

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**CARBONO TOTAL E ABUNDÂNCIA NATURAL DE ^{13}C EM
PERFIS DE SOLO SOB PLANTIO DE EUCALIPTO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Fabiane Figueiredo Severo

Santa Maria, RS, Brasil

2015

CARBONO TOTAL E ABUNDÂNCIA NATURAL DE ^{13}C EM PERFIS DE SOLO SOB PLANTIO DE EUCALIPTO

por

Fabiane Figueiredo Severo

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Química e Fertilidade do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo.**

Orientador: Prof. Dr. Leandro Souza da Silva

**Santa Maria, RS, Brasil
2015**

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**CARBONO TOTAL E ABUNDÂNCIA NATURAL DE ^{13}C EM PERFIS
DE SOLO SOB PLANTIO DE EUCALIPTO**

elaborada por
Fabiane Figueiredo Severo

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Leandro Souza da Silva, Dr.
(Presidente/Orientador)

Frederico Costa Beber Vieira, Dr. (UNIPAMPA)

Sandro José Giacomini, Dr. (UFSM)

Santa Maria, Julho de 2015.

Este trabalho é dedicado
ao meu Luiz Fernando,
meu amor, meu melhor amigo...

AGRADECIMENTOS

À Deus, por agraciar-me com saúde para que eu pudesse trilhar o meu caminho, por presentear-me com a amizade de tantas pessoas de bom coração, por permitir que eu realize um sonho acalentado por anos e que parecia-me impossível.

Aos meus pais, Alírio e Vilma, por me ensinarem que tudo na vida é fruto de trabalho árduo e honesto por meio de seus exemplos, por me mostrarem que além de vencer na vida, é preciso vencer de forma limpa e justa, nunca prejudicando os demais.

Ao meu marido Luiz Fernando, por ser meu maior incentivador e meu maior ouvinte, por me auxiliar com a coleta das amostras, com os gráficos, com todos os desafios do dia-a-dia. Graças a ti, o meu sonho da pós-graduação torna-se real. Eu te amo.

Ao meu orientador Prof Leandro, pela amizade, pela ajuda, pela disponibilidade, pelas palavras que acalmam, pela paciência de ouvir meus devaneios científicos, por compartilhar de forma brilhante tantos conceitos aos seus alunos, por ser ético e principalmente por ser humano, respeitando e auxiliando sempre a todos.

Ao Prof Sandro Giacomini pela amizade, por me apoiar sempre ao longo do curso e por sempre estar disposto a contribuir de forma positiva. Obrigada pela generosidade.

Ao Prof Galileo Buriol, por gentilmente ceder a área para a coleta das amostras, participando do processo de coleta e me ajudando com informações de manejo do local.

Ao Stefen Pujol e André Friderichs pela convivência junto ao “massas”, pela ajuda na realização das análises e pelos nossos infinitos testes. Aprendi muito com vocês.

Ao Prof Frederico Costa Beber Vieira pela disponibilidade de ser avaliador nesta banca.

Aos meus amigos por auxiliarem na coleta dos solos e classificação dos perfis, Luis Antônio, Pedro Paulo e Rafael Busanello. Volto a dizer: sem vocês, eu não conseguiria.

Às minhas queridas Natália Aita e Laila Marques por me auxiliarem na coleta e nas análises de caracterização, por dividir tantas angústias, desesperos e risadas comigo. Adoro vocês!

Ao Jorge Oliveira da Thermo Fisher Scientific, por nos auxiliar com informações a respeito do equipamento e por sempre estar disponível para responder a tantas dúvidas.

Aos professores Alberto Cargnelutti Filho, Rodrigo Salazar e Adriane Guarienti pelo auxílio com a parte estatística da dissertação.

A todos os colegas do curso que eu tive o prazer de conviver ao longo deste período e em especial a Janaína Heinzen, Janielly Moscoso, Daniela Santos, Luís Antônio, Pedro Paulo, Max Dantas, Angélica Bonumá e Guilherme Dietrich. Vocês tornaram o meu caminho mais leve!

Aos professores da pós-graduação pelos conhecimentos compartilhados, Gustavo Brunetto, Celso Aita, Jean Minella, Rodrigo Jacques, Paulo Gubiani, Ricardo Dalmolin, Fabrício Pedron e Carlos Ceretta.

Ao secretário do depto de solos Heverton, por sempre estar disposto a auxiliar, pelas palavras animadoras e pelas histórias engraçadas.

A UFSM por garantir um ensino público de qualidade.

Ao CNPq e a FAPERGS pela concessão de bolsa de estudos e verbas para o laboratório.

A todos aqueles que não foram citados, mas que, de alguma forma ou outra, auxiliaram para que este trabalho fosse possível.

Além de conhecer o mundo da ciência do solo, tive a possibilidade de comprovar mais uma vez que nesta vida não conseguimos realizar nada sozinhos.

Obrigada a todos, de coração!

“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe.”

Leonardo da Vinci

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

CARBONO TOTAL E ABUNDÂNCIA NATURAL DE ^{13}C EM PERFIS DE SOLO SOB PLANTIO DE EUCALIPTO

AUTORA: FABIANE FIGUEIREDO SEVERO

ORIENTADOR: LEANDRO SOUZA DA SILVA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 17 de julho de 2015.

O plantio de eucaliptos é uma prática comum em áreas antes utilizadas para a pecuária extensiva na metade sul do Rio Grande do Sul (RS), porém tal cultivo levanta muitos questionamentos acerca de influência sobre a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS). Uma avaliação se tornou possível graças ao ciclo fotossintético do eucalipto, que assim como nas demais espécies arbóreas é C3 e na maioria das gramíneas é C4. Plantas de ciclo C4 utilizam o ^{13}C (isótopo pesado do carbono) no processo de fotossíntese, enquanto que plantas com ciclo C3 relativamente distinguem o ^{13}C do ar, gerando MOS com diferentes abundâncias isotópicas. O presente estudo avaliou os teores de C total e a abundância isotópica de ^{13}C em perfis do solo sob plantio de eucaliptos localizados na depressão central do RS de diferentes idades (2, 10 e 21 anos), em uma área de regeneração natural e em campo de pastagem natural, bem como estimou a contribuição na conversão da MOS em função de cada vegetação. O manejo inicial de todas as áreas amostradas era de pastagem natural. No perfil foram avaliadas as seguintes camadas: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-70 e 70-90 cm. A análise da abundância isotópica de ^{13}C no solo e dos tecidos vegetais foi feita por espectrometria de massas. Após 2 anos do plantio de eucaliptos, a camada superficial apresentou aumento de carbono em relação a sua camada subsuperficial e o início do processo de conversão do carbono da pastagem possivelmente tenha começado a ocorrer nesta camada superficial (0-5 cm). No plantio de 10 anos ocorreu uma diminuição da MOS entre as camadas até os 20 cm iniciais e o processo de conversão da MOS entre pastagem e eucalipto mostra-se até esta profundidade. Após 21 anos de plantio, todo o perfil já sofreu alteração pelo plantio de eucaliptos, tendo em sua camada superficial o maior valor de carbono proveniente do cultivo de eucaliptos (90,4%). Na área em que ocorreu regeneração natural, o maior teor de carbono na camada superficial foi observado (3,53%) e isto pode ser decorrente da maior diversidade da composição química do material depositado. Nesta área, existem indicativos de que o processo da ciclagem da MOS também tenha atingido todas as camadas do perfil através dos resíduos aportados pelas espécies arbóreas nativas.

Palavras-chave: isótopos, C3, C4.

ABSTRACT

Master Dissertation
Post-Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

TOTAL CARBON AND ABUNDANCE OF NATURAL ^{13}C IN SOIL PROFILES UNDER EUCALYPTUS PLANTATION

AUTHOR: FABIANE FIGUEIREDO SEVERO

ADVISER: LEANDRO SOUZA DA SILVA

Defense Place and Date: Santa Maria, July 17th, 2015.

The planting of eucalyptus is a common practice in areas previously used for extensive livestock farming in the southern half of Rio Grande do Sul (RS), but such cultivation raises many questions about its influence on the dynamics of soil organic matter (SOM). An evaluation was made possible due to the photosynthetic cycle of eucalyptus, which as in other tree species are C3 and in most grasses is C4. C4 cycle plants use ^{13}C (carbon heavy isotope) in photosynthesis, while plants with C3 cycle make distinction of ^{13}C of the air, generating MOS with different isotopic abundances. This study evaluated the overall carbon content and the isotopic abundance of ^{13}C in soil profiles under eucalyptus plantation of different ages (2, 10 and 21), in a natural regeneration area and natural grass field as well as estimated the contribution to the conversion of SOM according to each vegetation. The initial management of all sampled areas was natural pasture. In profile the following layers were evaluated: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-70 and 70-90 cm. The ^{13}C isotopic abundance of soil and plant tissue was performed by mass spectrometry. After two years of planting eucalyptus, the surface layer showed an increase of carbon relative to its subsurface layer and the beginning of pasture carbon conversion process possibly has begun to occur in this surface layer (0-5 cm). In 10 years of planting it occurred a decrease of SOM between the layers until the initial 20 cm and the MOS conversion process between pasture and eucalyptus shows up to this depth. After 21 years of planting, the whole profile has undergone change by planting eucalyptus trees, taking in its surface layer the higher carbon value from the eucalyptus cultivation (90.4%). In the area where there was a natural regeneration, the higher carbon content in the surface layer was observed (3.53%) and this may be due to the greater diversity of the chemical composition of the deposited material. In this area, there are indications that the MOS cycling process has reached all the profile layers through the waste contributed by the native tree species.

Key words: isotopes, C3, C4.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Extensão do bioma Pampa.	14
Figura 2: Espectrômetro de massas.....	26
Figura 3: Vista aérea da área de coleta do solo. E1 – plantio de 2 anos; E2 – plantio de 10 anos; E3 – plantio de 21 anos; RN – regeneração natural; CN – campo nativo	31
Figura 4: Perfil da área E1 com presença de rocha aos 50 cm.	33
Figura 5: Valores do C da matéria orgânica do solo convertidos ao longo do tempo em plantios de eucalipto. CN – campo nativo; E1 – plantio de 2 anos; E2 – plantio de 10 anos; E3 – plantio de 21 anos.	46
Figura 6: Valores de C provenientes de pastagem (CN) em relação ao tempo de plantio de eucaliptos na camada superficial (0-5 cm). CN – campo nativo; E1 – plantio de 2 anos; E2 – plantio de 10 anos; E3 – plantio de 21 anos.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Abundância natural dos isótopos estáveis dos elementos C, H, O, N e S e suas moléculas gasosas comumente utilizadas na espectrometria de massa.	23
Tabela 2: Razão isotópica absoluta dos padrões internacionais.....	24
Tabela 3: Características de plantas C3 e C4.....	29
Tabela 4: Teores de C no campo nativo (CN), plantios de eucalipto (E1, E2 e E3) com diferentes idades e área de regeneração natural (RN).....	37
Tabela 5: Valores de probabilidade (p) do teste T (Student) obtidos nas comparações de valores de carbono entre pares de camadas adjacentes do perfil do solo em um mesmo local.....	38
Tabela 6: Valores de probabilidade (p) do teste T (Student) obtidos nas comparações de valores de carbono entre pares de diferentes locais em uma mesma camada do perfil do solo.....	41
Tabela 7: Abundância Isotópica de ¹³ C e % de carbono provenientes de diferentes manejos da área.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Bioma Pampa	14
2.1.1	Vegetação do bioma Pampa.....	15
2.1.2	Solos do bioma Pampa.....	17
2.2	Plantio de eucaliptos no bioma Pampa do RS.....	18
2.3	Dinâmica da MOS em áreas florestadas	21
2.4	Isótopos e abundância natural do carbono.....	22
2.5	Metodologia para avaliação de isótopos	25
2.6	Plantas C3 e C4 e a razão isotópica do carbono.....	27
2.7	Modelo de mistura isotópica.....	30
3	MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1	Local e procedimentos de coleta de solo e tecido vegetal	31
3.2	Preparo das amostras	33
3.3	Análises químicas.....	34
3.4	Tratamento estatísticos dos resultados	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS.....	51
	APÊNDICE A – Coleta na área de plantio de 21 anos (E3)	61
	APÊNDICE B – Coleta em área de campo nativo (CN).....	62
	APÊNDICE C – Acondicionamento das amostras.....	63
	APÊNDICE D – Protocolo para preparo, pesagem e tratamento estatístico dos resultados.....	64
	APÊNDICE E – Espectrômetro de massas – LabCEN - UFSM	66
	APÊNDICE F – Caracterização química e física das amostras.....	67

1 INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo (MOS) pode ser uma ferramenta auxiliar na identificação do tipo da vegetação no passado, principalmente através da composição isotópica do carbono (C) e do nitrogênio (N). A abundância natural de ^{13}C permite caracterizar a MOS e está relacionada com a via fotossintética de fixação de isótopos de C da vegetação predominante. Plantas do tipo C_3 discriminam o ^{13}C em relação ao ^{12}C , gerando no solo teores menores de ^{13}C ; e plantas do tipo C_4 fixam o ^{13}C em maiores proporções do que as do tipo C_3 , o que gera no solo maior abundância natural de ^{13}C (GOLCHIN et al., 1995; MARTINELLI et al., 2009). A variação na abundância natural de ^{13}C tem sido empregada para avaliar o impacto de usos e manejos distintos do solo em frações da MOS em vários locais do Brasil (SÁ et al., 2001; SISTI et al., 2004; COSTA et al 2009).

Nesse contexto, o cultivo de eucalipto (tipo C_3) sobre áreas de campo nativo (predominam espécies C_4) possui grande importância econômica no Rio Grande do Sul (RS), pois fornece madeira às produções de lâminas, compensados, aglomerados, carvão vegetal, madeira serrada, celulose e móveis, além de outros produtos extraídos como óleos essenciais e para a produção de mel. Muitas das áreas de campos nativos na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul passaram a ser cultivadas com o eucalipto. Isso ocorreu com o incentivo governamental como uma forma de melhorar as condições econômicas desta região. O plantio do eucalipto no RS é alvo de críticas e os motivos são variados, mas ressecamento e empobrecimento nutricional do solo são os mais apontados. Em alguns locais, Leite et al. (2010) verificaram que, após vários ciclos de eucalipto, os níveis de MOS foram recuperados, mas para patamares intermediários entre os notados em áreas de pastagens degradadas e de solos sob matas nativas.

A avaliação do carbono total pode indicar se o solo da área sofreu perdas/aporte no teor da MOS ao longo de seu perfil após um histórico de anos de cultivo. Um estudo comparativo poderá ser feito em relação a uma área de campo nativo adjacente ao cultivado por este representar as condições naturais do ambiente. Utilizando a metodologia de espectrometria de massa de razões isotópicas (IRMS) também é possível conhecer valores de abundância natural isotópica do ^{13}C e, a partir disto, conhecer e avaliar também a contribuição de plantio

de eucaliptos na dinâmica da MOS no perfil do solo ao longo do tempo de cultivo. Isto se permite através das diferenças entre as vias fotossintéticas (C3 e C4) das vegetações implantadas sobre a área cultivada.

Portanto, o objetivo deste estudo foi de quantificar e relacionar o carbono total ao longo do perfil e entre solos cultivados com eucaliptos em diferentes idades de cultivo, área de regeneração natural e pastagem adjacente nas mesmas condições anteriores ao plantio; estimar a participação de cada tipo de manejo no aporte de matéria orgânica do solo avaliado a partir dos valores de abundância isotópica natural de ^{13}C e estruturar um protocolo para análise da abundância isotópica de ^{13}C em solos e tecidos vegetais que auxilie com informações como: amostragem, preparação das amostras, pesagem e tratamento estatístico dos resultados analíticos obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Bioma Pampa

O termo bioma possui várias definições, sendo que uma das mais atuais é fornecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2004):

Um conjunto de vida (vegetal e animal) definida pelo agrupamento de tipos de vegetação contíguos e identificáveis em escala regional, com condições geoclimáticas similares e história compartilhada de mudanças, resultando em uma diversidade biológica própria.

O Bioma Pampa no Brasil ocorre somente no estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), ocupa cerca de 63% de seu território e possui continuidade em território uruguaio e argentino. Sua formação vegetacional principal é composta por campos dominados por gramíneas. Existe a ocorrência de campos de grande extensão com relevo suave (região central do estado), forte-ondulado (serra do sudeste) e planos (litoral e divisa com a Argentina) (BOLDRINI et al., 2010).

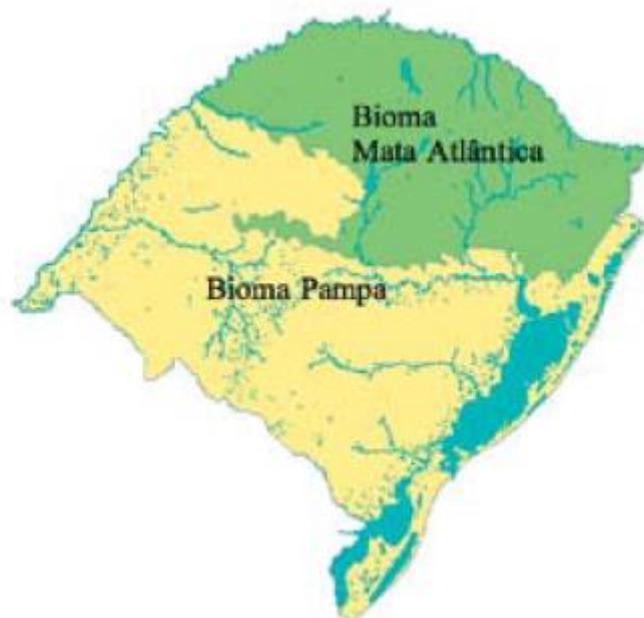


Figura 1: Extensão do bioma Pampa.

Fonte: Pillar et al. (2009).

O Pampa possui clima subtropical ao longo do ano (em média 18 °C ao longo do ano). No verão existe tendência às secas, em especial na fronteira-oeste sentido interior do estado. A vegetação natural é apropriada para criação extensiva de gado (HASENACK, 2009). Atualmente, a vegetação campestre original já foi descaracterizada em torno de 51% (ou um pouco mais de 64.000km²) a partir da ação humana para urbanização e atividades econômicas (HASENACK et al., 2006).

2.1.1 Vegetação do bioma Pampa

O trabalho de Pillar et al. (2009) descreve as diversas singularidades dos campos no bioma Pampa que, por vezes, pode parecer simples e com poucos tipos de vegetação, porém é um bioma muito complexo. A maioria de sua flora é constituída por áreas extensas de campos com florestas às margens dos rios. Os tipos de campos descritos na literatura e pertencentes a este bioma são os campos de barba-de-bode do Planalto, os solos rasos e fundos da Campanha, os campos de areia, os campos da Depressão Central e os campos litorâneos.

Os campos de barba-de-bode perfazem uma diminuta fração na área do bioma Pampa. Atualmente existem poucos destes campos no noroeste do estado devido à conversão da cobertura vegetal original em detrimento a pecuária. São espécies vegetativas em sua maioria com metabolismo fotossintético C4. As principais gramíneas deste tipo de campo são: capim-forquilha (*Paspalum notatum*) e grama-missioneira (*Axonopus jesuiticus*). Nos locais úmidos, como nas bordas de banhados vegetam espécies estoloníferas como a grama-tapete (*A.affinis*) e rizomatosas como *P. pumilum*.

Os campos de solos rasos estão situados na região da fronteira-oeste e caracterizam-se por originarem-se do basalto. São pedregosos, possuem baixa retenção de umidade e sofrem déficit hídrico no verão. Embora tenha uma grande parte do solo descoberto, habitam dentre as gramíneas, as espécies: *Aristida murina*, *A. uruguayensis*, *Bouteloua megapotamica*, *Eustachys brevipila*, e leguminosas como a *Adesmia incana*, *Indigofera asperifolia*, *Mimosa amphigena* e *Rhynchosia diversifolia*. Nos campos onde os solos são um pouco mais profundos existe uma baixa percentagem de solo descoberto. A vegetação apresenta-se contínua com gramíneas, como *Paspalum notatum* (capim-forquilha) e *Axonopus*

affinis (grama-tapete) e algumas leguminosas, como *Arachis burkartii* (amendoim-nativo) e *Adesmia bicolor* (babosa-do-campo). O miomio (*Baccharis coridifolia*), espécie tóxica, que geralmente não é consumida pelas ovelhas, também se faz presente neste tipo de campo.

Os campos de solos profundos estão a sudoeste do Estado e encontram-se sobre vários tipos de solos: chernossolos, vertissolos e planossolos. São solos mais férteis e possuem cerca de 29% de sua vegetação constituída de gramíneas, dentre as principais: capim-forquilha (*Paspalum notatum*), capim-caninha (*Andropogon lateralis*), cola-de-lagarto (*Coelorachis selloana*), e o capim-melador (*Paspalum dilatatum*). Quando em solos férteis, a flechilha (*Stipahyalina*, *S. papposa*, *S. setigera*) e os cabelos-de-porco (*Piptochaetium bicolor*, *P. stipoides*, *P. uruguense*) marcam representativa presença. Dentre as leguminosas, fazem-se presentes no campo os trevos nativos (*Trifolium polymorphum*) e as babosas (*Adesmia bicolor*, *A. securigerifolia*, *A. punctata* e *A. latifolia*). *Adesmia securigerifolia* (Fabaceae) e *Setaria globulifera* (Poaceae) são endêmicas dos campos de Bagé. As gramíneas do tipo C3 aqui são mais representativas que em demais regiões do estado.

Os campos dos areais ficam no centro-oeste do Rio Grande do Sul. *Axonopus argentinus*, *Elyonurus* sp. (o capim-limão) e *Paspalum nicorae* são espécies que configuram o cenário natural desta área. No verão, os fatores ambientais são muito severos: estiagem, chuvas torrenciais e temperaturas altas. Neste ambiente, as partes aéreas apresentam-se com muita pilosidade ou com folhas coriáceas ou cerosase glandulares, adaptações a fim de suportarem altas temperaturas, falta de água e ventos fortes e reduzir a evapotranspiração. Em meio ao solo arenoso, é comum o aparecimento da *Lupinus albescens* que indica, com o seu florescimento, a recuperação da fertilidade do solo

Os campos do centro do Estado ficam entre o planalto sul rio-grandense e o planalto sul-brasileiro e possuem vegetação tropical e subtropical. Dificilmente estes campos apresentam solo descoberto, pois as espécies dominantes presentes são rizomatosas, em especial o capim-forquilha (*Paspalum notatum*) em partes altas e a grama-tapete (*Axonopus affinis*), uma estolonífera nas baixadas úmidas. O solo descoberto pode aparecer em solos com sobrepastoreio, então as sementes das compostas, que existem em grande número neste cenário, germinam. Exemplos

disso são a roseta (*Soliva pterosperma*), o alecrim-do-campo (*Vernonia nudiflora*) e a maria-mole (*Senecio brasiliensis*).

Nos campos litorâneos, as gramíneas ocorrem em solos medianamente drenados e as ciperáceas em solos mal drenados. Esta é a característica principal destes solos e, em comparação com o restante dos campos presentes no bioma Pampa, possui a menor riqueza de espécies. Estes campos desenvolveram poucos endemismos, no entanto, pode-se destacar *Axonopus parodii*, que presente nos solos externos às lagoas, *Cunila fasciculata* (Lamiaceae) no litoral norte, *Gomphrena sellowiana* (Amaranthaceae) e *Onira unguiculata* (Iridaceae) no litoral sul. *Vernonia constricta* (Asteraceae) e *Setaria stolonifera* (Poaceae) são outras espécies exclusivas.

2.1.2 Solos do bioma Pampa

O estudo de Boldrini et al. (2010) apresenta as diversificadas classes de solos do bioma. Nesta área, é possível encontrar as seguintes classes: Neossolos, Gleissolos, Latossolos, Planossolos, Argissolos, Vertissolos, Chernossolos Luvisolos e Plintossolos. Essa variedade ocorreu devido às amplas condições geológicas e geomorfológicas. Os Neossolos são solos que existem sobre qualquer tipo de relevo e drenagem, pois é um solo de formação recente. Os Gleissolos ocorrem onde o lençol freático está próximo à superfície e essa característica influi na distribuição da vegetação por motivos de má aeração e drenagem. Os Latossolos são solos profundos e bem intemperizados, fato que contribui para o seu uso agrícola, pois tem boa estrutura e drenagem. Os Planossolos estão localizados em relevos planos e suaves ondulados e seus horizontes superficiais são mais arenosos em relação aos subsuperficiais. Tal característica favorece o acúmulo de água e o uso deste tipo de solo no cultivo de arroz irrigado. Os Argissolos também compartilham tal característica. Os Vertissolos encontram-se em relevos planos e suaves e apresentam argilas expansivas, fato que varia o volume do solo com o aumento da quantidade de água e com a falta da mesma (rachaduras). Os Chernossolos possuem bastante matéria orgânica (MO), por isso sua coloração enegrecida e boa fertilidade natural. Os Chernossolos em grande parte na metade

sul foram degradados devido ao manejo inadequado e sofrem erosão (BOLDRINI et al., 2010).

2.2 Plantio de eucaliptos no bioma Pampa do RS

O eucalipto é uma árvore nativa da Austrália, do Timor e da Indonésia. Apresenta mais de 600 espécies que se adaptam facilmente a diversas condições de clima e solo (CIB, 2008). Pode alcançar até 50 m de altura, sendo sua madeira utilizada principalmente para produções de lâminas, compensados, aglomerados, carvão vegetal, madeira serrada, celulose e móveis, além de outros produtos extraídos como óleos essenciais e para a produção de mel. Os primeiros plantios dessa espécie foram realizados no início do século XVIII na Europa, Ásia e África. A partir do século XIX começou a ser cultivado também nos países da América do Sul (PRYOR, 1976). O eucalipto foi introduzido no Brasil em 1904, sendo utilizado inicialmente como matéria-prima de produção de lenhas e dormentes no estado de São Paulo e depois se estendendo para o Centro e Sul do país. Existe em torno de 4,8 milhões de hectares plantados com eucaliptos no Brasil e 3 milhões reflorestados com a mesma cultura (MORA; GARCIA, 2000).

O Brasil se destaca como sendo um dos principais produtores de papel e celulose no mundo. Na produção de celulose e papel, o eucalipto é cortado aos 7 anos de idade, em um regime que permite até 3 rotações sucessivas e econômicas, com plantio de novas mudas na entrelinha do antigo plantio (reforma) aos 21 anos. No caso de manejo de florestas para produção de madeira a rotação pode chegar até 25 anos (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA, 2007).

No Rio Grande do Sul, as primeiras mudas foram plantadas por Frederico de Albuquerque (FERREIRA; SANTOS, 1997). Já em meados de 1889, Assis Brasil era o governador do RS e, em seu discurso empreendedor, propôs que se desenvolvesse a metade sul do estado com o plantio de eucaliptos. A partir de 1967, vários programas do governo foram surgindo com o intuito de fornecer financiamentos para quem quisesse promover o plantio de eucaliptos em suas terras. Em 2000 o governo federal criou o PNF (Programa Nacional de Florestas) e o PRONAF- Florestal (Programa Nacional de Agricultura Familiar) ambos fornecendo linhas de crédito para que pequenos, médios e grandes produtores pudessem

investir na silvicultura de eucalipto. Em 2004, o governo estadual criou o Programa de Plantio Comercial e Recuperação de florestas (PROFLORA), em parceria com a Caixa RS, no intuito de gerar renda e empregos na região menos favorecida do estado, a metade Sul (BINKOWSKY, 2009).

A metade Sul vem sofrendo um acelerado processo de mudanças antrópicas, fato que facilita a erosão devido à retirada da cobertura vegetal natural destes solos (RIBASKI et al., 2005). Os solos arenosos do Pampa totalizam 1,4 milhão de hectares, muito frágeis e degradáveis e, entre os principais municípios que perfazem tal cenário, pode-se citar: Alegrete, Quaraí, Itaqui, Cacequi e São Francisco de Assis (SOUTO, 1994). Essa região faz parte do bioma Pampa, cuja cobertura vegetal é do tipo Estepe Gramíneo-lenhosa (LEITE; KLEIN, 1990). Este tipo de vegetação permite sua exploração através da criação extensiva de bovinos, ovinos e outros animais domésticos (COELHO, 1999). Porém, o grande problema enfrentado é o agravamento do processo erosivo, áreas com vegetação rarefeita e campos arenizados. Estes solos possuem pouca aptidão natural para a agricultura e isto constitui mais um fator que contribui para o aumento do número de pessoas em situação de pobreza (RIBASKI et al., 2005). Muito embora o plantio de eucaliptos seja discutido principalmente na região do bioma Pampa, este tipo de cultivo ocorre amplamente em outras regiões do nosso estado. Os reflorestamentos com eucaliptos concentram-se na Depressão Central (40,47%), na Campanha (24,20%), e Serra do Sudeste (10,23%). Nestas três regiões fisiográficas estão 74,9% dos plantios de eucaliptos do Estado (UFMS, 2015).

A partir deste cenário, o plantio de eucaliptos foi visto como uma forma de agregação econômica a propriedade rural, principalmente nas áreas mais sujeitas à degradação. Em locais com solos mais pobres, o plantio de espécies florestais se mostrava mais lucrativo em relação aos demais cultivos agrícolas, pois o crescimento dessas espécies é rápido. Além disso, o produtor rural não precisaria abandonar a prática da pecuária e a implantação do eucalipto ainda pode melhorar vários aspectos do ecossistema local: clima, solo, plantas forrageiras, microrganismos, etc (RIBASKI et al., 2005).

O desejo de instalação de um polo florestal no RS desencadeou na sociedade um debate polêmico em torno do tema. De um lado, as empresas florestadoras expandiam as áreas de cultivos de eucalipto na "Metade Sul", motivando os pequenos, médios e grandes

produtores a integrarem-se à atividade tendo como incentivador direto o governo do Estado que, por sua vez, alimenta o debate público utilizando-se dos veículos midiáticos. No campo científico, iniciavam-se também as primeiras disputas visando à legitimação de opiniões a “favor” ou “contrárias” à silvicultura de eucaliptos no RS. (BINKOWSKI, 2009, p.35)

Neste contexto, surgiu então a expressão “deserto verde”, utilizada pelos ambientalistas para designar a monocultura de árvores em áreas de grandes extensões para a produção de celulose, por seus prováveis efeitos causados ao ambiente (MEIRELLES; CALAZANS, 2006). Criada pelo geógrafo Josué de Castro (1946), a expressão “deserto verde” refere-se aos efeitos avaliados em locais de plantações de eucalipto para a produção de celulose. Em locais com floresta tropical nativa, o plantio da monocultura extinguiu reservas abundantes de água e com toda uma cadeia alimentar que abrigava uma considerável relação de vegetais, insetos, répteis, aves, mamíferos, até os microrganismos do solo (CALAZANS, 2003).

Porém, outros estudos contrapõem tais opiniões:

Tratando-se de cultivos agrícolas, os plantios de eucalipto apresentam menor consumo de água do que cultivos tradicionais, como a cana-de-açúcar, por exemplo. Os eucaliptos também não apresentam consumo de água muito superior ao da maioria das formações florestais, além do fato de que outras espécies arbóreas podem apresentar exigência nutricional individual de água até maior do que o eucalipto (FREITAS, 2011, p.4).

Além do consumo excessivo de água pelos eucaliptos, a questão da alelopatia também é abordada. Diversas espécies de eucalipto produzem substâncias inibidoras que são capazes de interferir tanto no crescimento de outras espécies de plantas (RIZVI et al., 1999) quanto na atividade microbiana do solo. São metabólitos alelopáticos liberados pelas plantas que podem beneficiar ou prejudicar o crescimento de receptores de outras plantas (SOBRERO, 2004). E, novamente, alguns estudos divergem:

A alelopatia é muito evidente em plantios de várias espécies. Mesmo em espécies que comprovadamente utilizam essa estratégia de competição biológica, ela não é uniforme durante toda a vida da planta. Em alguns casos, ela ocorre após a decomposição da serapilheira, o que pode ser evitado por procedimentos de manejo,

como a retirada da serapilheira ou a queima controlada da mesma (FREITAS, 2011,p.8).

2.3 Dinâmica da MOS em áreas florestadas

Matéria orgânica do solo pode ser definida como o acúmulo de resíduos vegetais e animais em diversos estágios de decomposição (SILVA; RESCK, 1997) além de células e/ou tecidos microbianos sintetizados pela população microbológica do solo (CAMPBELL, 1978). Em áreas degradadas, é comum o solo apresentar algum grau de degradação (física, química ou biológica) devido à remoção total e/ou parcial do horizonte superficial e, conseqüentemente, ocorrendo a retirada de MOS. A implantação de florestas em solos degradados representa uma alternativa de recuperação e colabora com o aumento do sequestro de gás carbônico da atmosfera (DUDA et al., 1999; BARROS; COMERFORD, 2002; CARVALHO et al., 2010). A MOS sob plantações florestais tem diversas funções: fornecimento de nutrientes às plantas, retenção de cátions, complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, estabilidade da estrutura, infiltração e retenção de água, aeração, e na atividade microbiana, constituindo-se assim, em um fator indispensável e determinante da capacidade produtiva de solos altamente intemperizados (SILVA; MENDONÇA, 2007).

A plantação de eucaliptos recebe duras críticas em relação ao empobrecimento nutricional do solo, mas estudos comprovaram que florestas plantadas de eucalipto são capazes de alocar maior conteúdo de C e N na sua parte aérea. O eucalipto quando plantado em áreas degradadas ou de savana é fator determinante na elevação da quantidade de húmus na terra (BOUVET, 1999). Os valores de C aportados no solo, derivados do eucalipto, concentram-se na camada de 0-0,30 m (BINKLEY et al., 1999). Nas frações mais recalcitrantes da MOS, os resíduos do cultivo do eucalipto podem aumentar os estoques de C pois haverá maior deposição de resíduos lignificados e, conseqüentemente, de mais difícil decomposição (PEGORARO et al., 2011).

A retirada de nutrientes do ecossistema pode ser reduzida se forem tomadas algumas ações no momento da retirada dos eucaliptos.

Esse efeito pode ser bastante minimizado no momento em que raízes, folhas e a casca da árvore são deixadas sobre o solo. A deposição desses resíduos, denominada serapilheira, devolve ao solo grande parte dos nutrientes contidos na árvore. Estima-se que, para cada tonelada de madeira gerada, seja produzido, como resíduo, 0,3 a 0,35 tonelada de serapilheira (VITAL, 2007, p. 250).

Muitos estudos falam a respeito do comportamento do carbono em áreas cultivadas com eucaliptos que antes foram florestas nativas ou campos nativos. Nos anos iniciais da introdução das florestas de eucaliptos em locais antes nativos, houve um declínio do carbono orgânico. Este dado pode ser complementado com o fato de que a diminuição de carbono em solos florestais ocorre principalmente no primeiro ano de cultivo e está relacionada à mudança do uso do solo. Este decréscimo do carbono foi observado nos primeiros 0,40m de profundidade (NILSSON; SCHOPFHAUSER, 1995). Após 20 a 40 anos de cultivo, o teor de MOS poderá voltar ao inicial, aumentar ou diminuir, pois esta relação é inerente ao manejo do local (SPECHT; WEST, 2003).

2.4 Isótopos e abundância natural do carbono

A palavra “isótopo” vem do grego, isos (igual) e topos (lugar), e se refere a um local comum de um elemento específico na tabela periódica. Um átomo é composto de um núcleo cercado por elétrons, sendo o núcleo composto de prótons (Z) e nêutrons (N) e o somatório de ambos (Z+N) perfaz a massa do átomo. Os prótons são positivamente carregados (Z+), os elétrons são negativamente carregados (e-) e nêutrons não possuem carga (N). Portanto, isótopos são átomos de um mesmo elemento que possuem o mesmo número de prótons e mesmo número de elétrons, mas diferente número de nêutrons. Um núcleo, ou átomo específico-isótopo, é a derivação de um elemento que pode ser estável ou radioativo, definido pelo seu único número de prótons (Z) e nêutrons (N). (DAWSON; BROOKS, 2001).

Isótopos estáveis do carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre ocorrem naturalmente na atmosfera, hidrosfera, litosfera e biosfera (Tabela 1). Cada elemento apresenta um isótopo leve dominante: carbono-12 (^{12}C), hidrogênio-1 (^1H), oxigênio-16 (^{16}O), nitrogênio-14 (^{14}N) e enxofre-32 (^{32}S), e um ou mais isótopos

pesados: carbono-13 (^{13}C), hidrogênio-2 (^2H), oxigênio-17 (^{17}O), oxigênio-18 (^{18}O), nitrogênio-15 (^{15}N), enxofre-33 (^{33}S), enxofre-34 (^{34}S) e enxofre-36 (^{36}S) (DUCATTI, 2007). A ocorrência do isótopo pesado de um elemento químico é menor que seu isótopo mais leve (ROSSMANN, 2001; BOUTTON, 1991b).

Tabela 1: Abundância natural dos isótopos estáveis dos elementos C, H, O, N e S e suas moléculas gasosas comumente utilizadas na espectrometria de massa.

Isótopo leve	Átomos %	Isótopo pesado	Átomos %	Gás
^1H	99,9844	^2H	0,0156	H_2
^{12}C	98,8890	^{13}C	1,1110	CO_2
^{14}N	99,6340	^{15}N	0,3660	N_2
^{16}O	99,7628	^{17}O	0,0372	CO_2
		^{18}O	0,2000	CO_2
		^{33}S	0,7500	SO_2
^{32}S	95,0180	^{34}S	4,2150	SO_2
		^{36}S	0,0170	SO_2

Fonte: Ducatti (2007).

A composição isotópica é expressa em termos de δ e representa partes por mil (‰) de diferença do isótopo da amostra em relação ao padrão (DUCATTI, 2007). Os valores δ correspondem à razão entre isótopos pesados e leves na amostra, por exemplo, ^{13}C e ^{12}C , respectivamente. Quanto maior for este valor, maior o número de isótopos pesados. Um valor positivo de δ indica que a amostra tem uma razão isotópica maior que o padrão e que possui mais espécies isotópicas pesadas quando comparadas a ele. Por outro lado, os valores negativos indicam que a amostra tem uma razão isotópica menor que aquela do padrão (PETERSON; FRY, 1987).

Na natureza, aproximadamente 98,89% de todo o carbono é ^{12}C , e 1,11% é ^{13}C , sendo que o valor desses dois isótopos pode variar como resultado do fracionamento durante processos físicos, químicos e biológicos naturais (BOUTTON, 1991). O valor isotópico de carbono da amostra avaliada ($\delta^{13}\text{C}$) é tomado comparativamente ao padrão internacional PDB. Considera-se o valor de PDB como zero. O PDB é um fóssil carbonatado do cretáceo (*Bellefleuria americana*) da

formação Pee Dee na Carolina do Sul, e seu valor numérico é considerado 0‰, através da equação (1): (BREÁS et al., 1994; HARRIS,1999; CISNEROS et al., 2002).

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{amostra, PDB}} (\text{‰}) = (R_{\text{amostra}} / R_{\text{padrão}} - 1) \cdot 10^3 \quad (1)$$

Onde:

R é a razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ da amostra e do padrão internacional PDB

Para os isótopos estáveis do hidrogênio, o padrão internacional é o Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW), e suas razões estão descritas na Tabela 2. Para os isótopos estáveis do nitrogênio, o padrão utilizado é o ar atmosférico, considerado uma mistura isotópica homogênea na superfície terrestre. Para os isótopos estáveis do enxofre, o padrão considerado é o mineral troilita do meteorito Cañon Diable (V-CDT). Conforme a Tabela 2, os padrões isotópicos do oxigênio podem ser o V-PDB ou V-SMOW, dependendo da sua aplicação (BARRIE; PROSSER, 1996; VERKOUTEREN, 2004).

Tabela 2: Razão isotópica absoluta dos padrões internacionais.

Elemento	Razão isotópica	Padrão Internacional
$^2\text{H}/^1\text{H}$	0,00015576	Vienna standard mean ocean water; (V-SMOW)
$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	0,00200520	
$^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$	0,00037300	
$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	0,01123720	Vienna Pee Dee Belemnite; (V-PDB)
$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	0,00206710	
$^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$	0,00037900	
$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	0,00367650	Nitrogênio atmosférico (N ₂ atm)
$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$	0,04500450	Vienna Cañon Diable Meteorite Troilite; (V-CDT)
$^{33}\text{S}/^{32}\text{S}$	0,00810000	

Fonte: Adaptado de Verkouteren (2004).

2.5 Metodologia para avaliação de isótopos

A variação da razão isotópica do carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) e dos demais isótopos estáveis dos elementos químicos do nitrogênio, oxigênio, hidrogênio e enxofre podem ser medidos com grande precisão utilizando-se o espectrômetro de massa de razões isotópicas (IRMS) ou espectrômetro de massa de razões isotópicas com dupla entrada (DI-IRMS) (BOUTTON, 1991b). A espectroscopia de massas (isotope ratio mass spectrometer - IRMS) é a metodologia analítica utilizada para identificar e quantificar átomos e moléculas de uma substância com base na massa dos isótopos. O espectrômetro, se acoplado ao sistema de entrada utilizando um fluxo de gás Hélio, passa a denominar-se IRMS de fluxo contínuo (contínuos flow) ou CF-IRMS (HOEFS, 2004).

Os espectrômetros de massa modernos (Figura 2) são compostos essencialmente por (MARTINELLI, 2009):

- a. sistema de admissão de amostra e padrão, introduzidos na forma gasosa;
- b. fonte ionizadora, onde os gases são ionizados pela retirada de elétrons;
- c. analisador (campo magnético), onde os feixes de íons são separados e focalizados de acordo com a relação carga/massa;
- d. sistema coletor ou detector, no qual os feixes iônicos são coletados e amplificados, resultando em pulsos elétricos que são registrados;
- e. sistema de bombas que mantém um vácuo de aproximadamente 10^{-8} torr dentro do analisador e 10^{-3} torr dentro do sistema de admissão;
- f. computador e software específico para coleta dos dados e controle do equipamento.

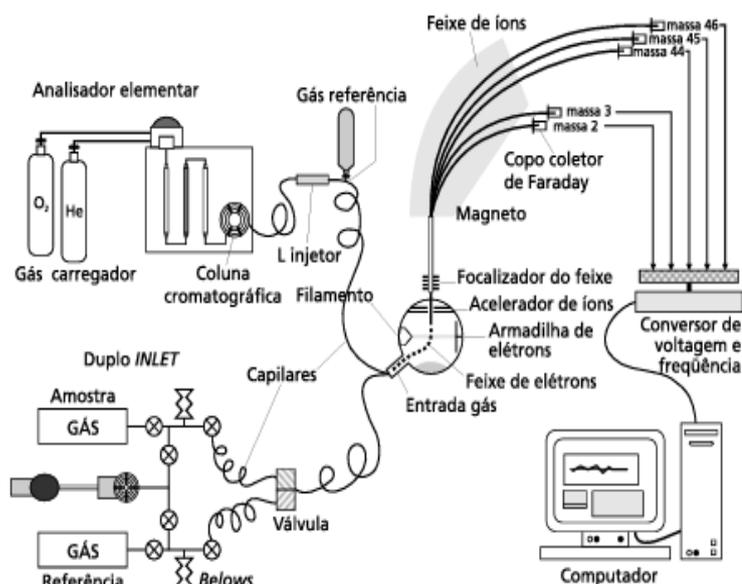


Fig. 1.1 Esquema geral de um espectrômetro de massas

Figura 2: Espectrômetro de massas.

Fonte: Martinelli (2009).

Para a determinação da razão isotópica, os analitos (sólidos) devem ser convertidos em gases simples antes de serem ionizados pelo equipamento. Medidas isotópicas de $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ são feitas a partir dos gases H_2 , N_2 , CO_2 , SO_2 ou SF_6 , respectivamente (BRENNAN et al., 1997). Na fonte iônica ocorrem a ionização eletrônica, a formação do feixe de íons e a aceleração dos íons. Ocorre a deflexão magnética que se dá no analisador e a detecção, que ocorre no coletor múltiplo. Na fonte de íons, elétrons são liberados de um filamento incandescente de tungstênio ou rênio e são acelerados por um potencial eletrostático de energia de 50 a 150 eV. Estes elétrons colidem com as moléculas e geram espécies iônicas que são aceleradas, extraídas e focalizadas por lentes eletrostáticas. Para incrementar a probabilidade de ionização, é usado um campo magnético fraco que mantém o caminho dos elétrons em forma espiral. No final da câmara de ionização os elétrons são coletados por uma armadilha carregada positivamente, onde a corrente eletrônica é medida e mantida constante (HOEFS, 2004). As moléculas ionizadas são atraídas para fora do feixe de elétrons por ação de um campo elétrico, posteriormente são aceleradas por vários kV e passam através de uma fenda de saída dentro do analisador. No analisador, o feixe de íons passa através de um ímã e é direcionado por um campo eletromagnético constante,

até um sistema detector (BRAND, 1995). Quando o feixe de íons atravessa o campo magnético, os íons são desviados em trajetórias circulares, os raios destas trajetórias são proporcionais à raiz quadrada da razão massa/carga. Assim, os íons são separados em feixes, cada um com valor de m/z (massa/carga) característico a sua espécie química (HOEFS, 2004).

Os sistemas de introdução de amostra de maior uso são o analisador elementar (AE) e o cromatógrafo de gases (CG). Nestes dispositivos, a amostra é separada e os componentes individuais são transformados em gases simples após a eluição da coluna e injetados no sistema de IRMS. Na análise isotópica do CO_2 (gás carbônico), por exemplo, devem ser monitoradas três massas (44, 45 e 46) correspondentes às espécies $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$, $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$, $^{12}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$, respectivamente. Cada massa (feixe iônico) é registrada simultaneamente por um coletor múltiplo tipo Faraday. Os coletores são alinhados em posições fixas ao longo do plano da imagem do setor magnético do espectrômetro. A corrente iônica resultante é continuamente monitorada, subsequentemente digitalizada e transferida até um computador. As correntes iônicas são amplificadas e processadas mediante um conversor de alta frequência. No computador as áreas de cada isótopo são integradas quantitativamente e a razão isotópica é calculada (MEIER, 1999).

2.6 Plantas C3 e C4 e a razão isotópica do carbono.

A fotossíntese ocorre nos organismos procariontes e eucariontes e todos possuem clorofila que é o principal pigmento fotossintético (KRAUS, 2005). Esse processo é responsável pela nutrição autotrófica e acontece em duas fases: uma dependente diretamente da energia luminosa e outra não dependente diretamente da luz. Nos ecossistemas terrestres, a maior parte do CO_2 é fixada pelas plantas, e uma fração menor por algas cianofíceas e eucarióticas ou bactérias autotróficas e quimiotróficas (INSAM, 1996).

Três grupos de plantas (C3, C4 e CAM) assimilam o CO_2 atmosférico de forma diferente durante seus ciclos fotossintéticos. As duas principais vias bioquímicas para a fixação de carbono são as de plantas com o ciclo fotossintético de Calvin-Benson (denominado C3) e de Hatch-Slack (denominado C4). Essas rotas são chamadas de C3 e C4 em referência ao primeiro composto orgânico a ser

sintetizado (3 e 4 carbonos, respectivamente) (DUCATTI, 2007). Apenas as rotas C3 e C4 apresentam relevância neste estudo.

Na rota bioquímica da síntese de carboidratos em plantas C3, o CO_2 entra nas folhas pelos estômatos por difusão e, através deste mesmo processo, passa para as células do mesófilo. Nestas células ocorre o processo de síntese orgânica, conhecido como ciclo fotossintético de Calvin-Benson, no qual a enzima ribulosecarboxilaseoxigenase (RuBisCO ou RuDPase) catalisa a reação de redução do CO_2 a duas moléculas de ácido 3-fosfoglicerato (3 átomos de carbono), que serão transformadas em carboidrato. O carboidrato formado será distribuído para as demais partes do vegetal através do sistema de vasos (BOUTTON, 1996; SILVA et al., 1999; OLIVEIRA et al., 2002; DUCATTI, 2007).

A rota C4, quando comparada com as plantas C3, apresenta diferenças. A primeira delas é referente à anatomia foliar destas plantas. As plantas C4 possuem dois tipos de cloroplastos: o do mesófilo e o da bainha. Outra diferença é em relação à produção de carboidratos que não ocorre nas células do mesófilo e sim nas células da bainha (QUEIROZ, 2005; DUCATTI, 2007). Dessa forma, o CO_2 entra pelos estômatos por difusão, passa para as células do mesófilo, onde é fixado na forma de HCO_3^- , conhecido como ciclo de Hatch-Slack. Este composto reage com fosfoenolpiruvato (PEP), cuja reação é catalisada pela enzima fosfoenolpiruvatocarboxilase (PEPcarboxilase), formando oxalacetato que, por sua vez, é reduzido a ácido aspártico ou ácido málico (ambos com 4 átomos de carbono). Estes compostos são transportados para as células da bainha, onde ocorre sua descarboxilação e formação de CO_2 e piruvato. A entrada do CO_2 concentrado produzido por esse processo entra no processo bioquímico de síntese orgânica da mesma forma que no ciclo das plantas C3, resultando na produção de carboidratos (BOUTTON, 1996; SILVA et al., 1999; OLIVEIRA et al., 2002; DUCATTI, 2007). As diferenças entre as rotas C3 e C4 são sumariamente apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Características de plantas C3 e C4.

Plantas C3 1° composto estável da fotossíntese	Plantas C4 1° composto estável da fotossíntese
Ribulosebifosfatocarboxilase (carboxidismutase), enzima do 1° passo da fixação do CO ₂	Fosfoenolpiruvato (PEP) carboxilase (enzima de carboxilação)
Baixa temperatura ótima (20-25C°) maior carboxilação enzimática	Alta temperatura ótima (30-35C°) maior carboxilação enzimática
No início a acumulação fotossintética é distribuída através de células do mesofilo.	No início a acumulação fotossintética é concentrada nos feixes das bainhas celulares
Normalmente 10-15 células do mesofilo entre os feixes vasculares.	Somente 2-3 células do mesofilo entre os feixes vasculares
Translocação lenta dos fotoassimilados para as folhas.	Translocação rápida dos fotoassimilados para as folhas
Não têm reserva de amido (somente gramíneas); não têm cloroplastos dimórficos	Tem reserva de amido e grande quantidade de cloroplastos dimórficos
Alta transpiração	Baixa transpiração.
Alta fotorrespiração	Baixa fotorrespiração.

Fonte: Adaptado de Van Soest (1996).

A abundância natural de ¹³C é uma ferramenta muito importante e difundida a fim de avaliar a matéria orgânica do solo e está relacionada com a via fotossintética de fixação de isótopos de C da vegetação predominante: plantas do tipo C3 discriminam uma parte do ¹³C do ar em relação ao ¹²C, gerando no solo teores menores de ¹³C; e plantas do tipo C4 fixam o ¹³C em maiores proporções do que as do tipo C3, o que gera no solo maior abundância natural de ¹³C (GOLCHIN et al., 1995; MARTINELLI et al., 2009). Farquhar et al. (1982) avaliou os motivos pelo qual isso ocorre e afirmou que esta diferença dá-se principalmente em função das propriedades bioquímicas da fixação do CO₂ pela ação das enzimas e alguns parâmetros físicos como difusão e pressão interna e externa exercida pelo CO₂ nos estômatos. Em plantas do tipo C4, os valores de δ¹³C situam-se entre -6 ‰ e -19 ‰ (em média -13 ‰); as de tipo C3 apresentam valores que oscilam entre -20 ‰ e -34 ‰ (em média -27 ‰) (SMITH; EPSTEIN, 1971). Esta diferença tem sido utilizada para estudar as modificações na relação isotópica do C do solo em função da alteração da cobertura florestal (VELDKAMP, 1994; DESJARDINS et al., 2004).

O aporte de MOS feito por plantações arbóreas pode ser avaliado de forma clara, visto que realizam a via fotossintética do tipo C3 enquanto a maioria das

gramíneas tropicais e subtropicais são do tipo C4. A abundância natural de ^{13}C nos permite avaliar a que velocidade ocorre o aporte e estabilização deste carbono no solo (LIMA et al., 2006; BALIEIRO et al., 2008).

Com o uso da metodologia analítica de espectrometria de massas que nos fornece a abundância isotópica entre o manejo inicial com plantas de ciclo C4 (pastagem nativa) e plantio de ciclo C3 (eucaliptos) é possível também identificar quantitativamente o carbono remanescente da pastagem que foi substituída e se este passou a sofrer a interferência da nova cultura implantada (eucalipto) através da alteração dos valores de abundância isotópica (URQUIAGA, 2008).

2.7 Modelo de mistura isotópica

Para estimar a contribuição relativa na MOS de cada tipo de vegetação, é possível aplicar o modelo de mistura isotópica, conforme equação (2):

$$(C4\%) = \left(\frac{\delta^{13}\text{solo} - \delta^{13}\text{eucalipto}}{\delta^{13}\text{pastagem} - \delta^{13}\text{eucalipto}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

C4%: percentual da MOS que provêm da vegetação C4 no solo;

$\delta^{13}\text{C}$: valor do delta fornecida pelo equipamento para o solo avaliado, o tecido vegetal C3 (eucalipto) e o tecido vegetal C4 (gramínea da pastagem).

Este modelo é interessante em estudos onde existe a troca de espécies C3 por C4 ou vice-versa, pois possibilita verificar o impacto destes diferentes manejos na área (MARTINELLI et al., 2009).

A partir da definição de todos os conceitos expostos anteriormente, este estudo foi conduzido de modo a caracterizar os teores de carbono total de uma área com florestamento de eucalipto com diferentes idades de cultivo na Depressão Central do RS, assim como a variabilidade da abundância natural isotópica de ^{13}C dos perfis avaliados levando em conta as singularidades da área como declividade, características químicas, características física, classes dos solos das áreas amostradas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local e procedimentos de coleta de solo e tecido vegetal

A área de estudo localiza-se no município de São João do Polêsine (Figura 3) e a extensão deste município é de aproximadamente 89 km². Localiza-se na região central do Rio Grande do Sul, na transição entre a região do Planalto e da Depressão Central. O clima apresenta-se do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen. A temperatura média das mínimas anual é em torno de 14°C e média das máximas anual de 25°C. A precipitação média anual é de 1700 mm (BURIOL et al., 1979).



Figura 3: Vista aérea da área de coleta do solo. E1 – plantio de 2 anos; E2 – plantio de 10 anos; E3 – plantio de 21 anos; RN – regeneração natural; CN – campo nativo

Fonte: Google Maps (2014).

O estudo foi conduzido em florestas de eucalipto com idades de 2 (E1), 10 (E2) e 21 anos (E3), pastagem nativa (CN) e área de regeneração natural (RN). A localização aproximada da área das coletas em E1 é 29°39'23 (latitude sul) e 53°25'28 (longitude oeste), em E2 é 29°39'16 (latitude sul) e 53°26'07 (longitude oeste), em E3 é 29°39'20 (latitude sul) e 53°26'10 (longitude oeste), em CN é 29°39'25 (latitude sul) e 53°26'06 (longitude oeste) e em RN é 29°39'28 (latitude sul) e 53°26'10 (longitude oeste). Os locais com plantio de eucaliptos não tiveram preparação prévia com corretivos químicos e/ou fertilizantes antes da colocação das mudas. A área E3 estava em seu segundo ciclo de plantio e E2 e E1 em seu primeiro ciclo. A espécie plantada na área era a *Eucalyptus grandis*. A área intitulada de regeneração natural continha espécies da região como o açoita-cavalo (*Luehea grandiflora*) e a caneleira (*Cinnamomum zeylanicum*), visto que, por 21 anos, não foi realizado nenhum tipo de manejo na área. O campo nativo (CN) era dominado por gramíneas típicas da região do bioma Pampa e esta área não sofreu interferências mecânicas e/ou fertilizações de qualquer espécie. As espécies predominantes na área eram o capim-forquilha (*Paspalum notatum*) e a grama-missioneira (*Axonopus jesuiticus*) e a área era utilizada para o pastejo extensivo de bovinos.

Em cada um dos locais (E1, E2, E3, CN e RN) foram abertas três trincheiras medindo 0,6 m comprimento x 0,4 m de largura e profundidade de 0,5 m. As coletas de amostras de solo foram realizadas nas profundidades: 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-70 e 70-90 cm e em profundidades maiores que 50 cm, o trado tipo holandês foi utilizado. As coletas em florestas de eucalipto (E1, E2 e E3) foram feitas nas entrelinhas de plantio e em mesma condição de declividade. Em cada profundidade de cada trincheira coletou-se três subamostras para compor uma amostra e, posteriormente, acondicionadas em sacos plásticos (APÊNDICES A, B e C). De acordo com a classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 2013), a área denominada como CN pertence a classe Cambissolo háplico. As áreas RN, E2 e E1 são classificadas como Neossolo regolítico e a área E3 como Neossolo quartzarênico. Na área denominada E1, em alguns locais não foi possível a coleta até os 90 cm devido a presença da rocha (Figura 4), sendo então consideradas os valores médios das trincheiras em que se conseguiu realizar a amostragem. No total, 15 trincheiras com oito profundidades de coleta cada foram escavadas, perfazendo um total de 120 amostras de solos.



Figura 4: Perfil da área E1 com presença de rocha aos 50 cm.

Também foram realizadas coletas de tecido vegetal aleatoriamente nos cultivos de eucalipto e na floresta nativa. Na área de regeneração natural, folhas de várias espécies presentes na área foram coletadas. Na área de pastagem (CN), três pontos de amostragem de 50 cm x 50 cm foram delimitados para o posterior corte da parte aérea das gramíneas.

3.2 Preparo das amostras

Raízes e resíduos macroscópicos das amostras de solo foram removidas manualmente para após, serem secas em 60 °C a peso constante, moídas e peneiradas a 1mm. Após isso, as alíquotas de solo utilizadas no analisador IRMS foram previamente maceradas em gral e pistilo de pedra ágata garantindo a homogeneidade do solo. O gral e o pistilo foram limpos com etanol entre a maceração de uma amostra e outra, a fim de minimizar riscos de contaminação. Amostras de tecido vegetal foram acondicionadas em sacos de papel, secas a peso a constante em temperatura não maior que 55 °C e moídos em moinho de facas.

No IRMS utilizou-se entre 1 e 2 mg de amostra (solo e tecido vegetal) para as determinações de ^{13}C e ^{12}C . A pesagem ocorreu dentro de cápsulas de estanho

especificadas pelo fabricante do equipamento. O preparo das amostras ocorreu de acordo com o protocolo estabelecido para a utilização do equipamento (APÊNDICE D).

3.3 Análises químicas

Os parâmetros avaliados na caracterização das amostras de solos foram: pH, índice SMP, teores de Ca, Al, Mg (extração por KCl 1 mol.L⁻¹), teor de P, K (extração Mehlich-1) e textura (EMBRAPA, 1997). Os valores para H+Al, CTC efetiva e CTC_{ph=7,0} e saturação por Al e por bases foram calculados (TEDESCO et al., 1995).

Os teores de C nas amostras de solo e de tecido vegetal coletadas foram determinados no analisador elementar modelo Flash 1112 que, acoplado ao analisador de razão isotópica modelo Delta V Advantage, ambos da Thermo Scientific, forneceu também os valores de abundância isotópica (¹³C). (APÊNDICE E).

O modelo de mistura isotópica foi utilizado para calcular os valores de carbono da MOS convertidos ao longo dos anos de plantio nos locais amostrados.

3.4 Tratamento estatísticos dos resultados

Os resultados analíticos obtidos em análises de caracterização e via autoanalisador foram submetidos a teste de repetibilidade, conforme equação (3):

$$\%Rep = \left(1 - \frac{\sigma}{X}\right) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

% Rep: Percentagem de repetibilidade;

σ : Desvio padrão relativo do conjunto de amostras em triplicata;

X: média dos valores do conjunto de amostras de cada camada.

Considerou-se como sendo precisos aqueles conjuntos de valores com repetibilidade superior ou igual a 95% ($p < 0,05$) para cada amostra realizada em triplicata.

A comparação entre as camadas de solo dentro de um mesmo perfil e camadas de mesma profundidade entre locais diferentes foi realizada através do teste T (Student) com $p < 0,05$, ou seja, confiança de 95%. Os fatores de entrada foram os valores de $\delta^{13}\text{C}$ e teor de C que representam triplicatas verdadeiras ($n=3$). O software Microsoft Excel foi utilizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

a) Distribuição do carbono orgânico total no perfil do solo

No cenário de campo nativo (CN), os valores de carbono total do solo variaram de 1,80% na camada superficial (0-5 cm) até 0,18% em maiores profundidades (camada de 50-70 cm) (Tabela 4). O maior valor encontrado na camada superficial do CN tem a ver com a produção da biomassa realizada pelas espécies de gramíneas predominantes neste ambiente. Estudos estimam que, em média, existe uma produção em torno de 16,3 kg de MS ha⁻¹ dia⁻¹ em locais com uma ampla oferta de forragem nativa na região da depressão central do RS (MOOJEN, 1991; CORRÊA; MARASCHIN, 1994). Como os resíduos vegetais são mantidos na superfície do solo sem revolvimento, a camada superficial se torna a parte do perfil do solo com a maior concentração de carbono. Embora não avaliado nesse trabalho, presume-se que os teores de C no CN estejam estabilizados. Nicoloso (2008) afirma que, em condições de pastagem natural, os valores de carbono orgânico total (COT) no solo não variam ao longo do tempo, pois existe um equilíbrio entre o carbono adicionado pelas plantas e o carbono perdido para o meio.

Baseado no teste T (Student) para a comparação entre as camadas do perfil, houve diferença significativa ($p < 0,05$) para os teores de C do CN entre as camadas 0-5 e 5-10 cm, entre 10-20 e 20-30 cm e entre 20-30 e 30-40 cm, com uma diminuição gradual dos valores de C conforme aumenta a profundidade (Tabela 4). Já no tratamento com 2 anos de alteração do manejo da área para o cultivo de eucaliptos (E1), foi possível observar uma diferença significativa ($p < 0,05$) somente entre os valores das camadas superficial (0-5 cm) e subsuperficial (5-10 cm) do perfil (Tabela 5), muito embora a contribuição do cultivo do eucalipto seja inexpressiva no que refere-se a quantidade de resíduos depositados. Em um cultivo arbóreo é importante salientar que os nutrientes são incorporados ao solo através da lavagem da vegetação pela chuva, que leva substâncias minerais e orgânicas da parte aérea das árvores, e também pela decomposição da serrapilheira (truncos, galhos caídos e folhas depositados na superfície), concentrando a ciclagem dos elementos na camada superficial do piso florestal (GOLLEY, 1978), embora tal deposição não ocorra de forma tão efetiva em E1 devido a não formação total das copas das árvores.

Tabela 4: Teores de C no campo nativo (CN), plantios de eucalipto (E1, E2 e E3) com diferentes idades e área de regeneração natural (RN).

Camadas (cm)	Teor de C (%)
-----Campo Nativo-----	
0-5	1,80
5-10	0,96
10-20	0,64
20-30	0,41
30-40	0,24
40-50	0,19
50-70	0,18
70-90	0,25
-----Eucalipto de 02 Anos (E1)-----	
0-5	2,00
5-10	0,90
10-20	0,80
20-30	0,70
30-40	0,60
40-50	0,54
50-70	0,34
70-90	0,51
-----Eucalipto de 10 Anos (E2)-----	
0-5	1,18
5-10	0,67
10-20	0,50
20-30	0,70
30-40	0,80
40-50	0,53
50-70	0,35
70-90	0,29
-----Eucalipto de 21 Anos (E3)-----	
0-5	1,63
5-10	0,34
10-20	0,28
20-30	0,17
30-40	0,10
40-50	0,08
50-70	0,06
70-90	0,11
-----Regeneração natural (RN)-----	
0-5	3,53
5-10	1,37
10-20	0,57
20-30	0,45
30-40	0,33
40-50	0,26
50-70	0,23
70-90	0,18

No plantio de 10 anos (E2), as camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm apresentaram diferenças significativas entre si refletindo a interferência do manejo do eucalipto durante os 10 anos até os 20 cm iniciais do perfil em função da deposição de

serrapilheira no local há mais tempo e também devido ao sistema radicular do eucalipto que se concentra de forma mais superficial e distribui-se lateralmente pelo perfil do solo (LIMA, 1996).

Tabela 5: Valores de probabilidade (p) do teste T (Student) obtidos nas comparações de valores de carbono entre pares de camadas adjacentes do perfil do solo em um mesmo local.

Locais	Camadas comparadas (cm)						
	0-5 /5-10	5-10 /10-20	10-20 /20-30	20-30 /30-40	30-40 /40-50	40-50 /50-70	50-70 /70-90
CN	0,0703	0,0556	0,0382*	0,0466*	0,3494	0,8769	0,3522
E1	0,010*	0,5145	0,3968	0,9792	0,1857	0,0366*	0,5867
E2	0,038*	0,0710	0,0810	0,1345	0,0671	0,0630	0,0050*
E3	0,011*	0,0264*	0,0670	0,0074*	0,0020*	0,1560	0,2919
RN	0,0047*	0,0603	0,0545	0,0593	0,2014	0,1104	0,1522

*Valores de p menores que 0,05 indicam diferença significativa no respectivo par de camadas. CN-campo nativo; E1 – plantio de 2 anos; E2 – plantio de 10 anos; E3 – plantio de 21 anos; RN- área de regeneração natural

No plantio de 21 anos (E3), a camada superficial apresentou o teor de carbono de 1,63% e isso ocorreu principalmente devido à deposição de serrapilheira nesta camada ao longo de dois ciclos de plantio, o que tornou os teores de MOS muito próximos à área na condição de pastagem (1,80%). Outros autores já apontaram em seus estudos dados semelhantes. Mendham et al. (2004) não observaram diferença no valor de MOS ao comparar plantios de eucaliptos com idade entre 11 e 14 anos e pastagens na Austrália.

No mesmo perfil, também foi observada a diminuição acentuada do teor de carbono em maiores profundidades e, neste caso, sua intensidade pode ser atribuída também aos altos valores de areia encontrados nesta área, que chegaram a totalizar mais de 80% de areia em algumas camadas amostradas (APÊNDICE F). Os solos arenosos possuem poros de maior tamanho e isso propicia o acesso dos microrganismos a MOS e em solos com esse tipo de textura é difícil atingir altos índices de MO devido ao intenso trabalho dos decompositores sem que haja contínua adição de resíduos (BAYER,1996), o que somente deve ter ocorrido na camada superficial (0-5 cm) da área. Além disso, em solos com maior teor de

argila, ocorre a proteção da MOS por efeito da mesma. Isso pode ocorrer através da adsorção do carbono humificado e estabilizado pelos argilominerais com cargas negativas e alta área superficial e também pela formação de agregados no solo que protegem a MOS da mineralização microbiana (GAMA-RODRIGUES et al., 2005; MCLAUCHLAN, 2006).

De um modo geral, a camada superficial dos solos sob vegetação arbórea é a que indica mais rapidamente uma alteração do manejo da área, visto o recebimento de serrapilheira liberado pelas árvores. Witschoreck (2003) mostrou que a serrapilheira acumulada de eucalipto chegou a 4,0; 6,0; 11,8 e 12,3 Mg ha⁻¹, respectivamente no povoamento de 2, 4, 6 e 8 anos de idade, evidenciando uma tendência a estabilização após 6 anos de plantio. O grau de aumento do teor de matéria orgânica na camada superficial em sistemas arbóreos depende muito da decomposição da serrapilheira para que haja a ciclagem e aporte de nutrientes no solo. Lekha; Gupta (1989) afirmam que este processo de decomposição é influenciado por três fatores principais: natureza da comunidade decompositora (microrganismos), características do material orgânico (resíduos vegetais) e características do clima e do solo do local. Em plantações de eucalipto, a taxa de decomposição da serrapilheira tende a ser menor que em outras coberturas nativas, devido à característica do material vegetal que é rico em compostos fenólicos e lignina natural, o que propicia o acúmulo de matéria orgânica na camada superficial do solo (ZANCADA et al., 2003; CARVALHO et al, 2008).

Na área onde houve a regeneração natural com espécies nativas da região (RN) ocorreram os maiores valores de carbono (3,53%) na camada superficial (0-5 cm), muito superior a qualquer uma das áreas com plantio de eucaliptos e a qualquer outra camada do seu próprio perfil. Essa elevada quantidade de matéria orgânica observada pode ser atribuída ao fato de haver uma deposição intensa de material vegetal de diferentes composições químicas de forma contínua ao longo dos anos. Um estudo em uma floresta nativa na cidade de Itaara, no Rio Grande do Sul, localizada nas coordenadas geográficas centrais de 29° 30' de latitude Sul e 53° 46' de longitude Oeste, encontrou um valor médio de deposição anual de serrapilheira de 5,85 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (SCHUMACHER et al., 2011). Em estudo acerca das características do material depositado em florestas arbóreas nativas, Gama-Rodrigues (2002) avaliou nove tipos diferentes de florestas tropicais e encontrou uma amplitude de variação do tempo de residência da serrapilheira no solo de 7 a

29 meses, fato que comprova a diversidade de composição entre as espécies florestais nativas. A área RN é a que menos apresenta diferenciação dos teores de C em relação aos teores de CN ao longo do perfil (situação inicial de manejo), o que enfatiza a interferência sofrida em E1, E2 e E3 em relação ao aporte de MO como consequência do cultivo de eucalipto. Entretanto, os resultados obtidos com o plantio de eucaliptos têm sido controversos, ou seja, em alguns casos, a substituição da vegetação nativa tem aumentado os estoques de C orgânico total (GUO; GIFFORD, 2002; RANGEL; SILVA, 2007) e, em outros cenários, tem diminuído (ZINN et al., 2005).

As camadas superficiais de locais com os plantios de eucalipto (E1, E2 e E3) apresentaram menores valores na quantidade de MOS ao longo dos anos de plantio em relação a área de regeneração natural (RN). Entretanto, relacionando as camadas E2 (1,18%) e E3 (1,63%) nota-se uma tendência de recuperação destes valores, o que confirma conclusões já descritas anteriormente por outros autores. Em revisão de literatura, Guo; Gifford (2002) evidenciaram várias publicações que indicam o decréscimo do teor de C no solo quando há uma mudança no uso do solo de pastagem para cultivos arbóreos (-10%), enquanto que alguns estudos apontam que o cultivo de eucaliptos em áreas de pastagem degradadas fornece aumentos substanciais do C em pouco tempo (30 anos) (LIMA et al., 2006). Na área com espécies florestais nativas, o valor do carbono orgânico praticamente dobrou após os 21 anos sem manejo na camada superficial e isso pode ser atribuído ao fato de haver intensa deposição de serrapilheira e grande variedade de tecidos vegetais de diferentes graus de resistência à decomposição, como citado anteriormente. Em CN, acredita-se que o valor de carbono esteja estabilizado, levando-se em conta o tempo de que a área possui com tal manejo juntamente a prática de pastejo bovino, o que resulta em uma maior dificuldade de acúmulo de MOS.

Na camada subsuperficial (5-10 cm) foi onde se evidenciou uma gradual diminuição de MOS entre os plantios de 02, 10 e 21 anos. Entre E2 e E3 ocorreu um decaimento abrupto (0,67% para 0,33%) e isso pode ser explicado pelo fato de que em E2 o teor de argila atingia valores próximos a 40% em algumas camadas, enquanto que em E3 estes valores não ultrapassaram 5%. Todas as camadas abaixo de 20 cm também apresentaram tal comportamento entre os tratamentos E2 e E3 (Tabela 6). Com o passar do tempo, espera-se que estes valores sejam recuperados tal qual na RN, muito embora a área passe por sucessivos ciclos de

corte do eucalipto (a cada 10 anos aproximadamente). Em E3, a camada subsuperficial no tempo amostrado ainda não apresentou indícios de recuperação de valores antecessores ao plantio do eucalipto (CN) e pode-se atribuir tal fato ao alto teor de areia apresentado na área. Nesta área, o alto teor de areia também dificulta a acumulação de carbono nas demais camadas do perfil e isso torna os valores de matéria orgânica muito inferiores ao tratamento E2. A camada subsuperficial (5-10 cm) da RN, assim como todo o restante do perfil, apresenta valores maiores de carbono (1,57%) em relação aos valores da área E3 (0,33%), o que reforça a ideia de que a grande quantidade de resíduos dispostos continuamente na área aumenta significativamente a quantidade de matéria orgânica ao longo das camadas do perfil. Todo o perfil em RN apresenta aumento considerável em seus teores de MO em relação a área E3. Um fator que pode ser considerado decisivo para essa diferença é o valor de areia em RN, que chega no máximo a 41%, enquanto que os teores de areia em E3 superam os 80%.

Tabela 6: Valores de probabilidade (p) do teste T (Student) obtidos nas comparações de valores de carbono entre pares de diferentes locais em uma mesma camada do perfil do solo

Locais	Profundidades (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-70	70-90
CN – E1	0,6450	0,4540	0,3504	0,3569	0,2430	0,1621	0,2300	0,0747
E1 – E2	0,0258*	0,0792	0,0689	0,9691	0,7493	0,6623	0,7180	0,0068*
E2 – E3	0,0490*	0,0378*	0,0884	0,0082*	0,0050*	0,0065*	0,0052*	0,0861
E3 – RN	0,0059*	0,0162*	0,0831	0,0344*	0,0521	0,0138*	0,0138*	0,0145*
CN – E3	0,6045	0,0078*	0,0196*	0,1483	0,1468	0,0245*	0,0452*	0,2450
CN – RN	0,0491*	0,1060	0,6946	0,8079	0,4497	0,1698	0,1165	0,4906
E1 – E3	0,1464	0,0023*	0,0611	0,0924	0,1129	0,0977	0,1347	0,0087*

*Valores de p menores que 0,05 indicam diferença significativa no respectivo par de locais. CN- campo nativo; E1 – plantio de 2 anos; E2 – plantio de 10 anos; E3 – plantio de 21 anos; RN- área de regeneração natural

Em camadas de profundidades maiores que 40 cm houve a manutenção das tendências de decaimento do teor de C relativas a cada perfil e essa diminuição é determinada por um conjunto de fatores como a classe, textura do solo, condições de declividade e menor aeração. As mudanças mais expressivas no estoque de C

do perfil ocorreram até profundidades de 20 cm, porém as demais camadas são importantes reservatórios de C e podem vir a tornar-se importantes fontes ou drenos de C para a atmosfera dependendo do manejo a qual são submetidos (DIEKOW et al., 2005).

b) Abundância isotópica do ^{13}C e contribuição relativa da biomassa de eucalipto

As folhas de eucalipto coletadas no local apresentaram valor de -30,3 ‰ de abundância de ^{13}C , enquanto o tecido vegetal das gramíneas desta área apresentou um valor de -14,98‰ e a média dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ das folhas na área RN foi de -32,20‰. Os valores encontrados experimentalmente condizem com o que é relatado na literatura, em que tecidos de plantas de ciclo fotossintético C3 apresentam valores isotópicos ($\delta^{13}\text{C}$) menores, que variam de -20,0‰ até -32,0‰, com uma média de -27,0‰, enquanto os valores de $\delta^{13}\text{C}$ das espécies C4 são maiores, variando de -9,0‰ até -17,0‰, com média de -13,0‰. (FARQUHAR et al., 1989; BOUTTON, 1991; SILVA et al., 2013).

No solo, os maiores valores de $\delta^{13}\text{C}$ relatados neste estudo foram encontrados na camada superficial (0-5 cm) de CN (-19,19‰) (Tabela 5), o que denota a maior contribuição de carbono vindo de plantas C4 (no caso, predominantemente gramíneas) na MOS (SMITH; EPSTEIN, 1971) e o restante das camadas apresentaram valores muito próximos entre si, ou seja, possuíam valores isotópicos estáveis ao longo do perfil.

Tabela 7: Abundância Isotópica de ^{13}C e % de carbono provenientes de diferentes manejos da área.

Camadas (cm)	Abundância Isotópica $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	C derivado de CN (%)	C derivado de Euc (%)	C derivado de RN (%)
-----Campo Nativo-----				
0-5	-19,19	100	0	
5-10	-21,59	100	0	
10-20	-21,74	100	0	
20-30	-21,67	100	0	
30-40	-21,57	100	0	
40-50	-21,56	100	0	
50-70	-20,68	100	0	
70-90	-21,50	100	0	
-----Eucalipto de 02 Anos (E1)-----				
0-5	-22,59	70,1	29,9	
5-10	-21,33	100*	0	
10-20	-20,69	100*	0	
20-30	-19,68	100*	0	
30-40	-19,68	100*	0	
40-50	-19,81	100*	0	
50-70	-20,26	100*	0	
70-90	-18,80	100*	0	
-----Eucalipto de 10 Anos (E2)-----				
0-5	-26,58	34,2	65,8	
5-10	-24,15	71,2	28,8	
10-20	-22,44	91,8	8,2	
20-30	-20,47	100*	0	
30-40	-20,49	100*	0	
40-50	-20,10	100*	0	
50-70	-20,21	100*	0	
70-90	-20,96	100*	0	
-----Eucalipto de 21 Anos (E3)-----				
0-5	-29,30	9,6	90,4	
5-10	-25,03	62,0	38,0	
10-20	-24,20	71,7	28,3	
20-30	-24,80	64,6	35,4	
30-40	-24,47	67,0	33,0	
40-50	-24,75	63,8	36,2	
50-70	-24,87	56,8	43,2	
70-90	-24,32	69,8	30,2	
-----Regeneração natural (RN)-----				
0-5	-28,01	21,0		79,0
5-10	-26,65	42,1		57,9
10-20	-26,33	46,5		53,5
20-30	-25,61	54,7		45,3
30-40	-25,32	57,2		42,8
40-50	-25,18	59,2		40,8
50-70	-24,92	56,3		43,7
70-90	-24,05	71,3		28,7

*Valores cujo cálculo de diluição isotópica resultou em valores maiores que 100%.

Quando uma área possui seu manejo alterado entre culturas de ciclo fotossintético diferentes é possível, com base nos sinais isotópicos do ^{13}C ,

estabelecer uma relação com o histórico de uso neste solo devido a alteração destes valores isotópicos (BAI et al., 2012). A partir do cálculo de diluição isotópica, é possível acompanhar o processo de conversão do carbono da MOS entre os tipos de manejo, no caso pastagem e eucalipto. Em algumas camadas amostradas, alguns valores superiores a 100% obtidos com o cálculo de diluição isotópica foram desconsiderados por serem frutos, possivelmente, de uma margem de erro que pode superestimar valores de conversão e prejudicar as interpretações.

No plantio de eucaliptos de 02 anos (E1) apenas a camada superficial apresentou uma diminuição significativa nos valores de ^{13}C em relação à camada subsuperficial. Dessa forma, apresentou uma quantidade de carbono já proveniente do plantio de eucaliptos (29,9%), enquanto que as demais camadas continuaram com 100% do carbono ainda proveniente da pastagem. Porém, se faz necessário levar em conta a variabilidade dos valores de ^{13}C , fato que deve levar a uma interpretação destes dados de forma cautelosa. As diferenças entre os valores de ^{13}C nas camadas superficiais de E1 e CN são pequenas e não diferem significativamente entre si. Assim, o cálculo da diluição isotópica pode nos fornecer valores de conversão do carbono da área de forma superestimada. Desse modo, o valor de carbono encontrado na camada superficial proveniente do plantio do eucalipto em E1 (29,9%) não pode ser considerado como uma avaliação quantitativa absoluta, embora sirva como um indicativo do avanço do processo de ciclagem deste elemento na camada superficial.

Após 10 anos de plantio (E2), houve diminuição significativa no valor de ^{13}C no perfil entre as camadas 5-10 cm, 10-20 e 20-30 cm e isso refletiu nos valores do carbono oriundos do eucalipto. Nesse perfil, até 30 cm de profundidade existiu a interferência do manejo do eucalipto nos teores de carbono e em maiores profundidades observou-se a manutenção dos valores isotópicos da época em que o local possuía pastagem nativa (CN). Comparando os resultados encontrados em E1 e E2 é possível verificar claramente a evolução do processo de ciclagem do carbono percorrendo o perfil, visto que em E2 existe diferenciação nos valores de ^{13}C entre as camadas 0-5 cm e 5-10 cm. A camada 10-20 cm já apresenta 8,2% de carbono vindo do eucalipto, possivelmente por meio de suas raízes, o que denota o início do processo de conversão do carbono da pastagem nesta camada. Os valores de carbono já oriundos do plantio de eucalipto na matéria orgânica desta área contrariam estudos que afirmam que a taxa de substituição do carbono em locais

onde o eucalipto foi implantado é baixa. Pulrolnik et al. (2009) afirmam que a contribuição de carbono derivado do eucalipto é de apenas 5% na camada de 0-10 cm após 20 anos de cultivo e Lima et al. (2006) informam que em um plantio de 32 anos de eucalipto, a taxa média anual de substituição na camada de 0-5 cm é de 0,43%, ambos em latossolo argiloso. Pulrolnik et al. (2009) atribuem este baixo índice de troca do carbono à falta de preparo do solo da área do estudo, condições climáticas amenas (inverno seco e altitude), textura do solo muito argilosa e abundância de óxidos de ferro e alumínio, compostos que podem formar complexos de coordenação com a MOS de forma a estabilizá-la (ZINN et al., 2005). No presente estudo, é possível inferir que a taxa de conversão do carbono entre pastagem e eucalipto pode ser maior devido a diferentes condições edafoclimáticas que as descritas por Pulrolnik et al. (2009), como maior precipitação média, baixos teores de alumínio, diferentes classes de solo com textura pouco argilosa do solo e, conseqüentemente, menor proteção da MOS. A diferença entre as espessuras das camadas avaliadas (0-5 e 0-10 cm) também pode facilitar a superestimação do teor de carbono da pastagem que foi convertido.

Após 21 anos de cultivo (E3), a área E3 apresentou diferenciação dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre as camadas até 20 cm, o que qualifica a diminuição acentuada de isótopos naturais do carbono e, em camadas de maiores profundidades, ocorreu a estabilização destes valores (-24‰). Neste local também evidenciou-se que toda a matéria orgânica do perfil já sofreu interferência do plantio de eucaliptos (Figura 5), pois embora tenha ocorrido a diminuição de C no perfil em E3 de forma acentuada em relação à pastagem, houve a conversão de forma gradual do carbono da MOS vindo da pastagem para carbono proveniente da floresta de eucaliptos. As áreas de plantio de 21 anos (E3) e a área de pastagem (CN) apresentaram valores constantes de ^{13}C a partir de 10 cm de profundidade, aproximadamente -24‰ e -21‰, respectivamente. A área CN possivelmente possuía uma situação estável em relação aos teores de ^{13}C e após 21 anos, com o plantio do eucalipto, o solo voltou novamente a atingir a situação de equilíbrio quanto a sua composição isotópica sem apresentar diferenciação nos teores de C até os 90 cm. A classe de solos encontrada nesta área (neossolo quartzarênico) também ajuda a influenciar na rápida conversão do carbono proveniente da pastagem, visto seu menor teor de argila e conseqüente menor proteção de argilominerais deste solo.

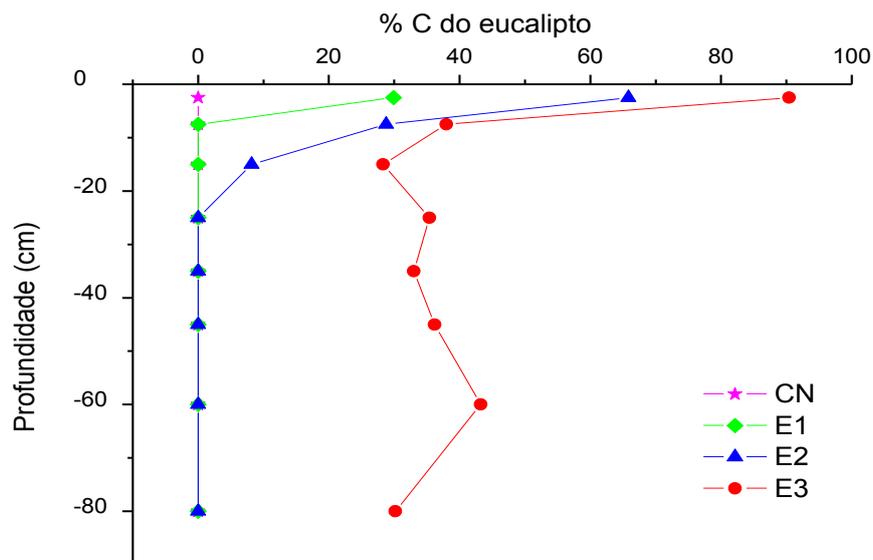


Figura 5: Valores do C da matéria orgânica do solo convertidos ao longo do tempo em plantios de eucalipto. CN – campo nativo; E1 – plantio de 2 anos; E2 – plantio de 10 anos; E3 – plantio de 21 anos.

Na RN, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ encontrados nas camadas avaliadas do perfil variaram de -28‰ a -24‰ . Não houve variação significativa destes valores entre as camadas e isso mostra que possivelmente exista uma certa tendência a estabilização da abundância isotópica do carbono na área. Todas as camadas do perfil em E3 e RN já apresentam influência pelo manejo do eucalipto e os teores de carbono oriundos deste manejo podem ter um aumento significativo na MOS destas áreas em alguns anos. Estudos relatam uma área onde, após 35 anos de regeneração natural, passa a apresentar praticamente 100% de C provenientes de espécies arbóreas e tipicamente de ciclo C3. Essa troca ocorre em todo o perfil e pode ser atribuída ao aporte de C derivado das raízes de plantas arbóreas, mesmo em profundidades maiores que 40 cm, onde se espera que a dinâmica do C seja mais lenta não colaborando significativamente para o incremento de MOS (COUTINHO et al., 2010), assim como pela descida de compostos orgânicos dissolvidos provenientes da fração mais lábil da MOS. É importante observar também que a troca total do carbono pode não ocorrer totalmente ou demorar muitos anos devido a presença de teores de carbono altamente estabilizados e protegidos na matéria orgânica existente e pertencente à pastagem. De uma maneira geral, a maior parte do carbono humificado na MOS encontra-se na fração

humina e é considerada a mais recalcitrante e com maior interação com a matriz mineral coloidal do solo (STEVENSON, 1994).

No presente estudo, os resultados foram semelhantes com o relatado anteriormente, pois os valores de $\delta^{13}\text{C}$ ao longo do perfil nesta área de regeneração natural (RN) foram diferentes da pastagem (CN), muito embora os valores de MOS entre os perfis não tenham apresentado valores com significativa diferença. É importante salientar que tal comportamento não foi verificado na camada superficial, visto o alto aporte de material vegetal ocorrido nesta área. Avaliando os teores de carbono oriundos de cada manejo em E3 e RN, pode-se inferir que existe diferença na velocidade da conversão da MOS entre estas áreas. As possíveis causas desta diferença podem ser os teores de argila, profundidade do solo, declividade, a variedade da composição química dos resíduos, assim como as quantidades depositadas destes resíduos vegetais. A amostragem na área de regeneração natural (RN) foi realizada em apenas um local, pois não existiam outras áreas adjacentes com o mesmo histórico de cultivo, ou seja, sem possibilidade de haver repetições que possibilitassem outros tipos de comparações.

Em locais onde existe o plantio de espécies arbóreas, espera-se que o $\delta^{13}\text{C}$ da MOS seja até maior que a abundância isotópica do tecido vegetal das árvores. Durante o processo de decomposição deste material vegetal, ocorre um enriquecimento de 1 a 2‰ de ^{13}C na MOS devido a perda de átomos de ^{12}C entre a vegetação e o solo (MARTINELLI et al.; 2009). É necessário avaliar também os efeitos do declínio da concentração de ^{13}C e ^{14}C ocorrido principalmente no último século na atmosfera. Tal fato deu-se com o início da era industrial, pois a taxa de CO_2 emitido aumentava a uma taxa de 4% ao ano, o que provocou um efeito de diluição destes isótopos, o denominado efeito de Suess (SUESS, 1955; EKDAL; KEELING, 1973;). A diminuição isotópica do ^{13}C ao longo do perfil do solo pode atingir até 3‰ em decorrência de tal fenômeno (MARTINELLI et al.; 2009). Outro fenômeno também é descrito em vários estudos como um dos causadores deste empobrecimento de ^{13}C em pastagens e florestas secundárias da superfície até cerca de um metro (TRUMBORE et al., 1995; MORAES, 1996; CAMARGO, 1999) e explica-se pela maior meia vida da matéria orgânica do solo em profundidade (GOUVEIA; PESSEDA, 1999). Devido aos efeitos de enriquecimento/empobrecimento do ^{13}C resultantes dos processos descritos, é necessário levarmos em conta a influência destes efeitos nos dados obtidos, fato

que pode resultar em uma maior dificuldade de avaliar o quão efetiva foi a conversão do carbono em uma determinada área com plantio de espécies arbóreas.

A diferença da abundância isotópica na camada superficial entre os plantios E1, E2 e E3 foi significativa, assim como a variação do teor de C proveniente da pastagem nessa camada (Figura 6). Após o plantio de 2 anos de eucalipto (E1) ainda não foi possível observar diferenças significativas entre os valores de abundância natural de ^{13}C em relação a CN em nenhuma das camadas amostradas. Tal comportamento é confirmado por Balieiro et al. (2008), onde a substituição da pastagem *Panicum maximum* (capim mombaça) por *Eucalyptus grandis* não modificou significativamente a composição isotópica da MOS em relação à pastagem em camadas superficiais e também por Coutinho et al. (2010) que não encontrou diferenças significativas na composição isotópica do carbono após 4 anos de plantio de eucaliptos. Este fato é evidenciado neste estudo pelos valores de $\delta^{13}\text{C}$ que, na camada superficial de E1, mostraram tendência a uma diminuição (-22,59‰) e conseqüente início da conversão do carbono na área e no restante do perfil continuaram sendo valores que não se diferenciaram dos encontrados na área de pastagem.

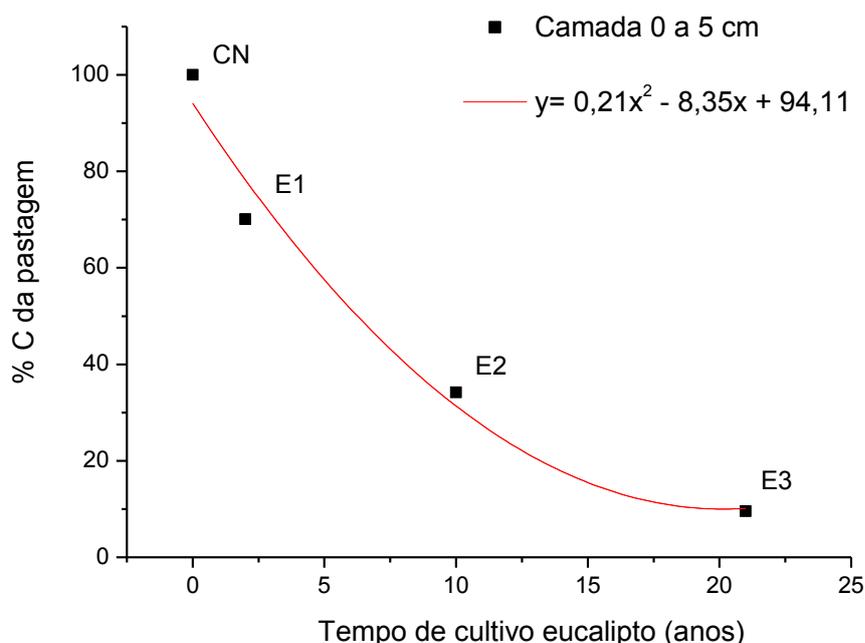


Figura 6: Valores de C provenientes de pastagem (CN) em relação ao tempo de plantio de eucaliptos na camada superficial (0-5 cm). CN – campo nativo; E1 – plantio de 2 anos; E2 – plantio de 10 anos; E3 – plantio de 21 anos.

O valor da abundância isotópica natural entre E3 e RN não apresentou diferença, com exceção da camada superficial, o que confirma que o perfil de ambos já sofreu interferência do plantio de cultivos arbóreos de ciclo C3 em sua totalidade. Estas áreas, quando comparadas, mostram que diferenças de manejo podem vir a interferir na conversão do C entre pastagem e cultivos arbóreos, contribuindo para a manutenção do teor de carbono.

É importante salientar também que as áreas avaliadas neste estudo possuíam algumas características que podem vir a ser limitadoras para implementação de outros cultivos agrícolas que demandem por melhores atributos físicos e químicos do solo, tais como a baixa fertilidade natural (APÊNDICE F), grande variação na declividade e alto teor de areia em alguns perfis. Observando as limitações citadas anteriormente juntamente às discussões e resultados obtidos neste estudo, é possível afirmar que o plantio de eucaliptos pode ser uma opção viável de manejo para áreas onde não existe aptidão agrícola muito grande, garantindo assim retorno financeiro e proteção do solo.

5 CONCLUSÕES

Houve variação no teor de carbono entre os cultivos de eucalipto e a pastagem, mas nas condições de declividade e diferenças de classe de solo e textura, não é possível atribuir essa variação aos cultivos avaliados.

A abundância isotópica de ^{13}C indica a contribuição da vegetação de eucalipto na composição da MOS na camada superficial 0-5 cm em todas as idades de plantio, influenciando em todo o perfil do solo após 21 anos de cultivo de modo similar ao que acontece na área de regeneração natural com espécies arbóreas de mesmo tempo de cultivo.

REFERÊNCIAS

- BAI, E.; BOUTTON, T.W.; LIU, F.; BEN WU, X.; HALLMART, C.T.; ARCHER, S.R. Spatial variation of soil ¹³C and its relation to carbon input and soil texture in a subtropical lowland woodland. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 44, p. 102-112, 2012.
- BALIEIRO, F.C.; PEREIRA, M.G.; ALVES, B.J.R.; RESENDE, A.S.; FRANCO, A.A. Soil carbon and nitrogen in pasture soil reforested with eucalyptus and guachape. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32, p. 1253-1260, 2008.
- BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 240 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- BARRIE, A.; PROSSER, S. Automated analysis of light element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: BOUTTON, T.W.; YAMASAKI, S. **Mass spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. cap. 1, p.1-46.
- BARROS, N.F.; COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L. M., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2, p.487-592.
- BINKOWSKI, P. **Conflitos ambientais e significados sociais em torno da expansão da silvicultura de eucalipto na “Metade Sul” do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Ciências Econômicas, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Rural. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
- BINKLEY, D.; RESH, S. C. Rapid changes in soils following eucalyptus afforestation in Hawaii. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 1, p. 222-225, 1999.
- BOLDRINI, I.I.; FERREIRA, P.M.A.; ANDRADE, B.O.; SCHNEIDER, A.A.; SETUBAL, R.B.; TREVISAN, R.; FREITAS, E.M. **Bioma Pampa: diversidade florística e fisionômica**. Porto Alegre: Ed. Palotti, 2010. 64p.
- BOUTTON, T.W. Stable carbon isotope ratios of soil organic matter and their use as indicators of vegetation and climate change. In: BOUTTON, T.W.; YAMASAKI, S. **Mass Spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 47-82.
- BOUTTON, T.W. Stable carbon isotopes ratios of natural materials. In: COLEMAN, D.C.; FRY, B. (Ed.). **Carbon isotopes techniques**. New York: Academic Press, 1991. p. 155-171.

BOUTTON, T. W. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ fractionation and its utility in terrestrial plant studies. In: COLEMAN, D. C.; FRY, B. **Carbon isotope techniques**. San Diego: Academic Press, 1991. cap. 12, p. 186-200.

BOUVET, J. M. "Les plantations d'Eucalyptus: évolutions récents et perspectives". **Spécial Eucalyptus**, Paris: L'association Silva, 1999.

BRAND, W.; PRECON, A. Fully automated interface for the pre-GC concentration of trace gases in air for isotopic analysis. **Isotopic Environmental Healthy Study**. v. 31, p.277-284, 1995.

BRÉAS, O.; RENIERO, F., SERRINI, G. Isotope Ratio Mass Spectrometry: Analysis of Wine from Different European Countries. **Rapid Communications in mass Spectrometry**. v. 8, p. 967-970, 1994.

BRENNAN, J.T.; CORSO, T.N.; TOBIAS, H.J.; CAIMI, R.J. High-precision continuous-flow isotope ratio mass spectrometry. **Mass Spectrometry Reviews**, v.16, p.227-258, 1997.

BURIOL, G.A. et al. Cartas mensais e anuais das temperaturas médias, das médias das temperaturas máximas e das médias das temperaturas mínimas do estado do Rio Grande do Sul. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v.9, p.1-53, 1979. (Suplemento).

CALAZANS, M. Violação de Direitos Econômicos, Sociais, Culturais e Ambientais na Monocultura do Eucalipto: a Aracruz Celulose e o estado do Espírito Santo – BRASIL. **FASE-ES/TNI**, Vitória, nov. 2003. (CARBON TRADE WATCH; TNI, FASE-ES. **Where the Trees are a Desert: Stories from the ground**. Amstardam: TNI, 2003. Disponível em: <www.carbontradewatch.org/pubs/trees.pdf>. Acesso em: 10. Mai. 2015 .)

CAMARGO, P.B.; TRUMBORE, S.E.; MARTINELLI, L.A.; DAVIDSON, E.A.; NEPSTAD, D.C.; VICTORIA, R.L. Soil carbon dynamics in regrowing forest of eastern Amazonia. **Global Change Biology**, v.5, p.693- 702, 1999.

CAMPBELL, C. A. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. In: SCHNITZER, M.; KHAN, S.U. (Eds.) **Soil Organic Matter**. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978, cap. 5, p.173-271.

CARVALHO, J.L.N.; AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N.; MELLO, C.R.; CERRI, C.E.P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 34, p. 277-289, 2010.

CARVALHO, A.M.X.; VALE, H.M.M.; FERREIRA, E.M.; CORDERO, A.F.P.; BARROS, N.F.; COSTA, M.D. Atividade microbiana de solo e serapilheira em áreas povoadas com *Pinus elliottii* e *T. terminalia ivorensis*. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 32, p. 2709–2716, 2008.

CISNEROS, B.O.A.; LÓPEZ, M.G.; RICHLING, E.; HECKEL, F.; SCHEREIER, P. Tequila Authenticity Assesment by Headspace SPME-HRGC-IRMS Analysis of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ Ratios of Ethanol. **Journal Agricultural and Food Chemistry**. v. 50, p. 7520–7523, 2002.

COELHO, R.W. **Manejo de pastagens melhoradas de inverno**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. 22 p. (Embrapa Clima Temperado. Circular técnica, 17).

CONSELHO DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOTECNOLOGIA. **Guia do eucalipto – Oportunidades para um desenvolvimento sustentável**. Disponível em: http://www.cib.org.br/pdf/Guia_do_Eucalipto_junho_2008.pdf. Acesso em: 20 out. 2009.

CORREA, F.L.; MARASCHIN, G.E. Crescimento e desaparecimento de uma pastagem nativa sob diferentes níveis de oferta de forragem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 29, p.1617-1623, 1994.

COSTA, O.V.; CANTARUTTI, R.B.; FONTES, L.E.F.; COSTA, L.M.; NACIF, P.G.S. & FARIAS, J.C. Estoque de carbono do solo sob pastagem em área de Tabuleiro Costeiro no sul da Bahia. **R. Bras. Ci. Solo**, 33:1137-1145, 2009.

COUTINHO, R.P.; URQUIAGA, S.; ROBERT MICHAEL BODDEY, R.M.; ALVES, B. J.R.; TORRES, A.Q.A.; JANTALIA, C.J. Estoque de carbono e nitrogênio e emissão de N_2O em diferentes usos do solo na Mata Atlântica. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.45, n.2, p.195-203, fev. 2010.

DAWSON, T.E.; BROOKS, P.D. Fundamentals of stable isotope chemistry and measurement. In: Unkovich M. et al. (Ed.). **Stable isotope techniques in the study of biological processes and functioning of ecosystems**. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2001. cap. I, p. 1-18

DESJARDINS, T.; BARROS, E.; SARRAZIN, M.; GIRARDIN, C.; MARIOTTI, A. .Effects of forest conversion to pasture on soil carbon content and dynamics in Brazilian Amazonian. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 103: p. 365-373, 2004.

DIEKOW, J. et al. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 year. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, p. 87-95, 2005.

DUCATTI, C. **Isótopos Estáveis Ambientais**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, 2007. 205 p. Apostila do Curso de Pós-Graduação em Zootecnia.

DUDA, G.P.; CAMPELLO, E.F.C.; MENDONÇA, E.S.; LOURES J.L.; DOMINGOS, M. Avaliação de frações de matéria orgânica do solo para caracterização de áreas degradadas. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 23, p. 723-728, 1999.

EKDAL, C. A.; KEELING, C. D. Atmospheric carbon dioxide and radiocarbon in the natural carbon cycle I: Quantitative deductions from records at Mauna Loa

Observatory and at the South Pole. In: WOODWELL, G.M; PECAN, E.V. (Eds). **CO² production from fossil fuel combustion and kilning of limestone**. New York: Brookhaven National Lab. Carbon and the biosphere. Carbon and the Biosphere conference Upton, 1973, p. 51-85.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1997, p. 212.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

FARQUHAR, G.D.; O'LEARY, M.H.; BERRY, J.A. On the relationship between carbon isotope discrimination and intercellular carbon dioxide concentration in leaves. **Austrian Journal Plant Physiology**, v. 9, p. 121-137, 1982.

FARQUHAR, G.D.; EHLERINGER, J.R.; HUBICK, K.T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 40, p. 503-537, 1989.

FERREIRA, M.; SANTOS, P.E.T. Melhoramento genético florestal do Eucalyptus no Brasil: breve histórico e perspectivas. In: CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF Eucalyptus, 1997, Salvador. Anais EMBRAPA/CNPF, p. 14-34, 1997.

FREITAS JUNIOR, G.; SOLERA, D.A.G. Biogeografia do eucalipto no vale do paraíba paulista. São Paulo. **Revista Geográfica de América Central**, Número Especial EGAL, p. 4-8, 2011.

GAMA-RODRIGUES, A.C.; BARROS, N.F. Ciclagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. **R. Árvore**, v. 26, p. 93-207, 2002.

GAMA-RODRIGUES, E.F.; BARROS, N.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; SANTOS, G.A. Nitrogênio, carbon e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 29, p. 893-901, 2005.

GOLCHIN, A.; OADES, J.M.; SKJEMSTAD, J.O. ; CLARKE, P. Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected by ¹³C natural abundance, pyrolysis mass spectrometry and solid-state ¹³C NMR spectroscopy in density fractions of Oxisol under forest and pasture. **J. Soil Res.**, v. 33, p.59-76, 1995.

GOLLEY, F.B. Ciclagem de minerais em um ecossistema de floresta tropical úmida: tradução de Eurípides Malavolta. São Paulo: EPU; EDUSP, 1978. 256 p.

GOUVEIA, S.E.M.; PESSENDA, L.C.R. Datação da fração húmica da matéria orgânica do solo e sua comparação com idades de ¹⁴C de carvões fósseis. **Química Nova**, v.22, n.6, p.810-814, 1999.

GUO, L.B.; GIFFORD, R.M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. **Global Change Biology**, Oxford, v. 8, n. 4, p. 345-360, 2002.

HARRIS, D.C. **Análise Química Quantitativa**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1999, 862p.

HASENACK, H. (org.) **Mapeamento da cobertura vegetal do Bioma Pampa**. In: Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Sumário Executivo do mapeamento da cobertura vegetal dos biomas brasileiros. Brasília: MMA/SBF. 2006.

HASENACK, H. Campos gaúchos estão ameaçados. **Jornal da Universidade**, 2007. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/biociencias/imagens/P%2005%20-%20Atualidade.pdf>> Acesso em: 05 jun. 2014

HOEFS J.. **Stable Isotope in Geochemistry**. 5. ed. Germany: Springer- Verlag, 2004, 244 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Vocabulário Básico de Recursos Naturais e Meio Ambiente**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2004.

IMSAM, H. Microorganisms and Humus in Soils. In: PICCOLO, A. (Ed.) **Humic Substances in Terrestrial Ecosystems**. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1996. p.265-292.

KRAUS, J. E. O que é fotossíntese? In: **Programa de Educação Continuada: Aperfeiçoamento de professores – Professor da educação básica II**. Biologia, 2005. p. 28-39.

LEITE, P. F.; KLEIN, R. M. Vegetação. In: IBGE. **Geografia do Brasil: Região Sul**. Rio de Janeiro: IBGE, 1990. v. 2, p.113-150.

LEITE, F.P.; SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Alterations of soil chemical properties by eucalyptus cultivation in five regions in the Rio Doce Valley. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 34, p. 821-831, 2010.

LEKHA, A.; GUPTA, S.R. Decomposition of populus in Leucaena leaf litter in an agroforestry system. **Int. Environ.Sci.** v.15, p. 97-108. 1989.

LIMA, A.M.N.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; MENDONÇA, E.S.; SMYTH, T.J.; MOREIRA, M.S.; LEITE, F.P. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in Southeastern Brazil. **For. Ecol. Manag.** v. 235, p. 219-231, 2006.

LIMA, W.P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 1996. 302 p.

MARTINELLI, L.A.; OMETTO, J.P.H.B.; FERRAZ, E.S.; VICTORIA, R.L.; CAMARGO, P.B.; MOREIRA, M.Z. **Desvendando questões ambientais com isótopos estáveis**. São Paulo, Oficina de Textos, 2009. p. 10-144.

McLAUHLAN, K.K. Effects of soil texture on soil carbon and nitrogen dynamic after cessation of agriculture. **Geoderma**. v. 136, p. 289-299, 2006.

MEIER W. Applied gas chromatography coupled to isotope ratio mass spectrometry. **Journal of Chromatography**, v. 842, p.351-371, 1999.

MEIRELLES, D.; CALAZANS, M. **H₂O para celulose x água para todas as línguas**. Vitória: FASE, 2006.

MENDHAM, D.S.; HEAGNEY, E.C.; CORBEELS, M.; O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S.; McMURTRIE, R.E. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*. **Soil Biol. Biochem.** v. 36, p.1067-1074, 2004.

MOOJEN, E.L. **Dinâmica e potencial produtivo de uma pastagem nativa do Rio Grande do Sul submetida a pressões de pastejo, épocas de diferimento e níveis de adubação**. 1991. 172f. Porto Alegre, Tese (Doutorado em Zootecnia - Programa de pós Graduação em Agronomia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1991.

MORA, A.L.; GARCIA, C.H.A Cultura do Eucalipto no Brasil. São Paulo: **Sociedade Brasileira de Silvicultura**, 2000.

MORAES, J.F.L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon Forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, v. 70, p. 63-81, 1996.

NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T.; AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; LANZANOVA, M.E. Balanço de carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 32, p. 2425-2433, 2008.

NILSSON, S.; SCHOPFHAUSER, W.; The carbon-sequestration potential of a global afforestation program. **Climate Change**, v. 30, n. 3, p. 267-293, 1995.

OLIVEIRA et al. Isótopos estáveis e produção de bebidas: de onde vem o carbono que consumimos? **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 22, p. 285-288, 2002.

PEGORARO, R.F.; SILVA, I.R. da; NOVAIS, R.F. de; BARROS, N.F. de; FONSECA, S.; DAMBROZ, C.S. Estoques de carbono e nitrogênio nas frações da matéria orgânica em Argissolosobeeucalipto e pastagem. **CiênciaFlorestal**, v.21, p.261-273, 2011.

PETERSON B.J.; FRY, B. Stable isotopes in ecosystem studies. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 18, p. 293-320, 1987.

PILLAR, V.P; MULLER, S.C.; CASTILHOS, Z.M.S.; JACQUES, A.V.A. **Campos Sulinos - conservação e uso sustentável da biodiversidade**. Brasília: MMA, 2009. 403p.

PRYOR, L. D. **The Biology of Eucalyptus**. London: Edward Arnold, 1976.

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

QUEIROZ, E.C. **Utilização dos isótopos estáveis de carbono e nitrogênio na detecção de adulteração e avaliação energética de bebidas de laranja**. 2005. 84f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres - Potafos, 1991. 343 p.

RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 31, p. 1609-1623, 2007.

RIBASKI, J.; DEDECEK, R.A.; MATTEI, V.L.; FLORES, C.A.; VARGAS, A.F.C.; RIBASKI, S.A.G. **Sistemas silvipastoris: estratégias para o desenvolvimento rural sustentável para a metade sul do estado do Rio Grande do Sul**. Colombo: Embrapa Florestas, 2005. 1-3 p. (EMBRAPA-CNPQ. Comunicado Técnico,150).

RIZVI, S.J.H., TAHIR, M., RIZVI, V. Allelopathic interactions in agroforestry systems. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 18, n. 6, p. 773-796, 1999.

ROSSMANN, A. Determination of stable isotope ratios in food analysis. **Food Reviews International**, v. 17, p. 347-381, 2001.

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE, S.P.F.; PICCOLO, M.C.; FEIGI, B.E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 65, p.1486-1499, 2001.

SCHUMACHER, M.V.; TRUBY, P.; MARAFIGA, J.M.; VIEIRA, M.; SZYMCZAK, D.A. Espécies predominantes na deposição de serapilheira em fragmento de floresta estacional decidual no Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v.21, p.479-486, 2011.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S. Matéria orgânica do solo. In: In: VARGAS, M. A. T.; HUNGRIA, M. (Eds.). **Biologia dos cerrados**. Planaltina: CPAC, 1997. p. 465-524.

SILVA B. M., SEABRA R. M., ANDRADE P. B., OLIVEIRA M. B., FERREIRA M. A., Adulteração por adição de açúcares a sumos de frutos: uma revisão. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Vol. 2, p. 184-191; 1999.

SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.275-374.

SILVA, V.E. et al. Composição lignocelulósica e isotópica da vegetação e da matéria orgânica do solo de uma turfeira tropical: I - composição florística, fitomassa e acúmulo de carbono. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 37, n. 1, p.121-133,2013.

SISTI, C.P.J.; SANTOS, H.P.; KOHHAN, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. & BODDEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil Tillage Res.**, v. 76, p. 39-58, 2004.

SMITH, B. N.; EPSTEIN, S. Two categories of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios for higher plants. **Plant Physiology**. v. 47, p. 380-384, 1971.

SOBRERO, M.T.; OCHOA, M.C.; CHAILA, S. Potencial alelopático de *Wedelia glauca*: efeito sobre espécies hortícolas. **Planta daninha**. v.22, n.1, p.71-75, 2004.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. Produção Florestal. 2007. Disponível em: <http://www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf>. Acesso em: 15 de mar. 2014.

SOUTO, J.J. Experiência na região do Alegrete no Rio Grande do Sul. In: PEREIRA, V.P.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. (Ed.). **Solos altamente suscetíveis à erosão**. Jaboticabal: UNESP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1994. p. 169-179.

SPECHT, A.; WEST, P.W. Estimation of biomass and sequestered carbon on farm forest plantations in northern New South Wales, Australia. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v. 25, n. 4, p. 363-379, Oct. 2003.

STEVENSON, F.J.; COLE, M. 1999. Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. **John Wiley**, New York. 427 pp.

SUESS, H.E. Radiation concentration in modern wood. **Science**. v. 122, n. 3166, p. 414-417, 1955.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5)

TRUMBORE, S.; DAVIDSON, E.A.; CAMARGO, P.B.; NEPSTAD, D.C.; MARTINELLI, L.A. Belowground cycling of carbon in forest and pasture of eastern Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, v.9, p.515-528, 1995.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. UFSM - Universidade federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: <<http://coralx.ufsm.br/ifcrs/resultmapa.htm>>. Acesso em: 5 ago. 2015.

URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P. Aplicação de técnicas de ^{13}C em estudos da dinâmica da matéria orgânica de solos agrícolas. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole. 2. ed., 2008. p.654.

VAN SOEST PJ. Nutritional ecology of the ruminant. **Ithaca: Comstock Publishing Associates**. 1994.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society American Journal**. v. 58, p.175-180, 1994.

VERKOUTEREN, R.M. Strategies and practicalities in the production and use of gas standard materials. In: GROOT, P. A. **Handbook of stable isotope analytical techniques**. Amsterdam: Elsevier, 2004. cap. 43, p. 944-956.

VITAL, M. H. F. Impacto Ambiental de Florestas de Eucalipto. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, V. 14, N. 28, P. 235-276, dez. 2007.

Disponível on-line <www.bndes.gov.br/SiteBNDES> acesso em 22 de janeiro de 2014.

VITAL, A.R.T. et al. Produção de serapilheira e ciclagem de nutrientes de uma floresta estacional semidecidual em zona ripária. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 793-800, 2004

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V. Estimativa do carbono da serapilheira em florestas de eucalipto de diferentes idades. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL, 9., 2003, Nova Prata. **Floresta: função social: anais**. Nova Prata: Prefeitura Municipal, 2003. 1 CD-ROM.

ZANCADA, M.C.; ALMENDROS, G.; BALLESTA, R.J. Humus quality after eucalypt reforestations in Astúrias (Northern Spain). **Sci. Total Environ**. v. 313, p. 245-258, 2003.

ZINN, Y.L.; LAL, R.; RESCK, D.V.S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil Tillage Res**. V. 84, p. 28-40, 2005.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Coleta na área de plantio de 21 anos (E3)

APÊNDICE B – Coleta em área de campo nativo (CN)



APÊNDICE C – Acondicionamento das amostras



APÊNDICE D – Protocolo para preparo, pesagem e tratamento estatístico dos resultados



LABCEN – RECEBIMENTO DE AMOSTRAS

ESPECTRÔMETRO DE MASSAS

Responsável pelas Amostras: _____

Laboratório/Contato: _____

Avaliação de ^{13}C : () sim () não

Amostra: () tecido vegetal () solo

Orientações para preparo, pesagem e tratamento dos resultados:

- O espectrômetro de massas realiza análises em amostras de solos e tecidos vegetais. Ambas deverão ser secas em temperaturas próximas a 60°C até peso constante.
- As amostras de solos após secagem, deverão ter galhos e resíduos macroscópicos retirados manualmente para depois serem moídos e peneirados em malha de 1mm. Aconselha-se que estas amostras sejam submetidas a outra moagem em gral com pistilo até adquirir um aspecto de talco, a fim de garantir a homogeneidade dos resultados.
- As amostras de tecido vegetal devem ser peneiradas em malha de 1mm também, porém é necessário atentar-se para a moagem de estruturas fibrosas de folhas e galhos menores. Sucessivas moagens podem ser realizadas a fim de garantir granulometria homogênea.
- Na pesagem, as amostras serão acondicionadas em cápsulas de estanho para posterior análise. Durante a pesagem, a mesma não deverá ser pega diretamente com as mãos e entre as pesagens de diferentes amostras, a pinça e o suporte de cápsulas deverão ser limpas com álcool etílico.
- O fechamento das cápsulas deverá ser bem feito, de modo não haver vazamentos de amostra no interior do equipamento, pois isso além de invalidar os resultados também contamina partes do equipamento.
- Sugere-se tratar os resultados de amostras analisadas em triplicata com o teste de repetibilidade, a fim de garantir confiabilidade dos resultados analíticos:

$$\%Rep = \left(1 - \frac{\sigma}{X}\right) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

% Rep: Percentagem de repetibilidade;

σ : Desvio padrão relativo do conjunto de amostras em triplicata;

X: média dos valores do conjunto de amostras de cada trincheira.

Considera-se precisos aqueles conjuntos de valores com repetibilidade superior ou igual a 95% ($p < 0,05$).

APÊNDICE E – Espectrômetro de massas – LabCEN - UFSM



APÊNDICE F – Caracterização química e física das amostras

		pH							SMP				
Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN	Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN		
0-5	4,24	5,66	5,35	6,21	7,17	0-5	6,57	6,76	6,47	7,12	7,14		
5-10	4,08	5,51	5,23	5,69	6,80	5-10	6,58	6,46	6,50	7,15	7,13		
10-20	4,21	5,39	4,96	5,21	6,10	10-20	6,81	6,32	6,29	6,80	6,97		
20-30	4,23	5,33	4,26	4,92	5,76	20-30	6,91	5,98	4,61	7,06	7,01		
30-40	4,46	5,39	3,96	5,25	5,81	30-40	7,00	6,47	3,99	7,32	6,92		
40-50	4,38	5,32	4,05	5,28	5,88	40-50	7,25	5,95	3,72	7,28	6,82		
50-70	4,13	5,07	3,70	4,80	5,48	50-70	7,02	5,39	3,36	7,36	6,45		
70-90	4,04	3,80	3,96	4,73	5,46	70-90	6,76	3,80	3,57	6,38	5,90		
		Al - cmolc/dm3							K - mg/dm3				
Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN	Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN		
0-5	0,13	0,00	0,23	0,00	0,00	0-5	0,70	0,60	1,01	1,10	0,05		
5-10	0,18	0,00	0,51	0,00	0,00	5-10	0,60	1,75	0,83	0,77	0,03		
10-20	0,18	0,44	1,28	0,78	0,00	10-20	0,68	0,96	0,96	1,14	0,03		
20-30	0,09	1,07	7,44	0,74	0,00	20-30	0,60	0,45	0,92	1,14	0,70		
30-40	0,11	0,95	13,45	0,44	0,00	30-40	0,56	0,03	1,24	1,14	0,46		
40-50	0,08	2,99	18,18	0,53	0,00	40-50	0,66	0,03	1,69	1,18	0,56		
50-70	0,33	6,33	19,02	0,68	0,45	50-70	1,30	0,03	1,51	0,77	0,82		
70-90	1,21	13,23	19,07	0,68	0,50	70-90	1,26	351,90	1,41	0,48	0,50		
		ctc efetiva - cmolc/dm3							H+Al-cmolc/dm3				
Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN	Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN		
0-5	7,93	12,98	11,37	10,81	25,10	0-5	2,27	1,83	2,55	1,21	1,18		
5-10	6,33	11,58	9,96	5,36	21,31	5-10	2,23	2,57	2,47	1,16	1,19		
10-20	6,05	16,23	10,66	5,81	27,15	10-20	1,71	3,02	3,13	1,74	1,44		
20-30	5,16	21,05	20,66	4,65	23,01	20-30	1,54	4,49	21,52	1,30	1,37		
30-40	5,53	23,73	27,32	5,25	28,07	30-40	1,38	2,56	43,85	0,96	1,52		
40-50	5,91	22,58	32,52	5,33	26,08	40-50	1,04	4,62	59,78	1,00	1,70		
50-70	13,64	30,53	30,31	5,34	30,20	50-70	1,35	8,84	90,04	0,92	2,59		
70-90	15,75	389,28	29,06	6,10	27,75	70-90	1,83	54,54	71,02	2,81	4,92		
		Ca - cmolc/dm3							P - mg/dm3				
Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN	Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN		
0-5	5,83	10,62	8,26	7,74	20,23	0-5	3,73	4,86	4,57	10,50	16,33		
5-10	4,89	8,70	6,89	3,07	16,65	5-10	0,86	2,09	1,80	2,65	5,57		
10-20	4,59	13,08	6,03	2,17	23,14	10-20	0,64	1,71	1,30	2,53	2,23		
20-30	3,75	17,57	8,77	1,85	18,35	20-30	0,56	1,91	0,87	1,70	1,79		
30-40	4,12	19,74	8,71	2,22	22,76	30-40	0,52	2,51	0,63	1,71	1,84		
40-50	4,38	17,28	8,79	2,88	19,95	40-50	0,04	3,97	0,74	0,58	1,09		
50-70	10,18	22,59	6,59	3,19	23,00	50-70	0,50	1,23	0,47	0,41	2,06		
70-90	10,41	23,13	5,66	3,75	21,66	70-90	0,46	1,03	0,49	0,42	1,09		
		Mg - cmolc/dm3							Al (m%)				
Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN	Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN		
0-5	1,27	1,76	1,87	1,96	4,82	0-5	1,58	0,00	2,05	0,00	0,00		
5-10	0,66	1,13	1,72	1,53	4,64	5-10	2,77	0,00	5,10	0,00	0,00		
10-20	0,61	1,74	2,39	1,72	3,99	10-20	2,89	2,72	12,04	13,48	0,00		
20-30	0,72	1,96	3,53	0,92	3,95	20-30	1,78	5,07	36,02	15,94	0,00		
30-40	0,74	3,02	3,91	1,44	4,86	30-40	1,96	4,00	49,24	8,41	0,00		
40-50	0,78	2,28	3,86	0,75	5,57	40-50	1,41	13,23	55,88	9,86	0,00		
50-70	1,82	1,59	3,20	0,70	5,93	50-70	2,44	20,72	62,74	12,80	1,49		
70-90	2,88	1,02	2,93	1,19	5,09	70-90	7,67	3,40	65,61	11,15	1,80		
		ctc ph 7 - cmolc/dm3							V%				
Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN	Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN		
0-5	10,07	14,81	13,69	12,02	26,27	0-5	77,50	87,65	81,36	89,93	95,52		
5-10	8,38	14,15	11,92	6,53	22,50	5-10	73,38	81,86	79,31	82,17	94,72		
10-20	7,59	18,81	12,50	6,77	28,59	10-20	77,42	83,94	75,00	74,25	94,96		
20-30	6,61	24,47	34,73	5,21	24,37	20-30	76,70	81,66	38,06	75,11	94,38		
30-40	6,81	25,34	57,71	5,77	29,60	30-40	79,69	89,91	24,03	83,43	94,85		
40-50	6,87	24,21	74,13	5,80	27,79	40-50	84,82	80,92	19,36	82,78	93,88		
50-70	14,66	33,04	101,34	5,57	32,34	50-70	90,76	73,26	11,14	83,53	91,99		
70-90	16,37	430,59	81,02	8,23	32,17	70-90	88,85	87,33	12,34	65,86	84,71		

		Areia (%)							Argila (%)				
Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN	Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN		
0-5	60,52	42,37	56,08	83,39	25,48	0-5	9,44	11,47	12,90	4,88	13,51		
5-10	58,80	52,48	56,88	82,69	22,83	5-10	7,99	11,89	11,31	4,06	11,13		
10-20	56,70	40,79	60,77	79,73	24,22	10-20	8,51	12,41	10,68	5,05	11,24		
20-30	58,48	49,92	51,54	78,29	22,54	20-30	8,00	13,86	25,23	5,05	9,23		
30-40	60,46	34,51	40,13	81,05	31,59	30-40	6,75	33,37	39,40	4,04	7,03		
40-50	59,10	31,03	40,88	78,37	31,27	40-50	6,97	39,44	40,11	5,04	8,63		
50-70	51,91	31,63	47,71	77,19	24,67	50-70	8,02	36,95	23,86	5,36	10,72		
70-90	58,72	32,50	43,73	69,28	41,44	70-90	1,17	35,05	27,18	1,23	10,55		
		Silte (%)											
Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN	Profundidade (cm)	CN	E1	E2	E3	RN		
0-5	30,03	46,15	31,00	11,73	61,00								
5-10	33,19	35,61	31,79	13,25	66,03								
10-20	34,77	46,79	28,53	15,22	64,52								
20-30	33,51	36,21	23,22	16,66	68,21								
30-40	32,78	32,11	20,45	14,91	61,37								
40-50	33,92	29,52	19,00	16,59	60,09								
50-70	40,05	31,42	28,41	17,45	64,59								
70-90	29,50	32,43	29,08	29,49	48,00								