orgânica deste solo construído, a análise da composição tecidual das coberturas vegetais poderia auxiliar no entendimento das transformações da matéria orgânica.

De forma geral, estudos que incluam a dinâmica da matéria orgânica em solos construídos além de necessários, são válidos para que juntamente com outras informações, possam ser traçadas estratégias de recuperação de áreas degradadas por mineração de carvão.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCM. Associação Brasileira de Carvão Mineral. Disponível em: <http://www.carvaomineral.com.br/abcm/default.asp>. Acesso em: 19 dez. 2010.
- ABREU JR., C.H.; NETO, L.M.; MILORI, D.M.B.P.; SIMÕES, M.L.; da SILVA, W.T.L. Métodos analíticos utilizados em química do solo. In: **Química e mineralogia do solo. Parte II – Aplicações**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa – Minas Gerais, 2009. p.529-685.
- ADE, Marcus Vinícius Berao. **Caracterização dos sistemas deposicionais e das camadas de carvão no pacote sedimentar da malha IV, jazida de Candiota- RS**. Porto Alegre – RS, 1993. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ADU, J. K.; OADES, J. M. Physical factors influencing decomposition of organic materials in soil aggregates. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 10, p. 109-115, 1978.
- AKALA, V. A.; LAL, R. **Soil carbon enhancement in graded and ungraded reclaimed minesoil under forest and pasture in Ohio, USA**. 10th International Soil Conservation Organization Meeting. p. 24-29, 1999.
- AKALA, V. A.; LAL, R. Soil organic pools and sequestration rates in reclaimed minesoils in Ohio. **Journal of Environmental Quality**, v. 30, p. 2098-2104, 2001.
- ANDERSON, J. D. INGRAM, L. J.; STAHL, P. D. Influence of reclamation management practices on microbial biomass carbon and soil organic carbon accumulation in semiarid mined lands of Wyoming. **Applied Soil Ecology**, v. 40, p. 387-397, 2008.
- ALVAREZ, R. & LAVADO, R.S. Climatic, organic matter and clay content relationship in the Pampa and Chaco soils, Argentina. **Geoderma**, v. 83, p. 127-141, 1998.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; SPAGNOLLO, E.; CAMPOS, B.C.; VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, v.35, p.1599-1607, 2006.
- ÂNGELO, J. G. M.; LENA, J. C de.; DIAS, L. E.; SANTOS, J. B dos. Diversidade vegetal em áreas em reabilitação de mineração de ferro, na mina de alegria, em Mariana-MG. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 2, p. 183-192, 2002.
- ASHAGRIE, Y.; ZECH, W.; GUGGENBERGER, G.; MAMO, T. Soil aggregation, and total and particulate organic matter following conversion of native forests to continuous cultivation in Ethiopia. **Soil & Tillage Research**, v. 94, p. 101–108, 2007.
- BALDOCK, J. A. et al. Aspects of the chemical-structure of soil organic materials as revealed by solid state C<sup>13</sup> NMR-Spectroscopy. **Biochemistry Netherlands**, v. 16, p. 1-42, 1992.
- BALIEIRO, F. C.; FRANCO, A. A.; FONTES, R. L. F.; DIAS, L. E; CAMPELLO, E. F. C.; FARIA, S. M. Accumulation and distribution of above ground biomass and nutrients under pure and mixed stands of *Pseudosamanea guachapele* Dugard and *Eucalyptus grandis* W. Hill ex maiden. **Plant Nutrition**, v. 25, p. 2639-2654, 2002.

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

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; SAAB, S. C.; MIELNICZUK, J. Interferência da fração mineral na estimativa do grau de humificação da matéria orgânica em agregados organominerais por ressonância paramagnética eletrônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 11-17, 2000.

BAYER, C.; DICK, D. P.; RIBEIRO, G. M.; SCHEUERMANN, K. K. Carbon stocks in organic matter fractions as affected by land use and soil management, with emphasis on no-tillage effect. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.3, p.401-406, 2002.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.39, n.7, p.677-683, jul. 2004.

BENDELT, E. S.; BURGER, J. A.; DANIELS, W. L. Quality of amended mine soils after sixteen years. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1736-1744, 2001.

BENITES, V. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MENDONÇA, E. S.; MARTIN NETO, L. Caracterização da matéria orgânica e micromorfologia de solos sob campos de altitude no parque estadual da Serra do Brigadeiro (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 661-674, 2001.

BENITES, V.M.; MADARI, B. & MACHADO, P.L.O.A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: Um procedimento simplificado de baixo custo**. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2003. 7p. (Comunicado Técnico).

BERTONCINI, Edna Ivani. **Comportamento de Cd, Cr, Cu, Ni e Zn em latossolos sucessivamente tratados com biossólidos: Extração sequencial, fitodisponibilidade e caracterização de substâncias húmicas**. 2002. 191p. (Tese de Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B.; LISE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 46, p. 1459-1466, 1995.

BLOOM, P.R. & LEENHEER, J.A. **Vibrational, electronic, and high-energy spectroscopic methods for characterizing humic substances**. In: HAYES, M.H.B.; MacCARTHY, P.; MALCOLM, R.L. & SWIFT, R.S., eds. Humic substances: II. In search of structure. New York, John Wiley & Sons, 1989. p.410-446.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 777-783, 1992.

CAMPOS, Ben-Hur Costa. **Dinâmica do carbono em latossolo vermelho sob sistemas de preparo de solo e de culturas**. 2006. 190p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

- CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A.; RUMJANEK, V. M.; MORAES, A. A.; GURIDI, F. Distribuição da matéria orgânica e características de ácidos húmicos em solos com adição de resíduos de origem urbana. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 12, p. 1529-1538, dez. 2001.
- CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; RUMJANEK, V.M.; GURIDI, F.; OLIVARES, F.L.; SANTOS, G.A. & BRAZFILHO, R. Distribution of the humified fractions and characteristics of the humic acids of an ultisol under cultivation of Eucalyptus and sugar cane. **Terra**, v. 20, p. 371- 381, 2002.
- CARNEIRO, M. A. C.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; SOARES, A. L. L. Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa e atividade microbiana no solo em duas cronossequências de reabilitação após a mineração de bauxita. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 621-632, 2008.
- CARTER, M. R. Organic matter and sustainability. In: REES, R. M.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C. D.; WATSON, C. A. (Ed.). **Sustainable management of soil organic matter**. New York: CABI Publishing, 2001. p. 9-22.
- CGTEE. Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.cgtee.gov.br/sitenovo/index.php>. Acesso em: 18 dez. 2010.
- CHATTERJEE, A.; LAL, R.; SHRESTHA, R.K.; USSIRI, D.A.N. Soil carbon pools of reclaimed minesoils under grass and forest landuses. **Land Degrad. Develop.** V. 20, p. 300–307, 2009.
- CHEFETZ, B.; HATCHER, P.; HADAR, Y.; CHEN, Y. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. **Journal of Environmental Quality**. v. 25, p.776-785, 1996.
- CHRISTENSEN, B.T. **Organic matter in soil – structure, function and turnover. Copenhagen**, 2000, 95f.
- CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in soil science**, New York, v. 20, p. 1-90, 1992.
- CHRISTENSEN, B. T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Lewis, 1996. p. 97-165.
- CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. **European Journal of Soil Science**, v. 52, p. 345-353, 2001.
- COLLINS, H. P.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K e ELLIOT, E.T. Characterization of soil organic carbon relative to its stability and turnover. In: **Soil organic matter in temperate agroecosystems – long – term experiments in North America**. Boca Raton, CRC Press, 1997. p. 51-72.
- CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 777-788, 2005.

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

CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MIELNICKZUK, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 32, p. 541-549, 2008.

CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL 1988. **Revista dos Tribunais**, 1988.

CORRÊA, R. S. **Recuperação de áreas degradadas pela mineração no cerrado**. 2ª Ed. Brasília/DF, 2009. p.25-31.

COSTA, E. S.; LUISÃO, R. C.; LUIZÃO, F. J. Soil microbial biomass and organic carbon in reforested sites degraded by bauxite mining in the Amazon. **Advances in Geocology**. v. 31. p. 443-450, 1998.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Aumento de matéria orgânica num Latossolo bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.587-589, mar-abr. 2004.

CRM. Companhia Riograndense de Mineração. Relatório da diretoria e demonstrações contábeis em 31 de dezembro de 2009 e 2008.

CRM. Companhia Riograndense de Mineração. Disponível em: <http://www.crm.rs.gov.br/>. Acesso em: 02 de dez. 2010.

DALAL, R.C.; MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in Southern Queensland, I. Overall changes in soil properties and trends in winter cereal yields. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.24, p.265-279, 1986.

DIAS, B.O.; SILVA, C.A.; SOARES, E.M.B.; BETTIOL, W.; GUERREIRO, M.C.; BELIZÁRIO, M.H. Infravermelho na caracterização de ácidos húmicos de Latossolo sob efeito de uso contínuo de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 885-894, 2009.

DICK, D. P.; DICK, Y. P.; DA SILVA, L. F.; ESSIG, C.; ZORTEA, R. B. Caracterização de produtos de decomposição de lodos orgânicos em diferentes tempos e meio de digestão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. nº 21. p. 1-8, 1997.

DICK, D.P.; GOMES, J.; ROSINHA, P. Caracterização de substâncias húmicas extraídas de solos e de lodos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo. Campinas**. nº 22. p. 603-611, 1998.

DICK, D.P.; SANTOS, J.H.Z.; FERRANTI, E.M. Chemical characterization and infrared spectroscopy of soil organic matter from two Southern Brazilian soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 29-39, 2003.

DICK, D.P.; SILVA, L.B.; INDA, 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p. 2289-2296, 2008.

DICK, Déborah. Pinheiro. Química da matéria orgânica do solo. In: **Química e mineralogia do solo – Parte II – Aplicações**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa – Minas Gerais. 2009. p. 1-68.

DICK, D. P.; KNICKER, H.; ÁVILA, L. G.; JÚNIOR, A. V. I.; GIASSON, E.; BISSANI, C. A. Organic matter in constructed soils from a coal mining area in southern Brazil. **Organic Geochemistry**, v. 37, p. 1537–1545, 2006.

DIEKOW, Jéferson. **Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. 2003. 164f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DIECKOW, J.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D. M. B. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; BAYER, C.; MIELNICAZUK, J. **Sistemas de preparo do solo e características espectroscópicas da matéria orgânica em ambientes tropicais e subtropicais brasileiros**. Embrapa Instrumentação Agropecuária. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 12. Novembro, 2005.

DOBBSS, L.B.; RUMJANECK, V.M.; BALDOTTO, M.A.; VELLOSO, A.C.X.; CANELLAS, L.P. Caracterização química e espectroscópica de ácidos húmicos e fúlvicos isolados da camada superficial de Latossolos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 51-63, 2009.

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

EMPINOTTI, Vanessa Lucena. **Conteúdo e qualidade da Matéria Orgânica em sistemas de manejo e classes de solo**, 1999. 101p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FARIA, G.E.; BARROS, N.F.; SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F.; PAIVA, A.O. Carbono orgânico total e frações da matéria orgânica em diferentes distâncias da cepa de eucalipto. **Cerne**, Lavras, v.14, p. 259-266, 2008.

FAVORETTO, C.M.; GONÇALVES, D.; MILORI, D.M.B.P.; ROSA, J.A.; LEITE, W.C.; BRINATTI, A.M.; SAAB, S.C. Determinação da humificação da matéria orgânica de um Latossolo e de suas frações organo-minerais. **Química Nova**, v.31, p.1994-1996, 2008.

FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, p. 69-116, 1997.

FILCHEVA, E.; NOUSTOROVA, M.; GENTCHEVA-KOSTADINOVA, SV.; HAIGH, M.J. Organic accumulation and microbial action in surface coal-mine spoils, Pernik, Bulgaria. **Ecological Engineering**, v. 15, p. 1–15, 2000.

FONTANA, Ademir. **Fracionamento da Matéria Orgânica e Caracterização dos Ácidos Húmicos e sua Utilização no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2009. 82p. Tese (Doutorado em Ciências – Ciência do Solo). Universidade Federal Rural do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro.

FRANCO, A. A.; FARIA, S. M. The contribution of N<sub>2</sub>-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 29, p. 897-903, 1997.

FRANCO, A. A.; BALIEIRO, F. C. **The role biological nitrogen fixation in land reclamation, agroecology and sustainability of tropical agriculture**. Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Ciências, 2000. 323p.

FRANCO, A. A.; CAMPELLO, E. F.; FARIA, S. M.; DIAS, L.E. The importance of biological nitrogen fixation on land rehabilitation. In: **Nitrogen fixation: From molecules to crop productivity**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2000. p. 569-570.

FREIXO, A.A.; MACHADO, P.L.O.A.; GUIMARAES, C.M.; SILVA, C.A.; FADIGAS, F.S. Estoques de carbono e nitrogenio e distribuicao de fracoes organicas de latossolo do cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.425-434, 2002a.

FREIXO, A.A.; MACHADO, P.L.O.A.; DOS SANTOS, H.P.; SILVA, C.A. & FADIGAS, F.S. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil Tillage Research**, v. 64, p. 221-230, 2002b.

GANJEGUNTE, G. K.; WICK, A. F.; STAHL, P. D.; VANCE, G. F. Accumulation and composition of total organic carbon In reclaimed coal mine lands. **Land Degradation. Development**, v. 20, p. 156–175, 2009.

GOLCHIN, A.; BALDOCK, J. A.; OADES, J. M. A model linking organic matter decomposition, chemistry, and aggregate dynamics. In: **Soil processes and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 245-266.

GOLCHIN, A.; OADES, J. M.; SKJEMSTAD, J. O; CLARKE, P. Study of free and occluded particulate organic-matter in soils by solid-State C-13 CP/MAS NMR – spectroscopy and scanning electron-microscopy. **Australian Journal of Soil Research.**, v. 32, p. 285-309, 1994.

GONÇALVES, Fernanda Coelho. **Efeito de plantas de cobertura sobre os atributos físicos de um solo construído na área de mineração de carvão de Candiota-RS após três anos**. 2008. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Solos). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

GREGORICH, E. G.; BEARE, M. H.; McKIM, U. F.; SKJEMSTAD, J. O. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, v.70, p. 975-985, 2006.

GREGORICH, E. G.; JANZEN, H. H. Storage of soil carbon in the light fraction and macroorganic matter. In: **Structure and Organic Matter Storage in Agriculture Soils**. Boca Raton: CRC Lewis, 1996, p.167-190.

IBAMA. INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de vegetação**. Brasília, 1990.

- INGRAM, L. J.; SCHUMAN, G. E.; STAHL, P. D.; SPACKMAN, L. K. Microbial respiration and organic carbon indicate nutrient cycling recovery in reclaimed soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 1737–1745, 2005.
- ISLAM, K. R. e WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-atlantic soils as influenced by conservation management. **J. Soil Water Conser.**, v. 55, p. 69-78, 2000.
- IZQUIERDO, I.; CARAVACA, F.; ALGUACIL, M. M.; HERNÁNDEZ, G.; RÓLDAN, A. Use of microbiological indicators for evaluating succes in soil restoration after revegetation of a mining área under subtropical conditions. **Applied Soil Ecology**, v. 30, p. 3-10, 2005.
- JANZEN, H.H.; CAMPBELL, C.A.; BRANKT, S.A.; LAFOND, G.P.; TOWNLEY-SMITH, L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotation. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.56, p.1799-1806, 1992.
- KAMPF, N. et al. In: **Carvão e Meio Ambiente**. Porto Alegre: Ed. Universidade, 2000. p. 596-640.
- KOPPE, J.C.; COSTA, J.F.C. Mineração. In: **Meio ambiente e carvão: impactos da exploração e utilização**. Porto Alegre: FEPAM, 2002. p.15-27.
- JACINTHE, P. A. LAL, R. Tillage effects on carbon sequestration and microbial Biomass in reclaimed farmland soils of southwestern Indiana. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, p. 605-613, 2009.
- LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; COLE, C.V. **The potential of U. S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect**. Ann. Arbour Press. P. 128, 1998.
- LEAL, O. A; CASTILHOS, R. M. V.; FERNANDES, F. F.; PINTO, L. F. S.; PILLON, C. N.; PENNING, L. H.; LEMES, E. S. Estoques de carbono em frações da matéria orgânica de solo construído após mineração de carvão e sob diferentes coberturas vegetais. In: **XVIII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA**, 2010, Teresina. Anais da XVIII Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 2010.
- LEIRÓS, M. C.; GIL-SOTRES, F.; CECCANTI, B.; TRASAR-CEPEDA, M. C.; M. GONZALEZ-SANGREGORIO, V. Humification processes in reclaimed open-cast lignite mine soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 25, nº 10, p. 1391-1397, 1993.
- LEITE, L.F.C.; MENDONCA, E.S.; NEVES, J.C.L.; MACHADO, P.L.O.A.; GALVAO, J.C.C. Estoques totais de carbono organico e seus compartimentos em argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.821-832, 2003.
- LEITZKE, Volnei Wruch. **Armazenagem e disponibilidade de água de solos construídos na área de mineração de Candiota-RS**. 2002. 131f. Dissertação (Mestrado em Ciências - Solos). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- LIMA, Augusto Miguel Nascimento. **Estoque de carbono e frações da matéria orgânica do solo sob povoamento de eucalipto no Vale do Rio Doce – MG**. 2004.

109f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

LIMA, A. M. N.; SILVA, I. V.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; MENDONÇA, E. S.; DEMOLINARI, M. S. M.; LEITE, F. P. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1053-1063, 2008.

LI, M. S. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: A review of research and practice. **Science of the Total Environment**, v. 357, p. 38– 53, 2006.

LIMA, C. L. R.; PILLON, C. N.; SANTOS, D. C.; LIMA, A. C. R.; SILVA, S. D. A. Qualidade de um argissolo sob plantio direto de culturas promissoras à produção de biocombustível. **Ver. Brás. Ol. Fibrós.** v. 13, n. 2, p. 73-82, 2009.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, E, M. R. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.4, p.1077-1082, jul, 2009.

MALIK, A.; SCULLION, J. Soil development on restored opencast coal sites with particular reference to organic matter and aggregate stability. **Soil Use and Management**, v. 14, p. 234-239, 1998.

MAPFUMO, P.; MTAMBANENGWE, F.; VANLAUWE, B. Organic matter quality and management effects on enrichment of soil organic matter fractions in contrasting soils in Zimbabwe. **Plant Soil**, v. 296, p. 137–150, 2007.

MARINARI, S.; LIBURDI, K.; MASCIANDARO, G.; CECCANTI, B.; GREGO, S. Humification-mineralization pyrolytic indices and carbon fractions of soil under organic and conventional management in central Italy. **Soil & Tillage Research**, v. 92, p. 10– 17, 2007.

MARTINS, E. L.; CORINGA, J. E. S.; WEBER, O. L. S. Carbono orgânico nas frações granulométricas e substâncias húmicas de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico – LVAd sob diferentes agrossistemas. **Acta Amazônica**, v. 39 (3), p. 655 – 660, 2009.

MENDES FILHO, Paulo Furtado. **Potencial de reabilitação do solo de uma área degrada, através da revegetação e do manejo microbiano**. 2004. 89f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba.

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 Science Society American Journal**. 70:57–63 (2006).

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 Science Society American Journal**, v. 70, p. 57-63, 2006.

MILORI, D. M. B. P.; MARTIN-NETO, L.; GALETI, H. V. A.; PÉREZ, M. G.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; SALTON, J. **Índice de Humificação Obtido Através da Fluorescência Induzida por Laser**. 2004. Embrapa. São Carlos – SP.

MILORI, D. M. B. P.; MARTIN-NETO, L.; BAYER, C. **Fluorescência induzida por laser para análise da matéria orgânica de solos intactos**. 2002. Embrapa. São Carlos - SP.

MIOLA, Ezequiel César Carvalho. **Qualidade física de um solo construído e cultivado com diferentes plantas de cobertura na área de mineração de Candiota – RS**. 2010. 107f. Dissertação (Mestrado em Ciências - Solos). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

MIRANDA, C. C.; CANELLAS, L. P.; NASCIMENTO, M. T. Caracterização da matéria orgânica do solo em fragmentos de mata atlântica e em plantios abandonados de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 905-916, 2007.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2ª edição atualizada e ampliada. Lavras: Editora UFLA, 2006. 729 p.

MUMMEY, D. L.; STAHL, P. D.; BUYER, J. S. Soil microbiological properties 20 years after surface mine reclamation: spatial analysis of reclaimed and undisturbed sites. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 34, p. 1717–1725, 2002.

NASCIMENTO, P.C.do; BAYER, C.; NETTO, L.DE F. da S.; VIAN, A.C.; VIEIRO, F.; MACEDO, V.C.M.; MARCOLIN, E. Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p. 1821-1827, 2009.

NAYAK, P.S.; SINGH, .K. Instrumental characterization of clay by XRF, XRD and FTIR. **Bull Mater Science**, v.30, p. 235 – 238, 2007.

NEVES, C. S. V.; FELLER, C.; LARRÉ-LARROUY, M. C. Matéria orgânica nas frações granulométricas de um latossolo vermelho distroférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 1, p. 17-26, jan./mar. 2005.

NICOLINI, F.; TOPP, W. Soil properties in plantations of sessile oak (*Quercus petraea*) and red oak (*Quercus rubra*) in reclaimed lignite open-cast mines of the Rhineland. **Geoderma**, Amsterdam, v. 129, p. 65–72, 2005.

NIEMEYER, J.; CHEN, Y.; BOLLAG, J. M. Characterization of Humic Acids, Composts, and Peat by Diffuse Reflectance Fourier-Transform Infrared Spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 135-140, 1992.

ODUM, E. P.; BARRET, G. W. **Fundamentos de ecologia**. 5. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

OYEDELE, D. J.; SCHJÜNNING, P.; SIBBESEN, E.; DEBOSZ, K. Aggregation and organic matter fractions of three Nigerian soils as affected by soil disturbance and incorporation of plant material. Erratum. **Soil & Tillage Research**, v. 52, p. 125-126, 1999.

PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de

manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes – RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 731-737, 2004.

PINHEIRO, E.F.M.; PEREIRA, M.G. & ANJOS, L.H.C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 30, p. 1-6, 2004.

PINTO, L. F. S. **Potencial de acidificação e de neutralização do carvão, cinzas e materiais geológicos da área de mineração de Candiota-RS**. Relatório da FAPERGS, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1999. 31f.

PINTO, Luis Fernando Spineli. **Potencial de acidificação e neutralização dos materiais geológicos para a composição do solo construído em áreas de mineração de carvão**. 1997. 186f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciências do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PORTUGAL, A. F.; JUCKSCH, I.; SCHAEFER, C. E. G.R. WENDLING, B. Determinação de estoques totais de carbono e nitrogênio e suas frações em sistemas agrícolas implantados em Argissolo vermelho amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2091-2100, 2008.

POTES, Maria da Luz. **Matéria orgânica e sua distribuição em compartimentos físicos em Neossolo Litólico sob pastagem e mata nativa nos campos de Cima da Serra Rio Grande do Sul**. 2009. 90f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PRIMACK, R. B.; RODRIGUES, E. **Biologia da conservação**. Universidade de Londrina. 2002.

PULROLNIK, K.; BARROS, N.F.; SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F.; BRANDANI, C.B. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1125-1136, 2009.

QUINOÑES, OSCAR Rafael Gadea. **Caracterização e gênese de solos construídos após mineração de carvão na mina Boa Vista, Município de Minas do Leão, RS**. Porto Alegre – RS, 2004, 119f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

QUIÑONES, O. R.; JUNIOR, A. V. I.; GIASSON, E.; BISSANI, C. A.; DICK, D. P. Características de solos construídos após mineração de carvão relacionadas ao processo de construção e à composição do material utilizado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.6, p.1564-1571, set, 2008.

RAJAN, K.; NATARAJAN, A.; KUMAR ANIL, K. S.; BADRINATH, M. S.; GOWDA, R. C. Soil organic carbon – the most reliable indicator for monitoring land degradation by soil erosion. **Current Science**, v. 99, no. 6, 25 september, 2010.

RANJEL, O. J. T.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, T. G. Estoques e frações da matéria orgânica de latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1341-1353, 2007.

REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. **Soil & Tillage Research**, v. 43, p. 131-167, 1997.

ROSA, Carla Machado. **Matéria orgânica e Planossolo Háptico sob sistemas de manejo no cultivo do arroz irrigado no Sul do Brasil**. 2010. 94f. Tese (Doutorado em Ciências - Solos). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E.J. & VASCONCELLOS, C.A. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the <sup>13</sup>C/ <sup>12</sup>C isotopic ratio in a Cerrado's oxisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 104, p. 185- 202, 2001.

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

RUMPEL, C.; KNICKER, H.; KÖGEL-KNABNER, I.; SKJEMSTAD, J.O.; HÜTTL, R.F. Types and chemical composition of organic matter in reforested lignite-rich mine soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 86, p. 123–142, 1998.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C. **Matéria orgânica do solo na integração lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul**. Boletim de pesquisa e desenvolvimento n°. 29, Embrapa Agropecuária Oeste. Dourados - MS, 2005.

SANTOS, Daiane Carvalho. **Alterações químicas e biológicas em solo de área de mineração de carvão submetido a diferentes cultivos**. 2006. 97f. Dissertação (Mestrado em Ciências - Solos). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

SANTOS, D. C.; LIMA, C. L. R.; FLORES, C. A.; PILLON, C. N.; KUNDE, R. J.; SANDRINI, W. C. **Avaliação da qualidade física e da matéria orgânica de um argissolo vermelho derivado de arenito da fronteira oeste do rio grande do sul**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 100. Embrapa Clima Temperado. ISSN 1981-5980, Dezembro, 2009.

SANTUCCI, Jô. O papel do carvão mineral na geração de energia. **Carvão mineral: responsável por 40% da eletricidade mundial**, Porto Alegre, RS. CREA-RS, 2009, p. 17-21.

SCHIAVO, J. A.; CANELLAS, L. P.; MARTINS, M. A. Revegetação de cava de extração de argila com *Acacia mangium*. I - atributos químicos do solo, ácidos fúlvicos e húmicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1153-1162, 2007.

SCHIAVO, J. A.; BUSATO, J. G.; MARTINS, M. A.; CANELLAS, L. P. Recovery of degraded areas revegetated with *Acacia mangium* and *eucalyptus* with special reference to organic matter humification. **Sci. Agric**, v.66, n.3, p. 353-360, May/June 2009.

SCHWENKE, G. D.; AYRE, L.; MULLIGAN, D. R.; BELL, L. C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite mine land at Weipa. II. Soil organic matter dynamics in mine soil chronosequences. **Australian Journal of Soil Research**, v. 38, p. 371-393, 2000.

- SEVER, H.; MAKINECI, E. Soil organic carbon and nitrogen accumulation on coal mine spoil reclaimed with maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton) in Aglaci-Istambul. **Environ Monit Acess**, v. 155, p. 273-280, 2009.
- SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability ins a tropical Oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density and magnetic fractionations. **Soil Science**, Ottawa, v. 162, n.11, p. 795-807, 1997.
- SHRESTHA, R. K.; LAL, R. Ecosystem carbon budgeting and soil carbon sequestration in reclaimed mine soil. **Environment International**, v. 32, p. 781–796, 2006.
- SHUKLA, M. K; LAL, R; EBINGER, M. Soil quality indicators for reclaimed minesoils in southeastern Ohio. **Soil Science**, v. 169, p. 133–142, 2004.
- SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K.; DORAN, J. W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.62, p.1367-1377, 1998.
- SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and soil**, v.241, p.155–176, 2002.
- SOLLINS, P. et al. Stabilizations and destabilization of soil organic mater: mechanisms and controls. **Geoderma**. Amsterdam, v. 74, p. 65-105, 1996.
- SMITH, O. H.; PETERSEN, G. W.; NEEDELMAN, B. A. Environmental indicator of agroecosystems. **Avances in Agronomy**, v. 69, p. 75-97, 2000.
- SIQUEIRA, J. O.; SOARES, C. R. F. S. e SILVA, C. A. Parte IV Aplicações – **Matéria orgânica em solos de áreas degradadas**. In: Fundamentos da matéria orgânica do solo. 2ª ed. Porto Alegre. 2008. p. 495-524.
- SOHI, S.P.; MAHIEU, N.; ARAH, J.R.M.; POWLSON, D.S.; MADARI, B. & GAUNT, J.L. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1121-1128, 2001.
- SOURKOVÁ M.; FROUZ, J.; SANTRUCKOVÁ, H. Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic). **Geoderma**, Amsterdam, v. 124 p. 203–214, 2005.
- SOUZA, F. A. & SILVA, E. M. R. **Micorrizas arbusculares na revegetação de áreas degradadas**. In: SIQUEIRA, J. O. Avanços em fundamentos e aplicação de micorrizas. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 1996. p. 255-290.
- SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; SILVA, C. A.; BUZETTI, S. Frações do carbono orgânico, biomassa e atividade microbiana em um Latossolo Vermelho sob cerrado submetido a diferentes sistemas de manejos e usos do solo. **Acta Sci. Agron**, Maringá, v. 28, n. 3, p. 323-329, July/Sept., 2006.
- STEVENSON, F. J. **Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorous, sulfur and micronutrients**. New York: John W, 1986. p.380.
- STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: Genesis, composition, reactions**. 2.ed. New York, Willey, 1994. p. 496.

STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; FERNANDES, F. F.; STUMPF, T.; RECH, T. S.; PANZIEIRA, W.; NUNES, M. R. Efeito de plantas de cobertura no diâmetro médio ponderado e no teor de carbono orgânico de um solo construído em área de mineração de carvão no sul do Brasil. In: **XVIII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA**, 2010, Teresina. Anais da XVIII Reunião Brasileira De Manejo e Conservação do Solo e da Água, 2010.

TAN, Z.; LAL R.; OWENS, L.; IZAURRALDE, R.C. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. **Soil & Tillage Research**, v. 92, p. 53–59, 2007.

TORDOFF, G. M.; BAKER, A. J. M.; WILLIS, A. J. Curren approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. **Chemosphere**, v. 41, p. 219-228, 2000.

USDA-NRCS. 2008. Soil Quality Institute. Disponível em <http://soils.usda.gov>. Acesso em: 10 set. 2009.

USSIRI, D. A. N.; LAL, R. Carbon Sequestration in Reclaimed Minessoils. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 24, p. 151–165, 2005.

USSIRI, D. A. N.; LAL, R. Methods for determining coal carbon in the reclaimed minesoil contaminated with coal. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, p. 231-237, 2008.

VIEIRA, F. C. B.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; HE, Z. L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term-no-till cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v. 96, p. 195-204, 2007.

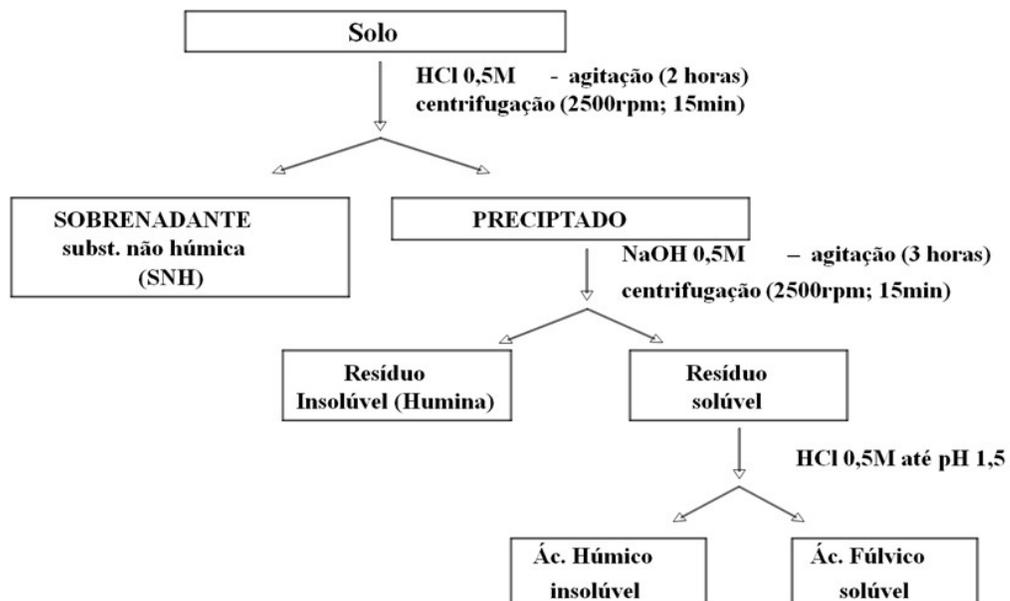
XAVIER, F.A.S.; MAIA, S.M.F.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba – CE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.427 – 258, 2006.

ZANATTA, Josiléia Acordi. **Estoque e labilidade do carbono em frações da matéria orgânica de um Argissolo afetados por sistemas de manejo do solo**. 2006. 129f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

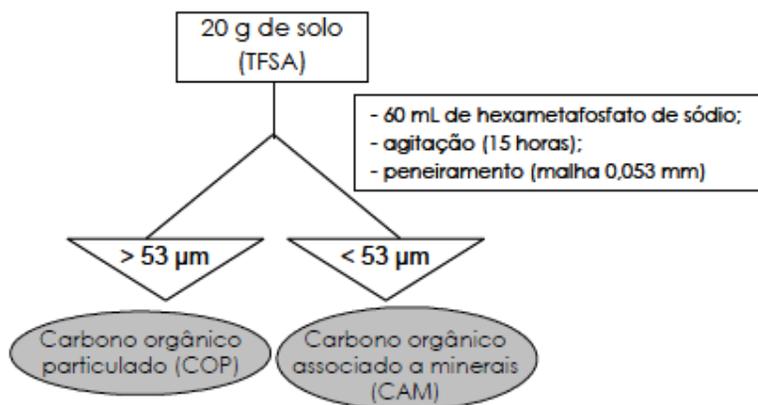
Zschornack, Tiago. **Fracionamento e estoques de carbono orgânico de solos de várzea sob campo natural no Rio Grande do Sul**. 2007. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Solos). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

## 9. APÊNDICES

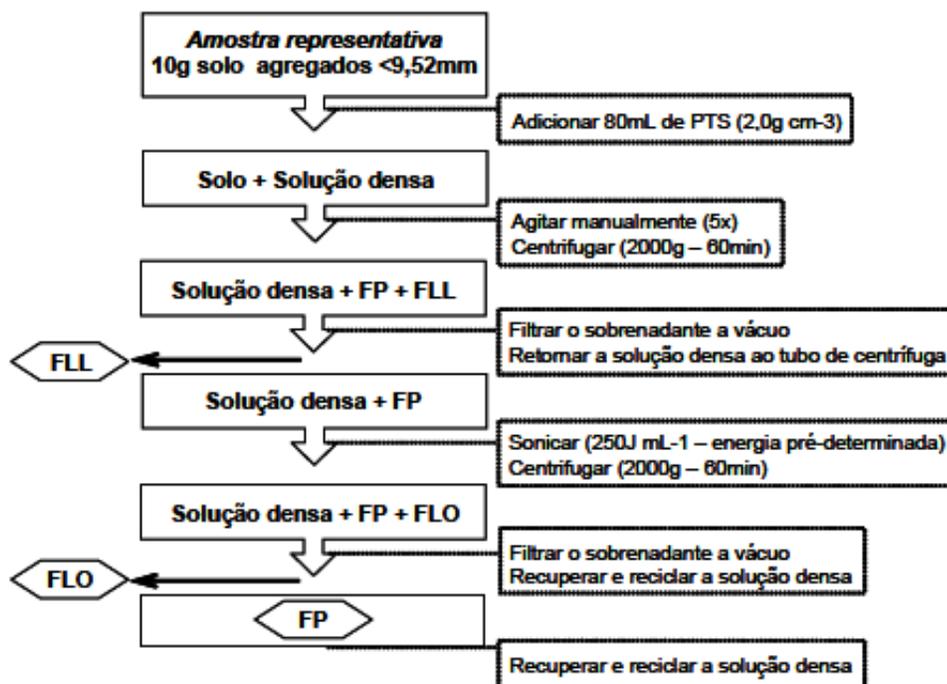
**Apêndice A.** Esquema simplificado do fracionamento químico da matéria orgânica do solo segundo Dick et al. (1998).



**Apêndice B.** Esquema simplificado do fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica do solo, segundo Cambardella e Elliott (1992).



**Apêndice C.** Esquema simplificado do fracionamento físico densimétrico da matéria orgânica do solo com politungstato de sódio, segundo Conceição (2008).



**Apêndice D.** Exemplo para obtenção da curva de dispersão do solo, utilizada para realização do fracionamento físico densimétrico da matéria orgânica do solo.

Primeiramente são pesadas 20g de uma amostra representativa de solo, obedecendo à proporção entre agregados maiores e menores que 2,00mm. Adiciona-se 100mL de água e calcula-se o volume total da solução (solo+água). Em seguida são estabelecidos os níveis de energia para cada ponto da curva de dispersão (Ex: solo natural: 0; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 1000. Solo construído com e sem vegetação: 0; 50; 100; 200; 300; 400; 500; 750). Calcula-se o tempo de sonicação necessário para dispersão do solo em cada ponto da curva, conforme segue abaixo:

Exemplo:

- Utilizando uma amplitude de  $60 \text{ J s}^{-1}$ (P)
- Supondo que se queira uma energia de sonicação de  $100 \text{ J mL}^{-1}$
- 20g de solo = 8mL (considerando uma densidade de  $2,5 \text{ g cm}^{-3}$ )
- 80mL de água ou PTS
- volume total da suspensão =  $8+80 = 88 \text{ mL}$
- Energia requerida:

$$E = 100 \text{ J mL}^{-1} \times 88 \text{ mL} = 8800 \text{ J}$$

- Tempo:

$$t = E/P$$

$$t = \frac{8800 \text{ J}}{60 \text{ J s}^{-1}} = 146,67 \text{ s} = 2,44 \text{ min} = 2' 26''$$

$$60 \text{ J s}^{-1}$$

Após o cálculo do tempo de sonicação, colocar a água e o solo em um Becker e sonicar, obedecendo-se o tempo de cada ponto. No ponto zero somente mistura-se levemente o solo com a água, invertendo-se o frasco em que a solução se encontra. Após a sonicação, despeja-se a suspensão em uma peneira de 0,105mm e lava-se delicadamente, dentro de um Becker de 1000mL, para não desmanchar os agregados que não dispersaram no ultrassom. O volume não pode ultrapassar os 1000mL. Os agregados e a areia que ficaram retidos na peneira devem ser transferidos para latas previamente pesadas e levados à estufa para obtenção do peso. A solução “lavada”, restante no Becker de 1000mL deve ser levada à uma proveta de 1000mL e caso necessário, completa-se o volume com água. Por último procede-se o método de análise granulométrica da Pipeta, pipetando-se somente a fração argila. Desta forma, obtém-se uma quantidade de argila para cada ponto da curva. Sendo este procedimento realizado em cada ponto da curva, obtém-se a curva de dispersão.

**Apêndice E.** Teores de carbono orgânico total (COT), substâncias não húmicas (SNH), substâncias húmicas (SH), ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (HU) da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão e cultivado por seis anos com diferentes coberturas vegetais.

Tratamento	Bloco	COT	SNH	SH	AF	AH	HU
-----g kg <sup>-1</sup> -----							
T1	1	13,30	0,391	3,55	2,06	1,49	9,36
T1	2	12,70	0,485	4,88	2,21	2,68	7,33
T1	3	19,00	0,557	5,94	3,10	2,83	12,51
T1	4	15,00	0,421	4,50	2,48	2,02	10,08
T2	1	12,80	0,422	3,86	1,94	1,92	8,51
T2	2	9,80	0,351	2,31	1,53	0,77	7,14
T2	3	15,90	0,458	4,99	3,10	1,89	10,45
T2	4	10,50	0,331	3,43	2,08	1,35	6,73
T3	1	11,80	0,443	3,73	2,05	1,68	7,63
T3	2	10,50	0,434	3,70	2,18	1,52	6,36
T3	3	10,00	0,355	3,02	2,05	0,97	6,63
T3	4	11,50	0,381	2,78	1,98	0,80	8,34
T4	1	13,20	0,503	5,24	2,56	2,68	7,46
T4	2	13,40	0,470	4,79	2,10	2,68	8,15
T4	3	13,60	0,467	5,51	2,87	2,64	7,63
T4	4	14,10	0,625	6,16	3,44	2,71	7,32
T8	1	6,10	0,429	2,13	1,51	0,62	3,54
T8	2	8,70	0,364	2,25	1,62	0,63	6,09
T8	3	6,70	0,332	2,52	2,22	0,30	3,85
T8	4	7,20	0,300	2,07	1,83	0,24	4,83
T9	1	25,70	0,893	9,62	5,40	4,22	15,19
T9	2	29,10	1,078	13,66	7,22	6,44	14,36
T9	3	29,40	0,985	9,85	5,80	4,05	18,56
T9	4	32,20	1,046	10,21	5,99	4,23	20,94
CV(%)		14,07*	14,24*	18,02*	15,09*	26,10*	16,26*

Hemártria (T1), Pensacola (T2), Tifton (T3), Braquiária (T4), Solo construído descoberto (T8) e Solo natural (T9). \*Valores referentes aos tratamentos T1, T2, T3 e T4.

**Apêndice F.** Estoques de carbono orgânico total (COT), substâncias não húmicas (SNH), substâncias húmicas (SH), ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (HU) da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão e cultivado por seis anos com diferentes coberturas vegetais.

Tratamento	Bloco	COT	SNH	SH	AF	AH	HU
-----Estoques Mg ha <sup>-1</sup> -----							
T1	1	5,29	0,156	1,41	0,82	0,59	3,72
T1	2	5,12	0,195	1,97	0,89	1,08	2,95
T1	3	7,10	0,208	2,22	1,16	1,06	4,67
T1	4	6,15	0,172	1,84	1,02	0,83	4,13
T2	1	5,50	0,181	1,66	0,83	0,83	3,66
T2	2	4,17	0,150	0,98	0,65	0,33	3,04
T2	3	6,41	0,185	2,01	1,25	0,76	4,22
T2	4	4,32	0,136	1,41	0,86	0,56	2,77
T3	1	4,81	0,181	1,52	0,84	0,68	3,11
T3	2	4,40	0,182	1,55	0,91	0,64	2,67
T3	3	4,26	0,151	1,29	0,87	0,41	2,82
T3	4	4,91	0,163	1,19	0,85	0,34	3,56
T4	1	5,12	0,195	2,03	0,99	1,04	2,90
T4	2	5,62	0,197	2,01	0,88	1,12	3,42
T4	3	5,32	0,183	2,16	1,12	1,03	2,99
T4	4	5,43	0,241	2,37	1,33	1,04	2,82
T8	1	2,38	0,167	0,83	0,59	0,24	1,38
T8	2	3,76	0,157	0,97	0,70	0,27	2,63
T8	3	2,54	0,126	0,95	0,84	0,11	1,46
T8	4	3,04	0,127	0,87	0,77	0,10	2,04
T9	1	11,02	0,383	4,13	2,32	1,81	6,51
T9	2	11,50	0,426	5,40	2,85	2,55	5,68
T9	3	12,31	0,412	4,13	2,43	1,70	7,77
T9	4	13,96	0,453	4,43	2,59	1,83	9,08
CV (%)		13,37*	14,24*	18,02*	15,09*	26,10*	16,26*

Hemártria (T1), Pensacola (T2), Tifton (T3), Braquiária (T4), Solo construído descoberto (T8) e Solo natural (T9). \*Valores referentes aos tratamentos T1, T2, T3 e T4.

**Apêndice G.** Proporção de substâncias não húmicas (SNH), ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e humina (HU) em relação ao estoque de carbono orgânico total (COT) da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão e cultivado por seis anos com diferentes coberturas vegetais.

Tratamento	Bloco	SNH	AF	AH	HU
T1	1	2,94	15,51	11,20	70,35
T1	2	3,82	17,37	21,09	57,72
T1	3	2,93	16,33	14,92	65,82
T1	4	2,81	16,55	13,45	67,20
T2	1	3,30	15,17	15,01	66,52
T2	2	3,58	15,66	7,90	72,86
T2	3	2,88	19,52	11,88	65,71
T2	4	3,15	19,84	12,86	64,14
T3	1	3,76	17,39	14,22	64,63
T3	2	4,13	20,75	14,52	60,60
T3	3	3,55	20,46	9,73	66,25
T3	4	3,31	17,24	6,96	72,49
T4	1	3,81	19,37	20,32	56,49
T4	2	3,51	15,71	20,00	60,78
T4	3	3,43	21,08	19,41	56,08
T4	4	4,43	24,42	19,25	51,90
T8	1	7,03	24,75	10,19	58,03
T8	2	4,18	18,58	7,28	69,96
T8	3	4,95	33,14	4,42	57,49
T8	4	4,16	25,41	3,33	66,95
T9	1	3,47	21,02	16,41	59,09
T9	2	3,71	24,83	22,13	49,35
T9	3	3,35	19,72	13,79	63,14
T9	4	3,25	18,59	13,13	65,03

Hemátria (T1), Pensacola (T2), Tifton (T3), Braquiária (T4), Solo construído descoberto (T8) e Solo natural (T9).

**Apêndice H.** Teor de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), carbono da fração grosseira (CFG) e carbono associado aos minerais (CAM) da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão e cultivado por seis anos com diferentes coberturas vegetais.

Tratamentos	Bloco	COT	NT	CFG	CAM
-----g kg <sup>-1</sup> -----					
T1	1	13,30	0,63	6,23	7,07
T1	2	12,70	0,73	5,27	7,43
T1	3	19,00	0,87	10,20	8,80
T1	4	15,00	0,74	4,89	10,11
T2	1	12,80	0,74	4,78	8,02
T2	2	9,80	0,73	3,33	6,47
T2	3	15,90	0,80	7,56	8,34
T2	4	10,50	0,80	3,76	6,74
T3	1	11,80	0,77	4,33	7,47
T3	2	10,50	0,75	4,02	6,48
T3	3	10,00	0,70	2,87	7,13
T3	4	11,50	0,76	5,27	6,23
T4	1	13,20	0,92	6,37	6,83
T4	2	13,40	0,72	5,08	8,32
T4	3	13,60	0,79	6,36	7,24
T4	4	14,10	0,81	6,11	7,99
T8	1	6,10	0,61	0,80	5,30
T8	2	8,70	0,65	2,99	5,71
T8	3	6,70	0,50	2,22	4,48
T8	4	7,20	0,59	1,94	5,26
T9	1	25,70	1,41	9,88	15,82
T9	2	29,10	1,22	10,20	18,90
T9	3	29,40	1,09	10,31	19,09
T9	4	32,20	1,15	10,41	21,79
CV(%)		14,07*	9,68*	29,75*	12,65*

Hemátria (T1), Pensacola (T2), Tifton (T3), Braquiária (T4), Solo construído descoberto (T8) e Solo natural (T9). \*Valores referentes aos tratamentos T1, T2, T3 e T4.

**Apêndice I.** Estoque de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), carbono da fração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais (CAM) e proporção destas frações em relação ao estoque de carbono orgânico total da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão e cultivado por seis anos com diferentes coberturas vegetais.

Tratamento	Bloco	COT	NT	CFG	CAM	CFG/COT	CAM/COT
-----Mg ha <sup>-1</sup> -----							
T1	1	5,29	0,251	2,48	2,81	46,86	53,14
T1	2	5,12	0,294	2,13	2,99	41,53	58,47
T1	3	7,10	0,325	3,81	3,29	53,68	46,32
T1	4	6,15	0,303	2,00	4,14	32,58	67,42
T2	1	5,50	0,318	2,06	3,45	37,36	62,64
T2	2	4,17	0,311	1,42	2,75	34,01	65,99
T2	3	6,41	0,323	3,05	3,37	47,54	52,46
T2	4	4,32	0,329	1,55	2,77	35,84	64,16
T3	1	4,81	0,314	1,77	3,04	36,71	63,29
T3	2	4,40	0,314	1,68	2,72	38,24	61,76
T3	3	4,26	0,298	1,22	3,04	28,69	71,31
T3	4	4,91	0,325	2,25	2,66	45,86	54,14
T4	1	5,12	0,357	2,47	2,65	48,27	51,73
T4	2	5,62	0,302	2,13	3,49	37,94	62,06
T4	3	5,32	0,309	2,49	2,83	46,79	53,21
T4	4	5,43	0,312	2,35	3,08	43,31	56,69
T8	1	2,38	0,238	0,31	2,06	13,19	86,81
T8	2	3,76	0,281	1,29	2,46	34,41	65,59
T8	3	2,54	0,190	0,84	1,70	33,13	66,87
T8	4	3,04	0,247	0,82	2,22	26,88	73,12
T9	1	11,02	0,605	4,24	6,79	38,43	61,57
T9	2	11,50	0,481	4,03	7,47	35,05	64,95
T9	3	12,31	0,456	4,32	8,00	35,06	64,94
T9	4	13,96	0,498	4,51	9,45	32,32	67,68
CV (%)		13,37*	7,56*	26,14*	14,92*		

Hemátria (T1), Pensacola (T2), Tifton (T3), Braquiária (T4), Solo construído descoberto (T8) e Solo natural (T9). \*Valores referentes aos tratamentos T1, T2, T3 e T4.

**Apêndice J.** Teor de carbono orgânico total (COT), carbono da fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO) e fração pesada (FP) da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão e cultivado por seis anos com diferentes coberturas vegetais.

Tratamentos	Bloco	COT	FLL	FLO	FP
-----g kg <sup>-1</sup> -----					
T1	1	10,60	3,47	2,13	7,71
T1	2	9,40	3,05	2,46	7,19
T1	3	9,70	3,42	3,80	11,78
T1	4	10,70	2,40	2,69	9,91
T2	1	13,00	2,92	1,66	8,22
T2	2	11,40	1,68	1,41	6,71
T2	3	8,80	2,04	1,46	12,40
T2	4	15,40	1,51	1,31	7,67
T3	1	9,80	2,55	2,59	6,66
T3	2	14,10	1,74	2,61	6,15
T3	3	12,50	1,32	2,04	6,64
T3	4	14,50	2,28	2,51	6,71
T4	1	8,50	4,86	1,71	6,63
T4	2	10,90	2,12	1,97	9,31
T4	3	10,50	2,66	2,81	8,13
T4	4	8,90	3,21	2,16	8,72
T8	1	6,1	0,75	0,17	5,18
T8	2	8,7	0,89	0,16	7,65
T8	3	6,7	0,75	0,17	5,78
T8	4	7,2	0,62	0,17	6,40
T9	1	25,7	7,09	4,93	13,68
T9	2	29,1	6,33	4,45	18,32
T9	3	29,4	5,52	4,13	19,75
T9	4	32,2	6,37	4,30	21,53
CV(%)		14,07*	21,86*	20,96*	18,69*

Hemátria (T1), Pensacola (T2), Tifton (T3), Braquiária (T4), Solo construído descoberto (T8) e Solo natural (T9). \*Valores referentes aos tratamentos T1, T2, T3 e T4.

**Apêndice K.** Estoque de carbono orgânico total (COT), carbono da fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO), fração pesada (FP) e proporção destas frações em relação ao estoque de carbono orgânico total da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão e cultivado por seis anos com diferentes coberturas vegetais.

Tratamento	Bloco	COT	FLL	FLO	FP	FLL/COT	FLO/COT	FP/COT
		-----Mg ha <sup>-1</sup> -----						
T1	1	5,29	1,38	0,85	3,07	26,05	15,99	57,95
T1	2	5,12	1,23	0,99	2,90	24,02	19,40	56,58
T1	3	7,10	1,28	1,42	4,40	18,01	20,00	61,98
T1	4	6,15	0,98	1,10	4,06	16,00	17,93	66,07
T2	1	5,50	1,26	0,71	3,53	22,83	12,94	64,23
T2	2	4,17	0,72	0,60	2,86	17,18	14,39	68,43
T2	3	6,41	0,82	0,59	5,00	12,83	9,18	77,99
T2	4	4,32	0,62	0,54	3,16	14,42	12,51	73,08
T3	1	4,81	1,04	1,06	2,71	21,59	21,99	56,42
T3	2	4,40	0,73	1,09	2,58	16,61	24,82	58,57
T3	3	4,26	0,56	0,87	2,83	13,18	20,40	66,43
T3	4	4,91	0,98	1,07	2,86	19,87	21,83	58,31
T4	1	5,12	1,89	0,67	2,57	36,83	12,98	50,20
T4	2	5,62	0,89	0,83	3,90	15,81	14,71	69,48
T4	3	5,32	1,04	1,10	3,18	19,56	20,66	59,78
T4	4	5,43	1,24	0,83	3,36	22,79	15,35	61,86
T8	1	2,38	0,29	0,07	2,02	12,38	2,77	84,85
T8	2	3,76	0,38	0,07	3,30	10,22	1,88	87,90
T8	3	2,54	0,29	0,06	2,19	11,21	2,53	86,26
T8	4	3,04	0,26	0,07	2,70	8,67	2,42	88,91
T9	1	11,02	3,04	2,11	5,87	27,60	19,17	53,22
T9	2	11,50	2,50	1,76	7,24	21,75	15,31	62,94
T9	3	12,31	2,31	1,73	8,27	18,78	14,06	67,16
T9	4	13,96	2,76	1,87	9,33	19,78	13,37	66,85
CV (%)		13,37*	20,03*	18,97*	18,49*			

Hemátria (T1), Pensacola (T2), Tifton (T3), Braquiária (T4), Solo construído descoberto (T8) e Solo natural (T9). \*Valores referentes aos tratamentos T1, T2, T3 e T4.

**Apêndice L.** Teor de carbono orgânico total (COT), carbono da ração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais (CAM) e proporção destas frações em relação ao estoque de carbono orgânico total da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão e cultivado por dois anos com diferentes coberturas vegetais.

Tratamentos	Bloco	COT	NT	CFG	CAM
-----g kg <sup>-1</sup> -----					
T1	1	10,60	0,59	4,29	6,31
T1	2	9,40	0,70	2,36	7,04
T1	3	9,70	0,64	2,57	7,13
T1	4	10,70	0,65	4,47	6,23
T2	1	13,00	0,80	7,10	5,90
T2	2	11,40	0,75	4,11	7,29
T2	3	8,80	0,65	3,25	5,55
T2	4	15,40	0,81	7,36	8,04
T3	1	9,80	0,78	3,11	6,69
T3	2	14,10	0,78	4,45	9,65
T3	3	12,50	0,88	3,53	8,97
T3	4	14,50	0,93	5,08	9,42
T4	1	8,50	0,58	1,76	6,74
T4	2	10,90	0,71	2,52	8,38
T4	3	10,50	0,64	3,18	7,32
T4	4	8,90	0,42	2,28	6,62
T5	1	8,7	0,60	2,29	6,41
T5	2	11,4	0,68	3,56	7,84
T5	3	10,9	0,71	3,25	7,65
T5	4	9,7	0,63	2,82	6,88
T6	1	11,7	0,68	2,99	8,71
T6	2	11,2	0,65	5,02	6,18
T6	3	8,3	0,63	2,24	6,06
T6	4	9,1	0,70	3,26	5,84
T8	1	6,1	0,61	0,80	5,30
T8	2	8,7	0,65	2,99	5,71
T8	3	6,7	0,50	2,22	4,48
T8	4	7,2	0,59	1,94	5,26
T9	1	25,7	1,41	9,88	15,82
T9	2	29,1	1,22	10,20	18,90
T9	3	29,4	1,09	10,31	19,09
T9	4	32,2	1,15	10,41	21,79
CV(%)		16,28*	11,23*	32,53*	14,48*

Vaqueiro (T1), Braquiária Brizantha (T2), Tanzânia (T3), Braquiária Humidícola (T4), Hemátria (T5), Tifton (T6), solo construído descoberto (T8) e solo natural (T9). \*Valores referentes aos tratamentos T1, T2, T3, T4, T5 e T6.

**Apêndice M.** Estoque de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), carbono da ração grosseira (CFG), carbono associado aos minerais (CAM) e proporção destas frações em relação ao estoque de carbono orgânico total da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão e cultivado por dois anos com diferentes coberturas vegetais.

Tratamentos	Bloco	COT	NT	CFG	CAM	CFG/COT	CAM/COT
-----Mg ha <sup>-1</sup> -----							
T1	1	4,76	0,265	1,93	2,84	40,46	59,54
T1	2	4,46	0,332	1,12	3,34	25,13	74,87
T1	3	3,86	0,255	1,02	2,84	26,45	73,55
T1	4	4,80	0,291	2,00	2,79	41,78	58,22
T2	1	5,37	0,330	2,93	2,44	54,62	45,38
T2	2	5,08	0,334	1,83	3,25	36,06	63,94
T2	3	3,46	0,256	1,28	2,18	36,88	63,12
T2	4	6,37	0,335	3,04	3,32	47,79	52,21
T3	1	4,35	0,346	1,38	2,97	31,70	68,30
T3	2	5,93	0,328	1,87	4,06	31,56	68,44
T3	3	5,33	0,375	1,50	3,83	28,22	71,78
T3	4	6,15	0,394	2,16	3,99	35,06	64,94
T4	1	3,61	0,246	0,75	2,86	20,66	79,34
T4	2	4,78	0,311	1,10	3,67	23,11	76,89
T4	3	4,16	0,254	1,26	2,90	30,33	69,68
T4	4	3,80	0,179	0,98	2,83	25,65	74,35
T5	1	4,02	0,277	1,06	2,96	26,28	73,72
T5	2	4,39	0,262	1,37	3,02	31,25	68,75
T5	3	4,86	0,317	1,45	3,41	29,84	70,16
T5	4	4,01	0,260	1,17	2,84	29,10	70,90
T6	1	5,09	0,296	1,30	3,79	25,56	74,44
T6	2	4,38	0,254	1,96	2,42	44,82	55,18
T6	3	3,67	0,279	0,99	2,68	27,01	72,99
T6	4	3,88	0,299	1,39	2,49	35,86	64,14
T8	1	2,38	0,238	0,31	2,06	13,19	86,81
T8	2	3,76	0,281	1,29	2,46	34,41	65,59
T8	3	2,54	0,190	0,84	1,70	33,13	66,87
T8	4	3,04	0,247	0,82	2,22	26,88	73,12
T9	1	11,02	0,605	4,24	6,79	38,43	61,57
T9	2	11,50	0,481	4,03	7,47	35,05	64,95
T9	3	12,31	0,456	4,32	8,00	35,06	64,94
T9	4	13,96	0,498	4,51	9,45	32,32	67,68
CV (%)		15,66*	13,02*	30,26*	15,59*		

Vaqueiro (T1), Braquiária Brizantha (T2), Tanzânia (T3), Braquiária Humidícola (T4), Hemátria (T5), Tifton (T6), solo construído descoberto (T8) e solo natural (T9). \*Valores referentes aos tratamentos T1, T2, T3, T4, T5 e T6.

**Apêndice N.** Teor de carbono orgânico total (COT), carbono da fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO), fração pesada (FP) e proporção destas frações em relação ao COT da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão e cultivado por dois anos com diferentes coberturas vegetais.

Tratamentos	Bloco	COT	FLL	FLO	FP
		-----g kg <sup>-1</sup> -----			
T1	1	10,60	1,18	0,75	8,67
T1	2	9,40	1,14	1,01	7,24
T1	3	9,70	1,90	1,31	6,49
T1	4	10,70	1,07	1,84	7,79
T2	1	13,00	2,76	3,86	6,38
T2	2	11,40	1,34	2,09	7,97
T2	3	8,80	2,05	1,08	5,67
T2	4	15,40	3,15	2,58	9,68
T3	1	9,80	1,75	1,20	6,85
T3	2	14,10	1,73	2,59	9,79
T3	3	12,50	1,35	1,63	9,52
T3	4	14,50	2,83	2,26	9,41
T4	1	8,50	1,00	0,63	6,87
T4	2	10,90	1,31	0,78	8,81
T4	3	10,50	1,31	1,45	7,75
T4	4	8,90	0,75	0,70	7,46
T5	1	8,7	0,55	0,83	7,32
T5	2	11,4	1,30	1,77	8,33
T5	3	10,9	0,92	1,95	8,03
T5	4	9,7	0,82	1,17	7,71
T6	1	11,7	1,38	1,82	8,50
T6	2	11,2	1,39	1,27	8,54
T6	3	8,3	0,45	0,98	6,87
T6	4	9,1	1,85	1,78	5,47
T8	1	6,1	0,75	0,17	5,18
T8	2	8,7	0,89	0,16	7,65
T8	3	6,7	0,75	0,17	5,78
T8	4	7,2	0,62	0,17	6,40
T9	1	25,7	7,09	4,93	13,68
T9	2	29,1	6,33	4,45	18,32
T9	3	29,4	5,52	4,13	19,75
T9	4	32,2	6,37	4,30	21,53
CV(%)		16,28*	37,21*	44,63*	15,65*

Vaqueiro (T1), Braquiária Brizantha (T2), Tanzânia (T3), Braquiária Humidícola (T4), Hemátria (T5), Tifton (T6), solo construído descoberto (T8) e solo natural (T9). \*Valores referentes aos tratamentos T1, T2, T3, T4, T5 e T6.

**Apêndice O.** Estoque de carbono orgânico total (COT), carbono da fração leve livre (FLL), fração leve oclusa (FLO), fração pesada (FP) e proporção destas frações em relação ao COT da camada de 0,00 a 0,03m de um solo construído após a mineração de carvão e cultivado por dois anos com diferentes coberturas vegetais.

Tratamentos	Blocos	COT	FLL	FLO	FP	FLL/COT	FLO/COT	FP/COT
		-----Mg ha <sup>-1</sup> -----						
T1	1	4,76	0,53	0,34	3,89	11,15	7,10	81,75
T1	2	4,46	0,54	0,48	3,44	12,15	10,79	77,07
T1	3	3,86	0,76	0,52	2,58	19,61	13,51	66,88
T1	4	4,80	0,48	0,82	3,49	10,03	17,16	72,81
T2	1	5,37	1,14	1,59	2,64	21,23	29,70	49,08
T2	2	5,08	0,60	0,93	3,55	11,75	18,35	69,90
T2	3	3,46	0,81	0,42	2,23	23,33	12,24	64,43
T2	4	6,37	1,30	1,07	4,00	20,42	16,73	62,84
T3	1	4,35	0,78	0,53	3,04	17,86	12,29	69,85
T3	2	5,93	0,73	1,09	4,12	12,24	18,34	69,42
T3	3	5,33	0,57	0,70	4,06	10,78	13,08	76,14
T3	4	6,15	1,20	0,96	3,99	19,50	15,62	64,88
T4	1	3,61	0,42	0,27	2,92	11,77	7,42	80,81
T4	2	4,78	0,57	0,34	3,86	11,99	7,15	80,87
T4	3	4,16	0,52	0,57	3,07	12,43	13,78	73,79
T4	4	3,80	0,32	0,30	3,19	8,40	7,83	83,77
T5	1	4,02	0,25	0,38	3,38	6,31	9,53	84,16
T5	2	4,39	0,50	0,68	3,21	11,40	15,52	73,08
T5	3	4,86	0,41	0,87	3,58	8,45	17,90	73,65
T5	4	4,01	0,34	0,48	3,18	8,43	12,08	79,48
T6	1	5,09	0,60	0,79	3,70	11,81	15,54	72,64
T6	2	4,38	0,54	0,50	3,34	12,40	11,35	76,25
T6	3	3,67	0,20	0,44	3,04	5,42	11,87	82,72
T6	4	3,88	0,79	0,76	2,33	20,30	19,56	60,14
T8	1	2,38	0,29	0,07	2,02	12,38	2,77	84,85
T8	2	3,76	0,38	0,07	3,30	10,22	1,88	87,90
T8	3	2,54	0,29	0,06	2,19	11,21	2,53	86,26
T8	4	3,04	0,26	0,07	2,70	8,67	2,42	88,91
T9	1	11,02	3,04	2,11	5,87	27,60	19,17	53,22
T9	2	11,50	2,50	1,76	7,24	21,75	15,31	62,94
T9	3	12,31	2,31	1,73	8,27	18,78	14,06	67,16
T9	4	13,96	2,76	1,87	9,33	19,78	13,37	66,85
CV (%)		15,66*	34,49*	43,53*	16,55*			

Vaqueiro (T1), Braquiária Brizantha (T2), Tanzânia (T3), Braquiária Humidícola (T4), Hemátria (T5), Tifton (T6), solo construído descoberto (T8) e solo natural (T9). \*Valores referentes aos tratamentos T1, T2, T3, T4, T5 e T6.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.  
This page will not be added after purchasing Win2PDF.