

CARLOS MOREIRA MIQUELINO ELETO TORRES

**ESTOCAGEM DE CARBONO E INVENTÁRIO DE GASES DE EFEITO
ESTUFA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS, EM VIÇOSA, MG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

T689e
2015 Torres, Carlos Moreira Miquelino Eleto, 1987-
Estocagem de carbono e inventário de gases de efeito estufa
em sistemas agroflorestais, em Viçosa, MG / Carlos Moreira
Miquelino Eleto Torres. – Viçosa, MG, 2015.
xii,83f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Laércio Antônio Gonçalves Jacovine.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.80-82.

1. Mudanças Climáticas - Gases de efeito estufa.
2. Biomassa. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento
de Engenharia Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência
Florestal. II. Título.

CDD 22. ed. 577.27

CARLOS MOREIRA MIQUELINO ELETO TORRES

ESTOCAGEM DE CARBONO E INVENTÁRIO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS, EM VIÇOSA, MG

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

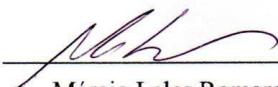
APROVADA: 08 de janeiro de 2015.



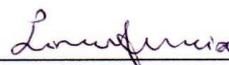
Sílvio Nolasco de Oliveira Neto
(Coorientador)



Gumercindo Souza Lima



Márcio Leles Romarco de Oliveira



Lino Roberto Ferreira



Laércio Antônio Gonçalves Jacovine
(Orientador)

“Se tiver o hábito de fazer as coisas com alegria, raramente encontrará situações difíceis.”

Nasenbonny y Silwell

"Vale a pena ser bom, mas o melhor é fazer o bem."

Nasenbonny y Silwell

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida.

Aos meus pais, Carlos Magno Torres, Marina Cecília Eleto Torres, que são tudo na minha vida, por todo amor, carinho e segurança a mim oferecido.

Aos meus irmãos, Camila Eleto Torres, Caio Moreira Miquelino Eleto Torres, Matheus Calixto Torres Moreira e Mauricio Torres Moreira, por estarem ao meu lado em todos os momentos e dividirem as vitórias e derrotas comigo.

Aos meus avôs Carlos e Totonho, às minhas avós Conceição e Cotinha, aos meus tios e tias, primas e primos.

À Fabiane Ballotin, minha namorada, por todo amor, companheirismo e por estar presente em minha vida.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), por todo apoio e pelo treinamento proporcionado.

Ao CNPq e CAPES pela concessão da bolsa de estudos e financiamento do projeto.

Ao Professor Laércio Antônio Gonçalves Jacovine, que foi muito mais que um orientador, foi um amigo, não tenho palavras para expressar toda a minha gratidão.

Ao coorientador Professor Sílvio Nolasco de Oliveira Neto, pela amizade, incentivo e sugestões.

Aos Professores Gumercindo Souza Lima e Márcio Leles Romarco de Oliveira pela disponibilidade e pelas considerações feitas ao trabalho.

Ao Professor Lino Roberto Ferreira, por ceder as áreas de estudo pela orientação e incentivo a mim dispensados.

Ao Professor Clyde William Fraise, por confiar em meu trabalho e dar todo suporte, tanto nos EUA como no Brasil.

Aos Professores Gilson Fernandes da Silva e Carlos Pedro Boechat Soares, pela amizade e pelo apoio no doutorado sanduíche.

Ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira .

Aos bolsistas de Iniciação Científica e estagiários: Lucas Arthur, Breno Loureiro, Gabriel Barros, Henrique Colares, Paulo Villanova e Mateus Castro, pela ajuda na coleta de dados.

Ao Fernando Castro por toda ajuda em todos os momentos do doutorado.

Ao Aylson Costa e a Bárbara Corradi pela amizade, companherismo, ajuda na escrita da tese.

Ao Grupo de Estudos em Economia Ambiental (GEEA), pelos conselhos, críticas e apoio em minha vida acadêmica.

Aos amigos da Universidade da Flórida: Ana Wagner, Daniel Dourte, Eduardo Gelcer, José Andreis, Hermes Gerardo, Marta Kohmann, Verona Montone, Tiago Zortea e Wayne , pelo companherismo e pelos momentos alegres vividos.

Aos funcionários do DEF, pela amizade e pelo atendimento sempre gentil, especialmente ao Alexandre, Chiquinho, Neuza e Ritinha.

Aos meus irmãos escoteiros, principalmente aos do Baleia e de Viçosa.

Ao meu grande amigo e eterno chefe Davidson Barbosa, por sempre acreditar em mim e por todo incentivo.

Aos amigos de Belo Horizonte, Alexandre Cenízio, André Gustavo, Bruno Moura, Cláudio Luiz, Luiz Fernando, Paolo Sciavicco e Pedro Parreira.

Aos amigos da Engenharia Florestal e de Viçosa, principalmente ao Angelo Casali, André Tibúrcio, Bruno Schettini, Cristina Martins, Daniel Brianezi, Eduardo Moreira, Eliana Boaventura, Erlon Valdetaro, Juliana Reis, Livia Figueiredo, Thiago Taglialegna, Vanessa Basso e Vitor Hugo Breda .

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. OBJETIVO GERAL	3
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	4
ARTIGO 1	5
Sistemas Agroflorestais no Brasil: Uma abordagem sobre a estocagem de carbono.	5
1. Introdução	6
2. Material e métodos.....	7
2.1. Caracterização do Estudo	7
2.2. Descrição dos sistemas agroflorestais estudados.....	8
3. Resultados	10
3.1. Estocagem de carbono em Sistemas Agrissilviculturais	13
3.2. Sistemas silvipastoris e agrissilvipastoris e a estocagem de carbono	14
4. Discussão	15
5. Conclusões	19
6. Referências Bibliográficas	19
ARTIGO 2	24
Estimativas da produção e propriedades da madeira de eucalipto em sistemas agroflorestais	24
1. Introdução.....	25
2. Material e Métodos	26
2.1. Localização e descrição do experimento em campo	26
2.2. Amostragem e coleta de dados	27
2.3. Propriedades da Madeira e Estimativas.....	28
2.4. Análise Estatística dos Dados.....	29
3. Resultados e Discussão	29
3.1. Características de crescimento	29
3.2. Propriedades da Madeira	31
3.3. Incremento médio anual, Biomassa seca de madeira, Carbono e Energia disponível.....	33
4. Conclusões	36
5. Referências Bibliográficas	36
ARTIGO 3	40
Carbon sequestration and quantification of greenhouse gas emissions for agroforestry systems in the Southeastern Brazil	40
Abstract.....	40
1. Introduction.....	40
2. Materials and methods	42
2.1. Study area	42
2.2. GHG inventory.....	43
2.3. Aboveground biomass quantification.....	49
3. Results.....	50
4. Discussion.....	58
5. Conclusions.....	61
6. References.....	61

Artigo 4	68
Balanco de Carbono em dois sistemas agroflorestais em Viçosa, MG.....	68
1. Introdução	69
2. Material e Métodos	70
2.1. Localização e Caracterização da Área	70
2.2. Sistemas agroflorestais estudados	71
2.3. Determinação da Biomassa do Eucalipto	72
2.4. Determinação da Biomassa do Capim Braquiária	72
2.5. Inventário de Emissões de GEE	73
3. Resultados e Discussões	75
3.1. Estoque de Carbono no sistema agrissilvipastoril e silvipastoril	75
3.2. Inventário de Emissões de GEE	76
3.3. Balanço de Carbono	78
4. Conclusões	79
5. Referências Bibliográficas	80
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83

RESUMO

TORRES, Carlos Moreira Miquelino Eleto, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Janeiro de 2015. **Estocagem de carbono e inventário de gases de efeito estufa em Sistemas Agroflorestais**. Orientador: Laércio Antônio Gonçalves Jacovine. Coorientador: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto.

O Brasil tem adotado diversas medidas de mitigação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), principalmente na área agropecuária, que é uma importante fonte emissora destes gases. Uma destas medidas é o programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC), em que são incentivadas tecnologias que contribuam para minimização das emissões de GEE pelo país. Entre as tecnologias previstas no ABC tem-se os sistemas agroflorestais (SAF's), que integram culturas agrícolas, animais e árvores. Como este tipo de atividade é recente no país e foram estabelecidas estimativas prévias sobre a contribuição destes sistemas na diminuição das emissões e aumento da remoção dos GEE, é necessário realizar estudos de monitoramento, de forma a aprimorar os valores utilizados. Desta maneira, objetivou-se quantificar a estocagem de carbono e realizar o inventário dos gases de efeito estufa em sistemas agroflorestais. O trabalho foi dividido em quatro artigos. No primeiro artigo, objetivou-se sistematizar os dados disponíveis no acervo bibliográfico que demonstrem a estocagem de carbono de diferentes arranjos agroflorestais. As pesquisas indicaram que há uma grande variação no incremento médio em carbono nos sistemas, variando de 1,26 a 11,19 t C ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo do modelo implantado. Assim, entende-se que a identificação do potencial de estocagem de carbono dos vários modelos deve ser um dos fatores a serem considerados nos incentivos à implantação dos sistemas agroflorestais. No segundo artigo, objetivou-se determinar a densidade básica, poder calorífico, teor de carbono e, também, estimar a biomassa seca de madeira, carbono e energia disponível na madeira de eucalipto proveniente de três diferentes sistemas agroflorestais. Foram avaliados SAF's com espaçamentos para o eucalipto de 9 x 1 m (Sistema 1), de 8 x 3 m (Sistema 2) e de 12 x 3 m (Sistema 3). Em cada sistema, utilizou-se três árvores-amostra por classe de DAP para a

determinação do volume individual, densidade básica e teor de carbono e Poder Calorífico Superior (PCS) da madeira. Não houve diferença significativa no teor de carbono entre os sistemas estudados. O sistema 1 obteve menor densidade da madeira, se comparado com outros sistemas. Entretanto, esse sistema obteve maiores estimativas de PCS (4.631,25 kcal kg⁻¹), de Incremento médio Anual (43,01 m³ ha⁻¹ano⁻¹), biomassa seca da madeira (17,53 t ha⁻¹ano⁻¹), de carbono (9,16 t ha⁻¹ano⁻¹) e energia disponível (69,82 GWh ha⁻¹ano⁻¹). Isso ocorreu devido ao seu espaçamento ser mais adensado (9x1m), tendo assim um maior número de árvores por hectare se comparado com o sistema 2 (8x3m) e o sistema 3 (12x3m). Assim, conclui-se que todos os sistemas apresentaram potencial de produção de biomassa seca da madeira e de carbono e energia disponível, com um destaque para o sistema 1. No terceiro artigo, objetivou-se estimar as emissões de GEEs e carbono acima do solo de sistemas silvipastoris e agrissilvipastoris, além de estimar o número de árvores necessárias para neutralizar essas emissões. Foram calculadas as emissões da produção, estoque e transporte de agroquímicos (pre-fram) e das atividades dentro da fazenda, como adubação, fermentação entérica, manejo de dejetos e maquinário. Para todos os sistemas foram quantificados o carbono acima do solo para o plantio florestal e para as gramíneas. Além disso, estimou-se o volume, a biomassa e o carbono acima do solo, por meio de equações alométricas. As emissões de GEE para os diferentes sistemas variou entre 2,81 t CO₂e ha⁻¹ e 7,98 t CO₂e ha⁻¹. O número de árvores requeridas para neutralizar as emissões variou entre 17 e 44 árvores.ha⁻¹. Assim, conclui-se que é possível neutralizar as emissões das atividades agropecuárias adotando-se o plantio de árvores nos sistemas. No quarto artigo, o objetivo foi avaliar a contribuição de dois SAFs para a redução da concentração de GEEs na atmosfera. O estudo foi conduzido em uma propriedade no município de Viçosa, MG. Foram avaliados dois sistemas agroflorestais implantados em dezembro de 2008. Um sistema agrissilvipastoril é composto por Eucalipto + Feijão + Braquiária. O outro, um sistema silvipastoril é composto por Eucalipto + Braquiária. O componente florestal foi plantado no espaçamento de 8 m entre linhas e 3 m entre plantas. Nas unidades, empregou-se o método indireto para quantificação da biomassa do componente florestal. Para a pastagem, a biomassa foi estimada pelo método direto. As emissões de GEE foram oriundas das atividades agrícolas (adubação nitrogenada) e pecuária (fermentação entérica e manejo de dejetos). As emissões de GEE foram estimadas com base nas Diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa. O sistema agrissilvipastoril apresentou maior remoção (49,99 tCO₂e) em relação ao sistema silvipastoril (42,00 tCO₂e ha⁻¹). O componente bovino foi o que apresentou maior emissão de GEE (3,49 tCO₂e ha⁻¹), quando comparado ao eucalipto, ao feijão e à braquiária. Os sistemas

apresentaram um excedente de árvores quando se pensa em neutralização, pois, seriam necessárias, em média, 50 árvores.ha⁻¹ e haviam em torno de 351 árvores.ha⁻¹. Desta forma, conclui-se que os sistemas agroflorestais contribuem para mitigação dos gases de efeito estufa na atmosfera, desempenhando um importante papel para o alcance das metas de redução de emissões de GEE estabelecidas pelo governo brasileiro, além de permitir o desenvolvimento da agropecuária mais sustentável no país.

ABSTRACT

TORRES, Carlos Moreira Miquelino Eleto, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, January, 2015. **Carbon stock and Greenhouse gases inventory in agroforestry systems** Adviser: Laércio Antônio Gonçalves Jacovine. Co-adviser: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto.

Brazil has adopted several greenhouse gases (GHG) mitigation measures, mainly in the agricultural area, which is an important emission source of these gases. One such measure is the Low Carbon Agriculture (LCA) program, in which technologies that contribute to minimizing GHG emissions in the country are encouraged. Among the technologies predicted by the LCA is the adoption of agroforestry systems (AFS), which integrate crops, animals and trees. Since this type of practice is relatively new in the country and estimates of the contribution of these systems in reducing emissions and increase the GHG removal were estimated, it is necessary to conduct monitoring studies in order to improve the values used. Thus, this study aimed to quantify the carbon storage and to produce an inventory of greenhouse gases in agroforestry systems. The work was divided into four papers. The first paper aimed to systematize the available data in the bibliography, exploring carbon storage of different agroforestry arrangements. The data indicated large variation in the average increment of carbon in agroforestry systems, which ranged from 1.26 to 11.19 t C ha⁻¹ yr⁻¹ depending on its structure and age. Thus, it is understood that the identification of the carbon storage potential of various models should be one of the factors to be considered in incentives to the implementation of agroforestry systems. In the second paper, the aim was to determine the basic density, calorific value, and carbon content, as well as estimate the dry wood biomass, carbon, and energy available in eucalyptus wood from three AFS. AFS were evaluated with spacing for eucalyptus of 9 x 1 m (System 1), of 8 x 3 m (System 2), and of 12 x 3 m (System 3). In each system, we used three trees per DBH sample element to determine the individual volume, basic density, carbon content, and higher heating value (HHV) of wood. There was no significant difference in carbon content between the systems studied.

The first system had higher HHV and lower density compared to other systems. Furthermore, this system had the highest estimates of Mean Annual Increment ($43.01 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), dry wood biomass ($17.53 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), carbon ($9.16 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), and available energy ($69.82 \text{ GWh ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) due to the spacing of planting trees ($9 \times 1 \text{ m}$), which provides greater number of trees per hectare compared to Systems 2 ($8 \times 3 \text{ m}$) and 3 ($12 \times 3 \text{ m}$). Thus, we conclude that all systems had production potential of dry woody biomass and carbon and energy available, with a highlight for System 1. The third article aimed to estimate GHG emissions and aboveground carbon storage in silvopastoral and agrosilvopastoral systems in Southeastern Brazil and to estimate the number of trees necessary to offset these emissions. GHG emissions were calculated regarding production, storage and transportation of agrochemicals (pre-farm) and farm activities such as fertilization and machinery operation (on farm). For all systems, we quantified aboveground tree biomass, aboveground grass biomass, and carbon stock. We also fitted allometric equations to estimate individual tree volume, aboveground biomass, and carbon. GHG emissions for the different agroforestry systems ranged from $2.81 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1}$ to $7.98 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1}$. The number of trees required to neutralize these emissions ranged from 17 to 44 trees ha^{-1} . Thus, it is concluded that it is possible to offset emissions from agricultural activities adopting the planting of trees in the systems. In the fourth article, the objective was to evaluate the contribution of two AFS for the reduction of GHG concentration in the atmosphere. The study was conducted in a small farm in Viçosa, MG. Two agroforestry systems were planted in December 2008. The agrosilvopastoral system was composed of Eucalyptus + Beans + Brachiaria. The silvopastoral system was composed of Eucalyptus + Brachiaria. The forestry component was planted with 8 m between rows and 3 m between plants. In both systems the indirect method was used for the quantification of forest biomass. For brachiaria, biomass was estimated by the direct method. GHG emissions were derived from agricultural activities (nitrogen fertilization) and livestock (enteric fermentation and manure management). Planting and crop harvest were performed manually, so that GHG emissions from burning fossil fuels in these activities were disregarded. Emissions were estimated based on the IPCC Guidelines for National Inventories of Greenhouse Gases. The agrosilvopastoral showed higher stock ($49.99 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$) relative to the silvopastoral system ($42.00 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$). The cattle showed higher GHG emissions ($3.49 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1}$) compared to the cultures of eucalyptus, beans and brachiaria. The systems had a surplus of trees, on average, would be needed 50 trees and there were about 351 trees ha^{-1} . Thus, it is concluded that agroforestry systems contribute to decrease the concentration of greenhouse gases in the atmosphere. Therefore, it is concluded that agroforestry systems

contribute to the mitigation of greenhouse gases in the atmosphere, playing an important role in achieving GHG emission reduction targets set by the Brazilian government, and allows the development of more sustainable farming in the country.

1. INTRODUÇÃO GERAL

As mudanças climáticas globais são temas frequentes nos debates na comunidade científica mundial. Segundo o quinto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2013), a metade da elevação da temperatura média global observada de 1951 até 2010, com 95% de certeza, tem origem antropogênica.

Desta forma, foi intuída uma série de medidas políticas para redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no mundo, como o Protocolo de Quioto. O Protocolo definiu, dentre outras providências, que os países industrializados deveriam reduzir a emissão de gases de efeito estufa em, pelo menos, 5,2% em relação aos níveis de 1990, no período entre 2008 e 2012.

Uma outra medida política, foi adotada em 2009, durante a COP 15, ocorrida em Copenhague, na Dinamarca, na qual os países em desenvolvimento se comprometeram, de maneira voluntária, a reduzir suas emissões. No Brasil criou-se a Política Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC), Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009. Dentro da PNMC o Brasil se comprometeu a reduzir entre 36,1% e 38,9% suas emissões projetadas até 2020, com base nos valores de 2005, por meio de ações de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (BRASIL, 2009).

Dentre as medidas estabelecidas pela PNMC para reduzir as emissões de GEE brasileiras está o Programa de Agricultura de Baixo Carbono (ABC), o qual procura incentivar produtores rurais a adotarem técnicas de produção que emitam menos GEE, como: sistemas agrofloretais (SAFs), plantio direto sobre palha, plantio de florestas comerciais, fixação biológica de nitrogênio, recuperação de áreas degradadas e tratamento de resíduos animais (BRASIL, 2011).

Entre as técnicas adotadas pelo programa ABC, os SAFs tem uma grande importância, pois permitem uma diversificação da produção e uma interação entre os componentes agrícolas, animais e árvores. Eles podem ser divididos em sistemas

agrossilviculturais, silvipastoris e agrossilvipastoris (integração Lavoura-Pecuária-Floresta - iLPF). Segundo OLIVEIRA NETO et al. (2010) os SAFs estão sendo cada vez mais difundidos no país que, concomitantemente com práticas conservacionistas, como o plantio direto, podem gerar importantes benefícios ambientais, econômicos e sociais, em especial em áreas degradadas.

No Brasil, tem-se implantado vários modelos de SAFs, com variações de espaçamentos, tratos culturais, espécies de árvores e de forrageiras, entre outros. A estocagem de carbono nestes sistemas, certamente, apresentam diferenças entre eles. Assim, é necessário realizar estudos para conhecer o potencial de estocagem de carbono nos diferentes sistemas.

Neste sentido, objetivou-se, com este trabalho, quantificar a estocagem de carbono e realizar o inventário dos gases de efeito estufa em sistemas agroflorestais.

Para atendimento a estes objetivos, o trabalho foi dividido em artigos, conforme descrito a seguir.

Artigo 1: Sistemas Agroflorestais no Brasil: Uma abordagem sobre a estocagem de carbono.

Artigo 2: Estimativas da produção e propriedades da madeira de eucalipto em sistemas agroflorestais.

Artigo 3: Carbon sequestration and quantification of greenhouse gas emissions for agroforestry systems in the Southeastern Brazil.

Artigo 4: Balanço de Carbono em dois sistemas agroflorestais em Viçosa, MG

2. OBJETIVO GERAL

Realizar o balanço de carbono em sistemas agroflorestais, por meio da quantificação da remoção e das emissões de gases de efeito estufa.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009. **Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm>. Acesso em 26 jun. de 2014.

BRASIL. **Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura –Versão Preliminar.** 75 p., 2011

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p., 2013.

OLIVEIRA NETO, S. N.; VALE, A. B.; NACIF, A. P. **Sistema Agrossilvipastoril: Integração Lavoura, Pecuária e Floresta,** 1ª ed. Sociedade de Investigações Florestais, 2010. 190 p.

ARTIGO 1

Sistemas Agroflorestais no Brasil: Uma abordagem sobre a estocagem de carbono.

Resumo: Os sistemas agroflorestais (SAFs) fazem parte das ações estratégicas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), que compõem a Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC). Considerando a importância destes sistemas na captura e estocagem de carbono atmosférico, é preciso avaliar esse potencial de armazenagem de carbono, a fim de incentivar essa atividade no contexto das políticas públicas brasileira sobre mudanças climáticas. Neste sentido, objetivou-se sistematizar os dados disponíveis no acervo bibliográfico que demonstrem a estocagem de carbono de diferentes arranjos agroflorestais. Os dados indicaram uma grande variação no incremento médio de carbono nos SAFs, variando de 1,26 a 11,19 t C ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo da sua estrutura e idade. Sendo assim, as estimativas de estocagem de carbono nos SAFs devem ser um dos fatores a serem considerados para incentivar essa atividade e na escolha do arranjo a ser adotado. Por fim, infere-se que esses sistemas são de grande importância para tornar práticas agropecuárias ambientalmente mais sustentáveis e para a mitigação de emissão de GEE.

Termos para indexação: Sequestro de carbono, SAF, Sistemas de uso do solo

Agroforestry Systems in the Brazil: An approach about carbon storage.

Abstract: The agroforestry systems (AFS) are part of the strategic actions to mitigate emissions of greenhouse gases (GHG), which compose the National Policy on Climate Change (NPCC). Considering the importance of these systems in capturing and storing atmospheric carbon it is necessary to evaluate this potential of carbon storage in order to encourage this activity in the context of Brazilian public policy on climate change. In this sense, it is aimed to systematize the available data in the bibliographic, demonstrating carbon storage of different agroforestry arrangements. The data indicated large variation in the average increment of carbon in agroforestry systems ranging from 1.26 to 11.19 t C ha⁻¹ yr⁻¹, depending on its structure and age. Thus, estimates of carbon storage in AFS should be one of the factors to be considered to encourage this activity and the choice of arrangement to be adopted. Finally, we infer that these systems have a great importance to make agricultural management practices more environmentally sustainable and for the mitigation of GHG emissions..

Index term: Carbon sequestration, Agroforestry systems, Land use

1. Introdução

O Brasil, em 2009, durante a 15ª Conferência das Partes (COP-15), ocorrida em Copenhague, Dinamarca, assumiu reduzir de forma voluntária as emissões de gases de efeito estufa (GEE), entre 36,1% e 38,9%, dos níveis de 2005, até 2020. Como parte integrante desta política existe a necessidade de identificar e quantificar as principais fontes de emissões e remoções de GEE, por meio de inventários nacionais e corporativos. Além disso, como o Brasil é signatário da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), tem como obrigação a elaboração e atualização periódica do inventário nacional de emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de gases de efeito estufa não controlados pelo protocolo de Montreal (Brasil, 2010).

Esse inventário relata que no Brasil, diferentemente dos países industrializados, a principal fonte das emissões líquidas estimadas de dióxido de carbono (CO_2) é proveniente da mudança do uso da terra, em particular da conversão de florestas para uso agropecuário, com 77% dessas emissões, em 2005. Além disso, as atividades agropecuárias em si são as principais fontes de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). A fermentação entérica nos ruminantes é a fonte de maior emissão de CH_4 no país, com 63,2%, em 2005. Já para o N_2O , os dejetos de animais em pastagem são as mais importantes, com 47,5% da emissão desse gás (Brasil, 2010).

Para mitigar as emissões de GEE advindas da mudança do uso da terra e cumprir as metas de redução estabelecidas pelo governo federal, criou-se o programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC), que tem como objetivos incentivar a adoção de práticas sustentáveis que garantem a redução de emissões de GEE, aliadas ao aumento de renda dos produtores, sobretudo com a expansão das seguintes tecnologias: recuperação de pastagens degradadas; sistemas agroflorestais (SAFs); sistema de plantio direto (SPD); fixação biológica de nitrogênio (FBN); e florestas plantadas (Brasil, 2011).

Dessas tecnologias, os sistemas agroflorestais, que envolvem a utilização deliberada de árvores ou outras plantas perenes lenhosas, com cultivos agrícolas, pastagens e/ou animais, visando benefícios das interações ecológicas e econômicas resultantes (Nair, 1993), integram a produção alimentar com fontes de sumidouros do gás carbônico atmosférico (CO_2), além de consistir em estratégia para a redução de desmatamentos em países tropicais, como o Brasil (Oelbermann et al., 2004).

Além de compor as estratégias das políticas públicas brasileiras, os sistemas agroflorestais são contemplados no mercado de carbono global, dentro do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL). Para que projetos de sistemas agroflorestais gerem as

reduções certificadas de emissões, consideradas créditos de carbono do MDL, existem três metodologias para a realização dos projetos. Uma destas é de larga escala, que são florestamento ou reflorestamento em terras degradadas que permitam atividades silvipastoris (AR-AM0009 - Afforestation or reforestation on degraded land allowing for silvopastoral activities) -. Outras duas metodologias se referem a projetos de pequena escala: 1) Metodologia simplificada de linha de base e monitoramento para projeto de pequena escala em Sistemas Agroflorestais - atividades de projetos de florestamento e reflorestamento no âmbito do MDL (AR-AMS0004 - Simplified baseline and monitoring methodology for small-scale agroforestry - afforestation and reforestation project activities under the clean development mechanism) e 2) Metodologia simplificada de linha de base e monitoramento para projeto de pequena escala em Sistemas Silvopastoris - atividades de projetos de florestamento e reflorestamento no âmbito do MDL (AR-AMS0006 - Simplified baseline and monitoring methodology for small-scale silvopastoral - afforestation and reforestation project activities under the clean development mechanism).

Dada a importância dos SAFs na minimização das mudanças climáticas, é preciso conhecer o potencial de estocagem de carbono nesses sistemas, de forma a balizar políticas públicas de incentivo às atividades. Neste sentido, objetivou-se analisar a estocagem de carbono em diferentes modelos de sistemas agroflorestais.

2. Material e métodos

2.1. Caracterização do Estudo

Este trabalho foi desenvolvido por meio de análise e discussão de publicações científicas sobre a estocagem de carbono em diferentes sistemas agroflorestais no Brasil.

A estocagem de carbono foi subdividida de acordo com os compartimentos estabelecidos por Pennam et al. (2003) (Tabela 1).

A literatura disponível apresentava dados de estoque de carbono acima do solo e a idade de implantação dos sistemas. Assim, para padronização dos resultados, os dados de estoque foram transformados em incremento médio de carbono acima do solo (IM-AGB). Esse é um método simples, que permite a comparação de resultados, porém deve-se considerar que existem muitas variáveis intervenientes na fixação do carbono ao longo do ciclo dos SAFs, como características de solo, luminosidade, tipo de manejo, etc.

Tabela 1: Definição dos sumidouros de carbono terrestre.

Reservatório		Descrição
Biomassa viva	Biomassa acima do solo (AGB)	Biomassa viva acima do solo, incluindo tronco, galhos, cascas, sementes e folhagem.
	Biomassa abaixo do solo (BGB)	Biomassa viva de raízes.
Matéria orgânica morta	Madeira morta	Biomassa lenhosa não viva encontrada no solo e na superfície, excluindo a serapilheira.
	Serapilheira	Biomassa morta com diâmetro inferior ao mínimo estabelecido pelo país (por exemplo, 10 cm), sobre o solo mineral ou orgânico. Composta pela serapilheira, camadas fúlvicas e húmicas.
Solos	Matéria orgânica no solo	Carbono orgânico em solos minerais e orgânicos (incluindo turfa) a uma profundidade específica estabelecida pelo país e monitorada por meio de uma série histórica.

Fonte: Pennam et al. (2003)

2.2. Descrição dos sistemas agroflorestais estudados

2.2.1. Sistemas Agrissilviculturais

São caracterizados pela associação de árvores com culturas agrícolas e podem incluir diferentes tipos de consórcios, como: Sistema agroflorestal regenerativo análogo, culturas em aléias, sistemas agroflorestais com árvores e culturas perenes, entre outros (Nair, 1985).

Sistema Agroflorestal Regenerativo Análogo (SAFRA) ou Agrofloresta

O modelo denominado SAFRA caracteriza-se por um sistema de multi-estratos, que busca reproduzir a arquitetura do ecossistema tropical original, onde se aproveita o espaço horizontal e vertical, aumentando a diversidade e otimizando a radiação, umidade e nutrientes, o que possibilita explorar da melhor forma os diferentes estratos que compõe o sistema (Götsch, 1995; Dubois et al., 1996; Vivan, 1998).

Cada SAFRA possui uma dinâmica fotossintética devido às condições edafoclimáticas e pela composição e arranjo espacial das espécies utilizadas, formando assim, classes distintas de estoque de carbono (Winrock International, 1997; Bolfe et al., 2009).

Culturas em Aléias

O sistema de cultivo em aléias é um tipo de sistema agroflorestal simultâneo que consiste na associação de culturas agrícolas intercaladas com árvores e/ou arbustos, geralmente fixadores de nitrogênio. As podas periódicas realizadas nas árvores ou arbustos

permitem a melhoria das características químicas do solo, podendo, assim, aumentar sua fertilidade (Mafra et al., 1998; Bertalot, 2003)

Montagnini & Nair (2004) relatam que os cultivos em aléias podem manter os estoques de carbono do solo pelo ingresso das podas de árvores e pelos restos culturais, além do estoque nos componentes arbóreos, contribuindo com as questões climáticas globais.

Sistemas Agroflorestais com árvores e culturas perenes

Neste sistema, árvores, madeiras e/ ou frutíferas, de sombra são combinadas com culturas perenes tolerantes à sombra, como café, cacau, cupuaçu, banana, coco, chá preto, erva-mate (Engel, 1999). As culturas perenes apresentam vantagens, pois, além de estocar o carbono por um período de tempo maior, a sua exploração não necessariamente acaba com o corte da madeira, o que poderia levar à emissão de GEE (Albrecht & Kandji, 2003).

Sistemas com Cacau

O cacau (*Theobroma cacao* L.) é uma espécie ombrófila, oriunda do sub-bosque da Floresta Amazônica, que foi tradicionalmente cultivado em SAFs, principalmente no sudeste do Estado da Bahia (Piasentin & Saito, 2012).

O cacau tem sido plantado em subbosques de florestas nativas, sistema cabruca, ou consorciado com espécies florestais, que apresentam um longo período de maturidade e são plantadas em espaçamentos amplos, como a seringueira (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). O sistema cabruca é um sistema tradicional de cultivo do cacau no sul da Bahia, baseado na ocupação do sub-bosque por uma cultura de interesse econômico, geralmente o cacau, implantada de forma descontínua e circundada por vegetação natural, não afetando as relações com os sistemas remanescentes (Lobão et al., 2004)

Sambuichi (2006) estudando um Sistema cabruca, no município de Ilhéus, BA, afirma que os altos valores de área basal e de incremento diamétrico encontrados em seu estudo, é um indicativo de que as cabucas podem ser utilizadas para o sequestro e estoque de carbono.

Café Sombreado

O café é uma cultura que está sofrendo consequências, como a perda de produtividade, devido às mudanças climáticas globais. Deconto (2008) relata que com tais mudanças a cultura poderá sofrer por deficiência hídrica ou por excesso térmico nas regiões tradicionais. Estados como São Paulo e Minas Gerais poderão perder boa parte da área hoje cultivada, e regiões do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul poderão ter aumento na

produção, porém não suficiente para compensar as perdas gerais da cultura na agricultura brasileira.

Uma medida para mitigação das mudanças climáticas e dos impactos gerados por esta para a cultura do café é a arborização dos cafezais. As árvores podem trazer benefícios para a cultura, como a redução da temperatura do solo e do ar, da velocidade do vento e o aumento da umidade relativa (UR) (DaMatta, 2004), minimizando possíveis perdas provenientes das mudanças climáticas, além de serem sumidouros do CO₂ atmosférico.

2.2.2. Sistemas Silvistoris e Agrissilvistoris

Sistemas silvistoris são formas de uso da terra no quais árvores ou arbustos são combinados com a produção de pastagem e animais, em uma mesma unidade de área. Já nos sistemas agrissilvistoris, além das árvores e pastagem/animais, existe a associação desses elementos com culturas agrícolas (Nair, 1993).

Esses sistemas são muito importantes para a mitigação e/ou compensação dos GEE emitidos pelo setor agropecuário brasileiro (Nair et al., 2011). Segundo Brasil (2010), a pecuária, por meio da fermentação entérica dos ruminantes é a fonte de emissão de CH₄ mais importante no país, com 63,2%, em 2005, além de emitir mais CH₄ e N₂O, por meio do manejo de dejetos dos animais. Com isso, a arborização de pastagens pode contribuir para a captura de carbono e para a menor emissão de N₂O, devido à melhoria de qualidade de vida dos animais, e para a mitigação da emissão de CH₄ pelos ruminantes (Porfírio-da-Silva, 2006).

3. Resultados

Os resultados de estocagem de carbono dos diferentes arranjos agroflorestais são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Estoque e incremento de carbono para os diferentes sistemas agroflorestais.

Estado	SAF	Idade (anos)	Estoque de carbono (t ha ⁻¹)					IM-AGB (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Autor	
			AGB	BGB	Serapilheira	Pastagem	Solos			Total
Sistema SAFRA										
PA	SAF-1	14	40,10	-	1,59	-	84,90	126,59	2,86	Brancher (2010)
PA	SAF-2	14	44,16	-	1,87	-	82,38	128,41	3,15	Brancher (2010)
PA	SAF-3	9	37,27	-	2,35	-	83,18	122,80	4,14	Brancher (2010)
PA	SAF-4	9	43,95	-	3,17	-	90,69	137,81	4,88	Brancher (2010)
PA	Floresta nativa + Frutíferas	12	134,30	-	-	-	-	134,30	11,19	Santos et al. (2004)
SP	Multiestratos	4	31,83	-	4,39	-	29,93	66,15	7,96	Froufe et al. (2011)
SP	Multiestratos	8	35,47	-	4,19	-	44,90	84,58	4,43	Froufe et al. (2011)
SP	Multiestratos	16	29,78	-	4,65	-	40,95	75,38	1,86	Froufe et al. (2011)
Média			49,61	-	3,17	-	65,28	109,50	5,06	
Sistemas agroflorestais com árvores e culturas perenes										
BA	Seringueira + Cacau	-	72,19	17,68	1,67	-	-	91,54	-	Cotta (2005)
BA	Seringueira	34	68,41	16,24	-	-	-	84,65	2,01	Cotta (2005)
BA	Cacau	6	3,78	1,44	-	-	-	5,22	0,63	Cotta (2005)
RO	Café + Bandarra	12	97,20	-	-	-	-	97,20	8,10	Rodrigues et al. (2000)
RO	Café + Seringueira	12	64,50	-	-	-	-	64,50	5,38	Rodrigues et al. (2000)
MG	Café + Macadâmia	10	12,55	-	-	-	-	12,55	1,26	Coltri et al. (2011)
Média			61,61	17,68	1,67	-	-	66,45	3,48	
Sistemas silvipastoris e agrissilvipastoris										
MG	Eucalipto + Acacia	10	14,29	-	-	0,58	-	14,87	1,43	Müller et al. (2009)
RS	Eucalipto (1000 árv. ha-1)	21	80,20	-	-	-	-	80,20	3,82	Oliveira (2008)
RS	Eucalipto (500 árv. ha-1)	21	71,50	-	-	-	-	71,50	3,40	Oliveira (2008)
Continua...										

Continuação Tabela 2

Estado	SAF	Idade (anos)	Estoque de carbono (t ha ⁻¹)					IM-AGB (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Autor	
			AGB	BGB	Serapilheira	Pastagem	Solos			Total
Sistemas silvipastoris e agrissilvipastoris										
RS	Pinus (1000 árv. ha ⁻¹)	21	70,60	-	-	-	-	70,60	3,36	Oliveira (2008)
RS	Pinus (500 árv. ha ⁻¹)	21	63,10	-	-	-	-	63,10	3,00	Oliveira (2008)
SP	Pinus elliottii (200 árv. ha ⁻¹)	30	66,01	23,57	4,19	3,29	97,24	194,30	2,20	Gutmanis (2004)
SP	Pinus elliottii (400 árv. ha ⁻¹)	30	119,70	40,78	5,81	2,67	89,37	258,33	3,99	Gutmanis (2004)
MG	Eucalipto	11	63,55	6,23	10,89	3,70		84,37	5,78	Tsukamoto Filho (2003)
Média			68,62	23,53	6,96	2,56	93,31	104,66	3,37	

AGB – Biomassa acima do solo; BGB - Biomassa abaixo do solo; IM-AGB - Incremento médio de carbono acima do solo.

3.1. Estocagem de carbono em Sistemas Agrissilviculturais

Sistema Agroflorestal Regenerativo Análogo (SAFRA) ou Agrofloresta

Em estudo com diferentes modelos de sistemas agroflorestais; SAF-1 composto por cacau (*Theobroma cacao*), açaí (*Euterpe oleracea* Mart.), bananeira (*Musa cavendishii* L.) e seringueira (*Hevea brasiliensis*), aos 14 anos de idade; SAF-2 composto por cacau, açaí, bananeira, seringueira, taperebá (*Spondias mombin* L.), paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) e macaúba (*Platymiscium trinitatis* Benth.), aos 14 anos; SAF-3 composto por cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* L.), açaí, teca (*Tectona grandis* Lf) e mogno (*Swietenia macrophylla* King), aos 9 anos; e SAF-4 composto por cupuaçu, açaí e paricá, aos 9 anos, no município de Tomé-Açu, PA, observou-se um estoque de carbono total (biomassa aérea, serapilheira e solo) de 126,59; 128,41; 122,80 e 137,81 t C ha⁻¹, para os SAFs 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Assim, o incremento médio de carbono acima do solo (IM-AGB) dos sistemas correspondem à 2,86; 3,15; 4,14 e 4,88 t C ha⁻¹ ano⁻¹, para os SAFs 1, 2, 3 e 4, respectivamente (Brancher, 2010).

Outro estudo envolvendo SAFRA, formado a partir do manejo de uma floresta nativa já explorada, com elevada densidade de palmeiras (principalmente açaí) e frutíferas (principalmente cacau), aos 12 anos, foi realizado nas várzeas do rio Juba, Cametá, PA. Para estimar a biomassa e carbono da parte aérea (madeira/estipe e folhas) dos SAFs, a vegetação foi dividida em açaí, cacau e árvores (espécies nativas pré-existent). O estoque médio total de carbono da vegetação foi de 134,30 t ha⁻¹; no qual 131,63 t ha⁻¹ (98%) foram estocadas nas árvores, 2,01 t ha⁻¹ (1,5%) no açaí e o 0,65 t ha⁻¹ (0,5%) no cacau. O IM-AGB encontrado foi de 11,19 t ha⁻¹ ano⁻¹ (Santos et al., 2004).

Froufe et al. (2011) avaliaram o estoque de carbono de Agroflorestas compostas por espécies agrícolas (com predominância de banana) e espécies florestais, incluindo nativas e exóticas; capoeiras em diferentes estágios de regeneração, sistemas agrícolas convencionais e pastagens, na região do Alto Vale do Ribeira, SP. Os autores observaram que, em média, as capoeiras apresentaram maior estoque de carbono, 115,78 t ha⁻¹, seguida pelas agroflorestas com 75,37 t ha⁻¹, cultivos agrícolas 47,07 t ha⁻¹ e das pastagens 36,01 t ha⁻¹. O IM-AGB dos SAFs variou entre 1,86 e 7,96 t C ha⁻¹ ano⁻¹. O SAF com 4 anos obteve uma estocagem de carbono total (biomassa acima do solo + serapilheira + solo) de 66,15 t ha⁻¹ e um IM-AGB de 7,96 t ha⁻¹ ano⁻¹. O SAF com 8 anos obteve estocagem de 84,58 t ha⁻¹ e incremento de 4,43 t ha⁻¹ ano⁻¹ e o de 16 anos obteve 75,38 t ha⁻¹ e 1,86 t ha⁻¹ ano⁻¹, para a estocagem e incremento, respectivamente.

Estoque de carbono nas Culturas em Aléias

Em um sistema em aléias, com leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.) e com o cultivo intercalar de centeio (*Secale cereale* L.) + aveia (*Avena* ssp.) e milho (*Zea mays* L.) + feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), no município de Botucatu, SP, Mafra et al. (1998) encontraram produção anual de biomassa de $11,04 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo que a poda da leucena produziu $4,47 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, a serapilheira $2,40 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e os restos culturais, que estavam presente na serapilheira, $4,17 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Sistemas Agroflorestais com árvores e culturas perenes

Sistemas com Cacau

Em um sistema com seringueira e cacau, no município de Igrapiúna, BA, composto por seringueiras com 34 anos de idade, e cacauzeiros com 6 anos, verificou-se $91,54 \text{ t C ha}^{-1}$ de estoque de carbono, sendo que $84,65 \text{ t C ha}^{-1}$ estavam estocados nas seringueiras ($68,41 \text{ t C ha}^{-1}$ na parte aérea e $16,24 \text{ t C ha}^{-1}$ nas raízes), $5,22 \text{ t C ha}^{-1}$ nos cacauzeiros ($3,78 \text{ t C ha}^{-1}$ na parte aérea e $1,44 \text{ t C ha}^{-1}$ nas raízes) e $1,67 \text{ t C ha}^{-1}$ na serapilheira. A seringueira apresentou um IM-AGB de $2,01 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e o cacau $0,63 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Cotta, 2005).

Café Sombreado

Em sistemas agroflorestais compostos por café e bandarria (*Schizolobium amazonicum*) e café e seringueira (*Hevea brasiliensis*), aos 12 anos, nos municípios de Theobroma e Ji-Paraná, RO, Rodrigues et al. (2000) observaram estoque de C, acima do solo, de $97,2$ e $64,5 \text{ t C ha}^{-1}$, respectivamente. Os sistemas obtiveram um IM-AGB de $8,10 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $5,38 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente.

Coltri et al. (2011), estudando um sistema cafeeiro arborizado com macadâmia (*Macadamia* ssp.), aos 10 anos, no município de São Sebastião do Paraíso, na Região Sul de Minas Gerais, encontraram um estoque de carbono de $12,55 \text{ t C ha}^{-1}$, sendo que as plantas de café estocaram $10,65 \text{ t C ha}^{-1}$ e as de macadâmia $1,9 \text{ t C ha}^{-1}$. O sistema obteve um IM-AGB de $1,26 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

3.2. Sistemas silvipastoris e agrissilvipastoris e a estocagem de carbono

Em um sistema silvipastoril misto, com eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e acácia (*Acacia mangium*), implantado na Zona da Mata mineira, aos 10 anos, com densidade de 105 árv. ha^{-1} , sendo 60 árvores de eucalipto e 45 árvores de acácia, observou-se um estoque estimado de $14,29 \text{ t C ha}^{-1}$, no qual $11,17 \text{ t C ha}^{-1}$ estavam estocados no eucalipto e $3,12$ na acácia. O sistema apresentou um IM-AGB de $1,43 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Müller et al., 2009).

Em sistemas silvipastoris com eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e pinus (*Pinus. elliottii*), em diferentes áreas e com densidades de 1.000 e 500 árvores por hectare, no município de Alegrete, RS, aos 21 anos, o estoque de carbono acima do solo do sistema com pinus foi de 63,1 e 70,6 t C ha⁻¹, e o IM-AGB foi de 3,00 e 3,36 t C ha⁻¹ ano⁻¹, para densidades de 500 e 1.000 árvores por hectare, respectivamente. No sistema com eucalipto, o estoque de carbono acima do solo foi de 71,5 e 80,2 t C ha⁻¹ e o IM-AGB foi de 3,40 e 3,82 t C ha⁻¹ ano⁻¹, para densidades de 500 e 1.000 árvores por hectare, respectivamente (Oliveira, 2008).

No município de Nova Odessa, SP, Gutmanis (2004) avaliou duas densidades populacionais de *Pinus elliottii* (200 e 400 árv. ha⁻¹) em sistema silvipastoril, aos 30 anos de idade, e observou um estoque de carbono de 89,58 t C ha⁻¹ para as árvores (66,01 t C ha⁻¹ acima do solo e 23,57 t C ha⁻¹ abaixo do solo), 3,29 t C ha⁻¹ para o capim, 4,18 t C ha⁻¹ para a serapilheira e 97,24 t C ha⁻¹ no solo. Além disso, apresentou um IM-AGB de 2,20 t C ha⁻¹ ano⁻¹, na densidade de 200 árv. ha⁻¹. Na densidade de 400 árvores ha⁻¹ o autor observou um estoque de 160,48 t C ha⁻¹ para as árvores (119,70 t C ha⁻¹ acima do solo e 40,78 t C ha⁻¹ abaixo do solo), 2,67 para o capim, 5,81 para a serapilheira e 89,37 t C ha⁻¹ no solo. Além disso, apresentou um IM-AGB de 3,99 t C ha⁻¹ ano⁻¹.

Tsukamoto Filho (2003), ao estudar a fixação de carbono em um sistema agrissilvipastoril com eucalipto, no município de Paracatu, MG, observou um estoque de carbono no sistema de 84,37 t C ha⁻¹, aos 11 anos, sendo que 63,55; 6,23; 10,89 e 3,70 t C ha⁻¹ estavam estocados na biomassa acima do solo, biomassa abaixo do solo, serapilheira e pastagem, respectivamente. O sistema apresentou um IM-AGB de 5,78 t C ha⁻¹ ano⁻¹.

4. Discussão

Biomassa Acima do Solo

A biomassa acima do solo geralmente representa a maior fração de biomassa viva total em uma floresta (Brown, 1997). A dinâmica de produção dessa biomassa é alterada de acordo com o desenvolvimento da floresta. À medida que a floresta se desenvolve ocorre uma redução gradual da biomassa da copa das árvores, aumentando a proporção dos componentes madeira e casca. Em uma floresta madura, esses componentes representam, em média, mais de 80% da biomassa acima do solo (Schumacher & Hoppe, 1997).

Nos Sistemas analisados verificou-se que todos tinham os dados sobre a biomassa estimada acima do solo, pois este é o compartimento de mais fácil mensuração. Os sistemas que obtiveram o maior estoque foi o SAFRA com floresta nativa + frutíferas, aos 12 anos, nos estado do PA, com uma estocagem de 134,30 t C ha⁻¹, seguido pelo sistema silvipastoril

com *Pinus elliottii* (400 árv ha⁻¹), aos 30 anos, no estado de SP, com 119,70 t C ha⁻¹ e pelo sistema com café + bandarra, aos 12 anos, no estado de RO, com 97,20 t C ha⁻¹ (Tabela 2).

A estocagem feita pelo sistema com café + bandarra foi similar ao encontrado por Schumacher & Witschoreck (2004), em um inventário de carbono em povoamentos de eucalipto na região sul do Brasil, em que obtiveram um estoque de carbono, aos 8 anos, igual a 97,86 t ha⁻¹.

As médias de 49,61 t ha⁻¹; 61,61 t ha⁻¹; e 68,62 t ha⁻¹ para o SAFRA, sistemas agroflorestais com árvores e culturas perenes e sistemas silvipastoris e agrissilvipastoris, respectivamente, foram superiores ao encontrado por Paixão (2004), estudando a quantificação do estoque de carbono em um povoamento de eucalipto, aos 6 anos, no município de Viçosa, MG, que foi de 47,7 tC ha⁻¹.

Quando se analisa o IM-AGB verifica-se que existe uma variação de 1,26 a 11,19 t C ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo da composição, arranjo e idade dos sistemas. O modelo denominado sistema agroflorestal regenerativo análogo, em média, foi o que obteve o maior IM-AGB. Isso acontece, pois o SAFRA apresenta um maior número de espécies arbóreas e/ou arbustivas existentes, por unidade de área, favorecendo a estocagem de carbono (Mosquera-Losada et al., 2011).

Os valores encontrados para IM-AGB são compatíveis aos obtidos por Reis et al. (1994), em plantios de eucalipto no Estado do Espírito Santo, que determinaram um IM-AGB de 8,05 t ha⁻¹ ano⁻¹, correspondendo a 78% da estocagem total (65% provenientes da biomassa do tronco e 13% da copa). Os valores também são similares ao estudo de Mello & Gonçalves (2008), que avaliaram plantações comerciais de eucalipto (*Eucalyptus grandis*), aos 9 anos de idade, em dois sítios no planalto ocidental do Estado de São Paulo. Os autores encontraram para o sítio mais produtivo e para o menos produtivo um IM-AGB de 7,25 t ha⁻¹ ano⁻¹ e 5,20 t ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente.

Biomassa Abaixo do solo

A biomassa abaixo do solo pode ser dividida em raízes finas e grossas. As raízes finas são responsáveis pela absorção de água e nutrientes (Bowen, 1985) e constituem parte importante na estocagem de carbono, porém em muitos estudos elas não são mensuradas (Ostonen et al., 2005). As raízes grossas são compostas pelas raízes estruturais com maiores dimensões, que são responsáveis pelo suporte da parte aérea e podem acumular cerca de 30% da biomassa total nos ecossistemas florestais (Brassard et al., 2011).

A relação de alocação da biomassa relativa entre as raízes e a parte aérea é determinada por fatores bióticos, como a espécie e a idade da floresta ou plantio, e fatores abióticos, como a textura, umidade e disponibilidade de nutrientes do solo (Cairns et al., 1997).

A estocagem de carbono nas raízes dos sistemas estudados variou entre 6,23 e 40,78 t C ha⁻¹ (Tabela 2). Paixão (2004), verificou uma estocagem 14,71 t C ha⁻¹ pelas raízes em um povoamento de eucalipto, aos 6 anos, no município de Viçosa, MG.

Para os sistemas agroflorestais com árvores e culturas perenes a estocagem nas raízes correspondeu a 19,67% da biomassa viva, e para os sistemas silvipastoris e agrissilvipastoris foi de 20,22%. Esses valores são próximos ao encontrado por Reis et al. (1994), em plantios de eucalipto no Estado do Espírito Santo, em que as raízes corresponderam a 22% da estocagem da biomassa viva.

Serapilheira

A serapilheira é formada pelos fragmentos orgânicos (frutos, sementes, flores, galhos, cascas e folhas), que caem sobre o solo por meio de diversos processos (Golley et al., 1978). A partir do momento que é depositada sobre o solo, a biomassa é submetida a um processo de decomposição que é iniciada pela ação da fauna edáfica, que degrada o material para que este seja, posteriormente, decomposto pelos micro-organismos (Calvi et al., 2009). Ao final desse processo, há a liberação eventual dos nutrientes minerais que compõem os tecidos orgânicos (Golley et al., 1978).

Segundo Figueiredo Filho et al. (2005), vários fatores abióticos e bióticos como tipo de vegetação, precipitação, altitude, temperatura, latitude, luminosidade, relevo, decíduosidade, estágio sucessional, disponibilidade hídrica e características do solo afetam a produção de serapilheira. Dependendo das características de cada ecossistema, um determinado fator pode prevalecer sobre os demais.

Entre os sistemas avaliados, o sistema agrissilvipastoril com eucalipto, aos 11 anos, em MG apresentou a maior estocagem pela serapilheira com 10,89 t C ha⁻¹, seguido pelo sistema silvipastoril com *Pinus elliottii* (400 árv ha⁻¹), aos 30 anos, no estado de SP, com 5,81 t C ha⁻¹.

Esses valores foram inferiores ao encontrado por Reis et al. (1994), em plantios de eucalipto no Estado do Espírito Santo, aos 7 anos, em que a estocagem foi de 12,38 t C ha⁻¹, mas próximos ao observado por Paixão (2004), na serapilheira em um povoamento de eucalipto, aos 6 anos, no município de Viçosa, MG (8,72 t C ha⁻¹).

Solos

A quantidade de carbono orgânico no solo está relacionada com a entrada de material orgânico, por meio da senescência de certos componentes da biomassa acima e abaixo do solo, queda das folhas, resíduos da exploração e animais mortos, com suas respectivas taxas de decomposição (Balbinot et al., 2003). Segundo Lehmann & Zech (1998); de 20 a 50% da renovação das raízes e de 10 a 20% da serapilheira é transformada em matéria orgânica do solo.

Nos sistemas agroflorestais avaliados, a estocagem de carbono no solo variou entre 29,93 e 97,24 t ha⁻¹. Esses valores foram inferiores aos encontrados por Corazza et al. (1999), que estudaram a estocagem de carbono em uma área de vegetação típica de cerrado e outra com plantio de eucalipto com 12 anos (Tabela 3).

Tabela 3: Estoque de Carbono nas diferentes camadas no solo

Camada de solo (cm)	Conteúdo de Carbono (t ha ⁻¹)	
	Cerrado	Eucalipto
0 - 20	39,77	44,87
20 - 40	30,09	33,50
40 - 100	63,72	69,81
Conteúdo Total	133,59	148,19

Pulrolnik et al. (2009) verificaram que o cerrado sensu stricto, em Itamarandiba, MG, apresentou estocagem de carbono orgânico total inferior a um plantio de eucalipto, aos 20 anos, e também a uma pastagem (Tabela 4). Isso se deve, provavelmente, ao sistema radicular de ciclagem rápida da pastagem e à maior produção de serapilheira no eucalipto.

Tabela 4: Estoques de carbono orgânico total nas diversas camadas de solo sob Cerrado, pastagem e eucalipto.

Camada de solo (cm)	Conteúdo de Carbono (t ha ⁻¹)		
	Cerrado	Pastagem	Eucalipto
0 - 10	22,39	23,88	23,57
10 - 20	21,18	23,83	22,26
20 - 40	30,69	34,45	35,65
40 - 60	22,63	26,40	26,93
60 - 100	35,80	41,93	44,04
Conteúdo Total	132,69	150,49	152,45

5. Conclusões

Os sistemas agroflorestais contribuem para captura de CO₂ atmosférico e sua estocagem na superfície terrestre. Esse processo fortalece a importância dos SAFs na mitigação das mudanças climáticas.

A estocagem de carbono nos SAFs variou em função do arranjo implantado e da idade do sistema, sendo que o sistema agroflorestal regenerativo análogo apresentou maior potencial, alcançando 11,19 ton C ha⁻¹.

A maior capacidade de estocagem de carbono nos sistema agroflorestal regenerativo análogo ocorre em função do maior número de espécies arbóreas e/ou arbustivas existentes, por unidade de área.

Os sistemas agroflorestais são estratégicos na estocagem de carbono e mitigação da emissão de GEE. Estes sistemas devem ser incentivados no Plano Nacional sobre Mudanças do Clima, de forma a tornar as práticas agropecuárias ambientalmente mais sustentáveis.

6. Referências Bibliográficas

ALBRECHT, A.; KANDJI, S. T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, NL, v. 99, n. 1, p. 15-27, 2003.

BALBINOT, R.; SCHUMACHER, M. V.; WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 5, n. 1, 2003.

BERTALOT, M. J. A. **Cultura do milho (*Zea mays* L.) em sucessão com aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) em áreas sob manejo agroflorestal em aléias com *Leucaena diversifolia***. 2003. 88 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

BOLFE, E. L.; FERREIRA, M. C.; BATISTELLA, M. Biomassa epígea e estoque de carbono de agroflorestas em Tomé-Açu, PA. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Espírito Santo, v. 4, n. 2, p. 2171-2175, 2009.

BOWEN, G. D. Roots as a component of tree productivity. In: CANNELL, M. G. R.; JACKSON, J. E. (Ed.). **Attributes of trees as crop plants**. Huntingdon, UK: Institute of Terrestrial Ecology, 1985. p. 303-315.

BRANCHER, T. **Estoque e ciclagem de carbono de sistemas agroflorestais em Tomé-Açu, Amazônia Oriental**. 2010. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal do Pará, Belém, PA.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura**. Brasília, DF, o 2011. 75 p. Versão preliminar.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Segunda comunicação inicial do Brasil**: parte II: inventário de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal. Brasília, DF, 2010. 102 p.

BRASSARD, B. W.; CHEN, H. Y. N.; BERGERON, Y.; PARÉ, D. Coarse root biomass allometric equations for *Abies balsamea*, *Picea mariana*, *Pinus banksiana*, and *Populus tremuloides* in the boreal forest of Ontario, Canada. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 10, p. 4189-4196, 2011.

BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Rome: FAO, 1997. 55 p.

CAIRNS, M. A.; BROWN, S.; HELMER, E. H.; BAUMGARDNER G. A. Root biomass allocation in the world's upland forests. **Oecologia**, v. 111, n. 1, p. 1-11, 1997.

CALVI, G. P.; PEREIRA, M. G.; ESPÍNDULA JÚNIOR, A. Produção de serapilheira e aporte de nutrientes em áreas de Floresta Atlântica em Santa Maria de Jetibá, ES. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 19, n. 2, 2009.

COLTRI, P. P.; LAZARIM, C.; DIAS, R.; ZULLO JUNIOR, J.; PINTO, H. S. Estoque de carbono em sistemas cafeeiros a pleno sol e cultivado com macadâmia no sul de Minas Gerais, Brasil. **Anais...** In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 7., 2011, Araxá. Anais... Brasília, DF: Embrapa Café, 2011.

COTTA, M. K. **Quantificação de biomassa e análise econômica do consórcio seringueira-cacau para geração de créditos de carbono**. 2005. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CORAZZA, E. J.; SILVA J. E.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n. 2, p. 425-432, 1999.

DaMATTA, F. M. Fisiologia do cafeeiro em sistemas arborizados. In: MATSUMOTO, S. N. (Org.). **Arborização de Cafezais no Brasil**. Vitória da Conquista: Edições UESB, 2004. p. 23-41.

DECONTO, J. G. (Coord.) **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2008. 82 p.

DUBOIS, J. C. L.; VIANA, V. M.; ANDERSON A. B. **Manual agroflorestal para a Amazônia**. Rio de Janeiro: REBRAAF, 1996. v. 1. 228 p.

ENGEL, V. L. **Introdução aos sistemas agroflorestais**. Botucatu: FEPAF, 1999. 70 p.

ESPIG, S. A.; FREIRE, F. J.; MARANGON, L. C.; FERREIRA, R. L. C.; FREIRE, M. B. G. dos S.; ESPIG, D. B. Sazonalidade, composição e aporte de nutrientes da serapilheira em fragmento de Mata Atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 33, n. 5, p. 949-956, 2009.

FIGUEIREDO FILHO, A.; SERPE, E. L.; BECKER, M.; SANTOS, D. F. Produção estacional de serapilheira em uma floresta Ombrófila Mista na Floresta Nacional de Irati (PR). **Ambiência**: Revista do Centro de Ciências Agrárias e Ambientais, Guarapuava, v. 1, n. 2, p. 257-269, 2005.

FROUFE, L. C. M.; RACHWAL, M. F. G.; SEOANE, C. E. S. Potencial de sistemas agroflorestais multiestrata para sequestro de carbono em áreas de ocorrência de Floresta Atlântica. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 143-154, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.66.143

GOLLEY, F. B.; MCGINNIS, J. T.; CLEMENTS, R. G.; CHILD, G. I.; DUEVER, M. J. **Ciclagem de minerais em um ecossistema de floresta tropical úmida**. São Paulo: EDUSP, 1978. 256 p.

GÖTSCH, E. **Break-through in agriculture**. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1995. 22 p.

GUTMANIS, D. **Estoque de carbono e dinâmica ecofisiológica em sistemas silvipastoris**. 2004. 142 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP.

LEHMANN, J.; ZECH, W. Fine root turnover of irrigated hedgerow intercropping in Northern Kenya. **Plant and Soil**, The Hague, v. 198, p. 19-31, 1998.

LOBÃO, D. E.; SETENTA W. C.; VALLE, R. R. Sistema agrossilvicultural cacauero - modelo de agricultura sustentável. **Agrossilvicultura**, Viçosa, v. 1, n. 2, p. 163-173, 2004.

MAFRA, A. L.; MIKLÓS, A. A. W.; VOCURCA, H. L.; HARKALY, A. H.; MENDOZA, E. Produção de fitomassa e atributos químicos do solo sob cultivo em aléias e sob vegetação nativa de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 43-48, 1998.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 101-111, 2008.

MONTAGNINI, F.; NAIR, P. K. R. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry system. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, NL, v. 61, n. 1/3, p. 281-298, 2004.

MOSQUERA-LOSADA, M. R.; FREESE, D.; RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A. Carbon sequestration in European Agroforestry Systems. In: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. (Ed.). **Carbon sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges**. London: New York: Springer, 2011. p. 43-59.

MÜLLER, M. D.; FERNANDES, E. N.; CASTRO, C. R. T.; PACIULLO, D. S. C.; ALVES, F. F. Estimativa de acúmulo de biomassa e carbono em sistema agrossilvipastoril na Zona da

Mata Mineira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 60, p. 11-17, 2009. Edição especial.

NAIR, P. K. R. Classification of agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 3, n. 2, p. 97-128, 1985.

NAIR, P. K. R. **An introduction to agroforestry**. Dordrecht, NL: Kluwer Academic Publishers, 1993. 499 p.

NAIR, P. K. R.; TONUCCI, R. G.; GARCIA, R.; NAIR, V. D. Silvopasture and carbon sequestration with special reference to the Brazilian savanna (Cerrado). In: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. (Ed.). **Carbon sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges**. London: New York: Springer, 2011. p.145-162.

OELBERMANN, M.; VORONEY, R. P.; GORDON, A. M. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, NL, v. 104, p. 359–377, 2004.

OLIVEIRA, E. B. de; RIBASKI, J.; ZANETTI, É. A.; PENTEADO JÚNIOR, J. F. Produção, carbono e rentabilidade econômica de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* em sistemas silvipastoris no Sul do Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 57, p. 45-56, 2008.

OSTONEN, I.; LÖHMUS, K.; PAJUSTE, K. Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: Comparison of soil core and ingrowth core methods. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, NL, v. 212, n. 1-3, p. 264-277, 2005.

PAIXÃO, F. A. **Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de alternativas de uso de um povoamento de eucalipto**. 2004. 50 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PENNAM, J.; GYTARSKY, M.; HIRAISHI, T.; KRUG, T.; KRUGER, D.; PIPATTI, R.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K.; WAGNER, F. (Ed.). **Good practice guidance for land use, land use change and forestry. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**, Hayama, Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies for the IPCC; The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2003.

PIASENTIN, F. A.; SAITO, C. H. Caracterização do cultivo de cacau na região econômica litoral sul, sudeste da Bahia. **Estudo & Debate**, Lageado, v. 19, n. 2, p. 63-80, 2012.

PORFÍRIO-DA-SILVA, V. **Arborização de pastagens: I. Procedimentos para introdução de árvores em pastagens**. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 8 p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 155).

PULROLNIK, K.; BARROS, N. F. de; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BRANDANI, C. B. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 33, n. 5, p. 1125-1136, 2009.

REIS, M. das G. F. REIS, G. G; VALENTE, O. F.; FERNANDES, H. A. C. Sequestro e armazenamento de carbono em florestas nativas e plantadas dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQUESTRO DE CO₂, 1., 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. p. 155-195.

RODRIGUES, V. G. S.; CASTILLA, C.; COSTA, R. C. da; PALM, C. Estoque de carbono em sistema agroflorestal com café em Rondônia – Brasil. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos Expandidos**. [Poços de Caldas: s.n., 2000].

SAMBUICHI, R. H. R. Estrutura e dinâmica do componente arbóreo em área de cabruca na região cacauceira do sul da Bahia. **Acta Botanica Brasilica**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 943-954, 2006.

SANTOS, S. R. M.; MIRANDA, I. S.; TOURINHO, M. M. Estimativa de biomassa de sistemas agroflorestais das varzeas do rio Juba, Cameta, PA. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 34, n. 1, p. 1-8, 2004.

SCHUMACHER, M. V.; HOPPE, J. M. **A complexidade dos ecossistemas**. Porto Alegre: Pallotti, 1997. 50 p.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R. Inventário de carbono em povoamentos de Eucalyptusssp nas propriedades fumageiras do sul do Brasil: “um estudo de caso”. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO SOBRE FIXAÇÃO DE CARBONO, 2004, Curitiba. **Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas**. Curitiba: UFPR; Instituto Ecoplan, 2004. Part. 7. p. 111-124.

TSUKAMOTO FILHO, A. A. **Fixação de carbono em um sistema agroflorestal com eucalipto na região do Cerrado de Minas Gerais**. 2003. 98 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

VIVAN, J. L. **Agricultura e Florestas: princípios de uma interação vital**. Guaíba, RS: Agropecuária, 1998. 207 p.

WINROCK INTERNATIONAL. **A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects**. California: California University, 1997. 87 p.

ARTIGO 2

Estimativas da produção e propriedades da madeira de eucalipto em sistemas agroflorestais

Resumo: A madeira de eucalipto proveniente de sistemas agroflorestais (SAFs) pode ser utilizada para diversos fins, como lenha, moirões, madeira serrada e carvão vegetal. A madeira utilizada para fins energéticos, sobretudo na forma de lenha, é obtida, principalmente, pelo desbaste e apresenta diâmetros reduzidos. Desta forma, objetivou-se determinar a densidade básica, poder calorífico, teor de carbono e também estimar a biomassa seca de madeira, carbono e energia disponível na madeira de eucalipto proveniente de três SAFs. Foram avaliados SAF's com espaçamentos para o eucalipto de 9 x 1 m (Sistema 1), de 8 x 3 m (Sistema 2) e de 12 x 3 m (Sistema 3). Em cada sistema, utilizou-se três árvores-amostra por classe de DAP para a determinação do volume individual, densidade básica e teor de carbono e Poder Calorífico Superior (PCS) da madeira. Não houve diferença significativa no teor de carbono entre os sistemas estudados. O sistema 1 obteve maior PCS e menor densidade quando comparado com os demais sistemas. Além disso, esse sistema obteve maiores estimativas de Incremento Médio Anual ($43,01 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), biomassa seca da madeira ($17,53 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), carbono ($9,16 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e energia disponível ($69,82 \text{ GWh ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em decorrência do espaçamento de plantio das árvores (9x1m), que proporciona maior número de árvores por hectare em comparação com os sistemas 2 (8 x 3 m) e 3 (12 x 3 m). Assim, conclui-se que todos os sistemas apresentaram potencial de produção de biomassa seca da madeira e de carbono e energia disponível, com um destaque para o sistema 1.

Palavras-chave: Integração lavoura-pecuária-floresta, Energia, Espaçamento

Estimates of production and properties of eucalyptus wood in agroforestry systems

Abstract: The eucalyptus wood from Agroforestry Systems (AFS) can be used for various purposes such as firewood, fence posts, lumber and charcoal. The wood used for energy purposes, mainly in the form of firewood, is obtained by thinning and it have smaller diameters. Thus, the aim with this work was to determine the basic density, calorific value, carbon content, and also estimate the dry wood biomass, carbon and energy available in eucalyptus wood from three AFS. AFS were evaluated with spacing for eucalyptus of 9 x 1 m (System 1), of 8 x 3 m (System 2), and of 12 x 3 m (System 3). In each system, we used three trees per DBH sample element to determine the individual volume, basic density, carbon content, and higher heating value (HHV) of wood.. There was no significant difference in carbon content between the systems studied. The first system had higher HHV and lower density compared to other systems. Furthermore, this system had the highest estimates of Mean Annual Increment ($43.01 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), dry wood biomass ($17.53 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), carbon

(9.16 t ha⁻¹ yr⁻¹) and available energy (69.82 GWh ha⁻¹ yr⁻¹) due to the spacing of planting trees (9x1m), which provides greater number of trees per hectare compared with the two systems (8 x 3 m) and 3 (12 x 3 m). However, the system 1 showed a higher number of trees in smaller diametric classes, indicating the need for thinning, when you want to produce larger timber.

Keywords: Crop-livestock-forest integration, Energy, Tree Spacing

1. Introdução

Nos últimos anos, o Governo Federal tem implementado programas de incentivo à adoção de sistemas agrissilvipastoril e silvipastoril, por meio do Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar – PRONAF, modalidades Floresta e Eco, e do Programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC). Nestes modelos de sistemas agroflorestais, culturas agrícolas, árvores, pastagens e animais são integrados visando potencializar interações ecológicas e econômicas resultantes, consistindo em potencial alternativa para agricultores interessados na produção de madeira.

No Brasil, espécies do gênero *Eucalyptus* têm sido as mais utilizadas na composição desses sistemas, diante o potencial de crescimento, adaptação a diferentes condições ecológicas e usos de sua madeira, aliados ao conhecimento silvicultural e genético adquirido nas últimas décadas (OLIVEIRA NETO et al., 2007).

O volume de madeira produzido e sua qualidade podem ser influenciados pelo arranjos espaciais adotados nesses sistemas, uma vez que são mais amplos, visando otimizar a disponibilidade de recursos de crescimento para outras espécies que os compõem (FONTAN et al., 2011; GONÇALVES et al., 2004).

Os espaçamentos amplos do componente arbóreo em sistemas agrissilvipastoris e silvipastoris favorecem o crescimento em diâmetro e volume individual das árvores (LEITE et al. 2006) e são fundamentais para a satisfatória produção das espécies forrageiras (OLIVEIRA NETO e PAIVA, 2010 e PRASAD et al., 2010). Quando espaçamentos menores, entre plantas, nas linhas de plantios, ou fileiras múltiplas adensadas, são adotados visando elevar o número de árvores por área, desbastes tornam-se necessários quando se planeja a produção de madeira de qualidade para serraria (FRANKE e FURTADO 2001; OLIVEIRA NETO e PAIVA, 2010). A madeira obtida pelo desbaste normalmente apresenta dimensões reduzidas, indicando a utilização para fins energéticos, sobretudo na forma de lenha.

Estudos sobre a viabilidade econômica destes sistemas normalmente consideram apenas o crescimento das árvores e a produção volumétrica de madeira (CORDEIRO e SILVA, 2010; PAULA et al., 2013), desconsiderando suas características tecnológicas, que podem variar de acordo com o espaçamento de plantio e idade de corte das árvores. Sendo assim, estimativas da densidade básica, do teor de carbono e de energia, são importantes para uma análise mais consistente sobre a viabilidade da produção de madeira nestes sistemas, conforme destacado por Santos et al. (2012).

Diante disto, este estudo teve como objetivo avaliar a produção de biomassa seca e as propriedades da madeira de eucalipto para fins energéticos produzida em sistemas agrissilvipastoril e silvipastoril.

2. Material e Métodos

2.1. Localização e descrição do experimento em campo

Foram avaliados três sistemas, localizados na zona rural do município de Viçosa (20°45' S e 42°51' W), MG, que apresenta altitude média de 650m e clima, segundo a classificação de Köppen, do tipo Cwa, mesotérmico, com inverno seco e verão chuvoso (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual é de aproximadamente 1.200 mm e a temperatura média anual de 19,4°C, com mínima de 14,8°C e máxima de 26,4 °C (RAMOS et al. 2009).

As informações sobre o histórico dos sistemas e adubações realizadas foram coletadas por meio de entrevistas aos produtores rurais. Os sistemas avaliados são descritos a seguir e na Tabela 1:

- Sistema 1: Pasto (*Brachiaria decumbens*) + eucalipto (*Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*)

Para o plantio do eucalipto aplicou-se 0,2 kg NPK (06-30-06) cova⁻¹ e, após 3 meses, foi realizada uma adubação de cobertura de 0,16 kg NPK (20-05-20) cova⁻¹. Para a pastagem aplicou-se 100 kg uréia ha⁻¹ ano⁻¹.

- Sistema 2: Feijão (*Phaseolus vulgaris*) + pasto (*Brachiaria decumbens*) + eucalipto (*Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*)

No sistema 2, foi realizada dessecação em área total com herbicida glyphosate na dose de 1 L ha⁻¹, antes da implantação do sistema. Os plantios do capim-braquiária e do feijão foram realizados simultaneamente, com auxílio de plantadeira com tração animal específica para o plantio direto. Para a cultura do feijão, aplicou-se 300 kg NPK (08-28-16) ha⁻¹ e 200

kg uréia ha⁻¹ em cobertura. Após a colheita do feijão foi mantido somente o pasto com eucalipto, aplicando-se 100 kg uréia ha⁻¹ ano⁻¹. O plantio e a manutenção do eucalipto seguiram os mesmos procedimentos do sistema 1.

- Sistema 3: Pasto (*Brachiaria decumbens*) + eucalipto (*Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*)

No plantio do eucalipto foi aplicado 0,2 kg NPK (06-30-06) cova⁻¹ e realizadas quatro adubações de cobertura com 0,05 kg NPK (20-05-20) planta⁻¹, 60 dias após o plantio, 0,1 kg NPK (20-05-20) planta⁻¹ 120 dias após, 0,15 kg NPK (20-05-20) planta⁻¹, aos 10 meses e 0,1 kg KCl planta⁻¹, aos 18 meses. Para o capim-braquiária, que já estava estabelecido, aplicou-se, no ano de 2011, 100 kg NPK (20-05-20) ha⁻¹.

Tabela 1: Resumo dos sistemas silvipastoris (1 e 3) e agrissilvipastoril (2)

Sistema	Cultura agrícola	Pastagem	Idade (meses)	Área (ha)	Espaçamento do eucalipto (m)	Densidade (árvores ha ⁻¹)
1	-	Braquiária	32	0,55	9 x 1	1.111
2	Feijão	Braquiária	32	0,72	8 x 3	416
3	-	Braquiária	32	3,48	12 x 3	277

2.2. Amostragem e coleta de dados

Após 32 meses do plantio, foi realizado o censo florestal nos sistemas avaliados, mensurando o CAP (Circunferência com casca à 1,30m de altura) e as alturas total e comercial de todas as árvores. Foi realizada a caracterização da distribuição diamétrica do povoamento florestal e selecionadas, em cada sistema, três árvores-amostra por classe de DAP.

Para a determinação do volume do fuste com e sem casca de cada árvore amostra, realizou-se o abate e foram mensurados os diâmetros com casca e as espessuras da casca nas alturas de 0,3m, 0,7m, 1,3m e, a partir desta altura, a cada 2 metros, até um diâmetro mínimo com casca de 3 cm (altura comercial).

Além disso, para cada árvore amostra, foram retirados discos de 2,5 cm de espessura a 0 (base), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco e a 1,3 m. Cada disco foi subdividido em quatro partes, em forma de cunha, passando pela medula. Duas cunhas opostas foram utilizadas para determinação da densidade básica da madeira, sendo o restante utilizada para análises da composição elementar e poder calorífico superior.

2.3. Propriedades da Madeira e Estimativas

Para a determinação da densidade básica da madeira foi utilizado o método de imersão em água, descrito por Vital (1984) e pela NBR 11941 (ABNT, 2003), utilizando-se uma balança hidrostática. Os valores médios foram calculados a partir da média aritmética das densidades das respectivas cunhas.

O poder calorífico superior da madeira foi determinado segundo a norma da NBR 8633 (ABNT, 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

O teor de C na madeira foi determinado pelo método da combustão seca, utilizando-se um determinador elementar de C, H e N (TruSpec Micro CHN LECO Corp., St. Joseph, MI).

A biomassa seca de madeira sem casca foi obtida multiplicando-se o Incremento Médio Anual Volumétrico (IMA) da madeira sem casca pela densidade básica da madeira, conforme a equação (1):

$$\text{MSM} = \text{IMA} \times \text{Dbm} \quad (1)$$

em que:

MSM = biomassa seca de madeira ($\text{t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$);

IMA = volume da madeira sem casca ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$); e

Dbm = densidade básica da madeira (kg m^{-3}).

O estoque de carbono foi obtido multiplicando-se a biomassa seca de madeira pelo teor de carbono na madeira, conforme a equação(2).

$$\text{MC} = \text{MSM} \times \text{C} \quad (2)$$

em que:

MC = Carbono ($\text{t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$);

MSM = biomassa seca da madeira ($\text{t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$); e

C (%) = teor de carbono.

Para o cálculo da quantidade de energia, expressa em kWh, multiplicou-se a biomassa de matéria seca da madeira pelo poder calorífico superior, fazendo-se a equivalência de 10^{-6} GWh a 859,85 kcal, calculado pela equação (3).

$$\text{Energia Disponível} = \text{MSM} \times \text{PCS mad} \quad (3)$$

em que:

Energia Disponível = energia por hectare ano⁻¹ ($\text{GWh ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$);

MSM = biomassa seca da madeira ($\text{t ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$);e

PCS mad = poder calorífico superior da madeira (kcal kg^{-1}).

2.4. Análise Estatística dos Dados

Os resultados foram interpretados com o auxílio da análise de variância (ANOVA), aplicando-se o teste F, e quando estabelecidas diferenças significativas as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software R.

3. Resultados e Discussão

3.1. Características de crescimento

As características das árvores-amostras dos três sistemas, por classe diamétrica, estão apresentadas na Tabela 2.

As árvores no sistema 1, cujo espaçamento de plantio foi de 9 x 1 m, apresentaram maiores alturas, se comparadas com aquelas dos sistemas 2 e 3, com espaçamentos de 8 x 3 m e 12 x 3 m, respectivamente. Esse maior crescimento em altura das árvores do sistema 1 pode ser explicado pela competição entre as plantas, pois este sistema tem uma menor área útil por planta (9 m²), se comparado com sistema 2 (24 m²) e com o 3 (36 m²). Além disso, nos sistemas 2 e 3, a distância entre plantas na linha é de três metros, enquanto no sistema 1 é um metro.

Essa competição fez com as árvores tivessem um menor crescimento em diâmetro e um aumento na altura total. Nesse sistema há também um maior número de árvores dominadas, ou seja, classes diamétricas menores (Tabela 2), demonstrando que o processo de competição promoveu crescimento mais desuniforme das árvores.

Em nível de povoamento, o Sistema 1 apresentou um volume de madeira com casca 61% maior que o Sistema 2 e 79% maior que o sistema 3. Já para o volume sem casca o Sistema 1 foi 57% e 78% maior que o Sistema 2 e 3, respectivamente (Tabela 3). Porém, acredita-se que com o aumento da idade dos plantios os sistemas com espaçamentos mais amplos terão um maior potencial de crescimento das árvores e, como consequência, um volume mais próximo daqueles sistemas com espaçamentos menores, que terão maior competição por recursos de crescimento, podendo ocorrer inclusive a morte de árvores dominadas (BERGER, 2000; SANTOS, 2011).

Tabela 2: Características de crescimento das árvores-amostras por classe diamétrica, em cada sistema agroflorestal

Sistema 1 (9 x 1 m)								
Centro de Classe	Ht	Hc	DAPcc	DAPsc	Vcc	Vsc	Vcasca	%Casca
6,25	10,09	7,83	6,79	6,35	0,03	0,02	0,003	13,53
8,75	14,29	11,63	9,18	8,48	0,08	0,06	0,01	13,88
11,25	16,05	13,35	11,6	10,7	0,12	0,10	0,02	15,66
13,75	18,47	15,92	14,5	13,51	0,21	0,18	0,03	13,46
16,25	19,2	16,81	15,68	14,61	0,26	0,22	0,03	13,36
18,75	-	-	-	-	-	-	-	-
Média Ponderada	16,59	14,04	12,53	11,65	0,16	0,14	0,02	14,06
Sistema 2 (8 x 3 m)								
Centro de Classe	Ht	Hc	DAPcc	DAPsc	Vcc	Vsc	Vcasca	%Casca
6,25	-	-	-	-	-	-	-	-
8,75	10,28	7,70	9,00	7,98	0,05	0,04	0,01	20,76
11,25	13,55	11,04	12,07	10,83	0,11	0,09	0,02	17,82
13,75	15,84	13,44	14,63	13,38	0,19	0,15	0,03	16,61
16,25	18,15	15,93	17,52	16,32	0,29	0,24	0,04	14,47
18,75	-	-	-	-	-	-	-	-
Média Ponderada	15,03	12,61	13,84	12,62	0,17	0,14	0,03	16,90
Sistema 3 (12 x 3 m)								
Centro de Classe	Ht	Hc	DAPcc	DAPsc	Vcc	Vsc	Vcasca	%Casca
6,25	6,18	4,07	6,92	6,34	0,02	0,01	0,003	17,36
8,75	9,97	7,44	9,68	8,67	0,06	0,05	0,01	19,91
11,25	12,0	9,92	11,72	10,66	0,10	0,08	0,02	18,01
13,75	13,5	11,21	13,97	12,52	0,15	0,12	0,03	19,98
16,25	15,25	13,21	16,89	15,3	0,24	0,2	0,04	16,50
18,75	17,89	15,91	20,8	19,59	0,24	0,21	0,03	13,40
Média Ponderada	12,49	10,28	12,84	11,61	0,13	0,11	0,02	18,55

Centro de Classe = centro da classe diamétrica (cm), Ht e Hc = altura total e comercial (m), DAPcc e sc = diâmetro a 1,3m de altura do solo com e sem casca (cm), Vcc e sc = volume com e sem casca por árvore-amostra (m³), Vcasca = volume de casca (m³), % Casca = porcentagem de casca

A porcentagem de casca nos troncos das árvores nos sistemas variou entre 16 e 22%, com maior tendência no sistema 1 (Tabela 3). Oliveira et al. (1999) avaliando a porcentagem de casca para 7 diferentes espécies de eucalipto, com espaçamento convencional (2x3 m e 3x3 m), em Anhembi - SP, obtiveram uma porcentagem de 10,82% e 12,75% para *E. grandis* e *E. urophylla*, respectivamente, valores inferiores ao encontrado na pesquisa.

Tabela 3: Volume, com casca e sem casca, e porcentagem de casca, nos sistemas agroflorestais

Sistema	Volume com Casca (m ³ ha ⁻¹)	Volume sem casca (m ³ ha ⁻¹)	% Casca
1	148,23	114,66	22,65
2	58,27	48,82	16,22
3	31,27	25,80	17,49

3.2. Propriedades da Madeira

a) Densidade da madeira

A densidade básica média da madeira de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*) proveniente dos sistemas 2 e 3 foi aproximadamente 7% superior à densidade da madeira do sistema 1 (Tabela 4).

Tabela 4: Densidade básica média da madeira de eucalipto, em g.cm⁻³, por classe de diâmetro, nos sistemas agroflorestais

Sistema	Centro de Classe (cm)						Média
	6,25	8,75	11,25	13,75	16,25	18,75	
1 (9 x 1 m)	0,34	0,40	0,37	0,43	0,40	-	0,40 b
2 (8 x 3 m)	-	0,41	0,44	0,40	0,43	-	0,43 a
3 (12 x 3 m)	0,40	0,41	0,42	0,45	0,45	0,44	0,43 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente, pelo teste de TUKEY, a 5% de significância.

Os maiores valores médios da densidade foram encontrados nos sistemas cujo eucalipto foi plantado em maiores espaçamentos. Esta variação na densidade básica da madeira pode estar relacionada à disponibilidade de fotoassimilados para o crescimento em diâmetro das árvores. De acordo com Browning (1963), a variação na densidade básica refere-se a diferenças na estrutura celular, especialmente na espessura da parede celular das fibras. Quando há menor competição entre plantas, como no sistema 2 e 3, os fotoassimilados podem ser direcionados à produção de fibras com maior espessura de parede celular, que resulta no aumento da densidade da madeira.

De acordo com Souza et al. (2008), a competição por nutrientes ocasiona redução do incremento de biomassa das plantas. Desta forma, árvores plantadas em maiores espaçamentos terão maior disponibilidade de recursos de crescimento e aumento da produção de biomassa (OLIVEIRA NETO et al., 2003). Tal fato irá contribuir para o aumento da capacidade de armazenar carbono, retirando-o da atmosfera e sintetizando celulose, hemiceluloses e lignina, componentes da parede celular.

Berger (2000), avaliando o efeito do espaçamento de plantio e da adubação sobre o crescimento e a qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith, também verificou tendência de acréscimo para a densidade básica com o aumento do espaçamento.

Em relação aos centros de classe, observou-se uma tendência de aumento de densidade da madeira com o aumento do DAP das árvores. Tal fato também foi observado por Manfredi e Barichelo (1985) e Trugilho et al. (2010). Manfredi e Barichelo (1985), estudando as propriedades da madeira de povoamentos comerciais com *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* verificaram que as árvores dominadas apresentam menor taxa de fotossíntese e menor disponibilidade de fotoassimilados, e isso pode ter sido a causa determinante de menor densidade básica das árvores de menor diâmetro, nos sistemas 1, 2 e 3.

b) Teor de carbono

Em relação aos valores médios de carbono (Figura 1), não foram observadas diferenças significativas entre os sistemas, a 95% de probabilidade. Tal fato demonstra que o espaçamento e a associação de culturas agrícolas com o eucalipto não influenciaram no teor de carbono da madeira.

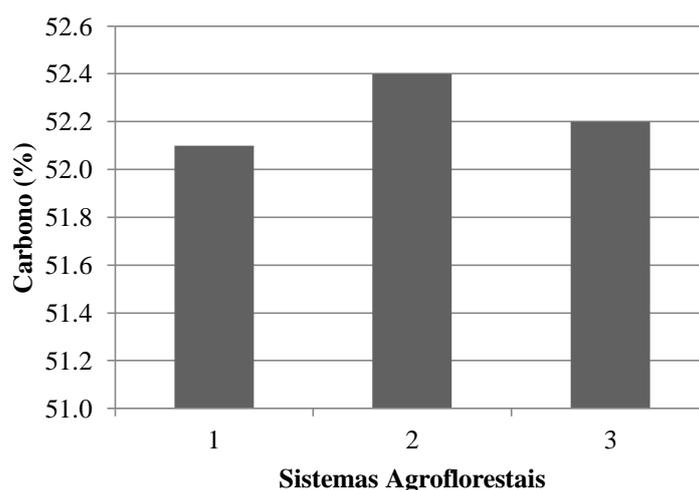


Figura 1 –Teor de carbono na madeira nos diferentes sistemas agroflorestais.

De modo geral, constatou-se, em diversos trabalhos encontrados na literatura, como os de Pereira et al. (2013), Protásio et al. (2014) e Santos et al. (2011), que não há grandes diferenças em relação à percentagem de carbono na madeira de diferentes espécies do gênero *Eucalyptus*. Além disso, esses mesmos autores observaram que a madeira é constituída de,

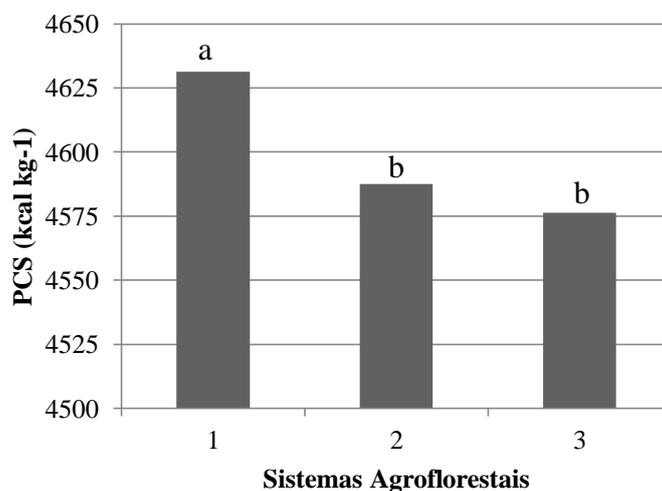
aproximadamente, 50% de carbono, valor que está em conformidades com o verificado no presente trabalho.

c) Poder calorífico

O poder calorífico superior (PCS) da madeira do sistema 1 (9 x 1 m) foi estatisticamente superior aos demais (Figura 2). Essas diferenças, provavelmente, foram causadas por variações nos teores de extrativos e lignina que afetam diretamente o poder calorífico da madeira (PEREIRA et al., 2013; SANTOS et al., 2011).

Verifica-se no sistema 1, com menor área útil por planta, que as árvores apresentaram maiores alturas comparando aos sistemas 2 e 3. De acordo com Zobel (1984), árvores mais altas possuem uma maior porcentagem de lenho juvenil, que, de modo geral, têm maior conteúdo de lignina em relação ao lenho adulto.

O PCS da madeira apresenta variação dentro do gênero *Eucalyptus*, o que pôde ser observado no presente trabalho e nos trabalhos de Oliveira et al. (2010), Santos et al. (2011), Protásio et al. (2014).



Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

Figura 2 –Poder calorífico superior da madeira sem casca nos sistemas agroflorestais.

3.3. Incremento médio anual, Biomassa seca de madeira, Carbono e Energia disponível

Em relação ao incremento médio anual (Tabela 5), observa-se que o sistema 1 foi superior aos sistemas 2 e 3. A diferença encontrada nos valores de IMA estão relacionados ao número de árvores por hectare, considerando os espaçamentos adotados em cada sistema. Os IMAs dos sistemas 2 e 3 são, respectivamente, 57,5% e 77,5% menores que o IMA do

sistema 1. Isto porque o número de árvores por hectare dos sistemas 2 e 3 é 62,5% e 75% menores que no sistema 1, respectivamente, e a variação do volume médio de madeira por árvore é similar para os sistemas 1 e 2. Já o sistema 3, apresentou o menor IMA por apresentar o menor número de árvores por hectare, além do menor volume médio de madeira por árvore. Vale salientar que se não houver uma intervenção, a partir de desbaste, poderá ocorrer uma competição entre os indivíduos dos sistemas mais adensados, e como consequência a diminuição do IMA.

Santana (2009) verificou IMA igual a $37,36 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para um clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 34 meses, em espaçamento 3,0 x 2,8 m, no município de Bom Sucesso, MG. Este IMA aproxima-se do encontrado para o sistema 1, cujas áreas úteis por planta são similares, porém com arranjos espaciais distintos.

Tabela 5 – Valores médios de incremento médio anual (IMA) e das estimativas de biomassa de matéria seca de madeira, carbono e energia nos sistemas agroflorestais

Estimativa	Sistema	Centro de classe (cm)						Total
		6,25	8,75	11,25	13,75	16,25	18,75	
IMA ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	1	1,00	1,45	9,19	25,33	6,05	-	43,01
	2	-	0,38	4,49	6,70	6,74	-	18,31
	3	0,08	0,56	2,35	3,60	2,68	0,40	9,68
Biomassa seca da madeira ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	1	0,30	0,58	3,42	10,79	2,41	-	17,53
	2	-	0,16	1,97	2,71	2,92	-	7,75
	3	0,03	0,23	1,00	1,62	1,20	0,18	4,26
Carbono ($\text{t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	1	0,20	0,30	1,79	5,63	1,26	-	9,16
	2	-	0,08	1,03	1,41	1,52	-	4,04
	3	0,02	0,12	0,52	0,85	0,63	0,09	2,23
Energia disponível ($\text{GWh ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	1	1,33	2,30	13,62	42,97	9,61	-	69,82
	2	-	0,63	7,77	10,67	11,51	-	30,58
	3	0,13	0,92	3,93	6,39	4,71	0,69	16,77

Observa-se que a produção de biomassa seca, carbono e energia no sistema 1 foram maiores que nos sistemas 2 e 3 (Tabela 6). Isso se deve aos menores valores de IMA obtidos à medida que se aumentou o espaçamento entre árvores nos sistemas. Em relação às classes diamétricas de um mesmo sistema, as diferenças nos IMAs resultaram em variações expressivas nas estimativas de biomassa seca, carbono e energia por centro de classe (Tabela 6).

Quanto à biomassa seca por hectare ano^{-1} (Tabela 5), pode-se observar que o maior valor foi observado no sistema 1, o que está relacionado ao maior número de árvores e

portanto, maior volume de madeira por hectare. A maior densidade básica da madeira de eucalipto nos sistemas 2 e 3 não foi suficiente para compensar o maior IMA do sistema 1. As biomassas secas dos sistemas 2 e 3 foram 56% e 76%, respectivamente, menores que no sistema 1.

O valor médio de biomassa seca no sistema 1, cuja área útil por árvore se assemelha a plantios florestais em monocultura que visam a produção de energia, foi de 17,53 t ha⁻¹ ano⁻¹. Esse valor se assemelha ao encontrado por Rocha (2011), para clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*, aos 48 meses de idade, em espaçamento 3 x 3 m, no município de Itamarandiba, MG, que verificou valor de biomassa seca de madeira igual a 17,66 t ha⁻¹ ano⁻¹. Santana (2009) encontrou valor médio de 14,33 t ha⁻¹ ano⁻¹ para um clone de eucalipto aos 34 meses, em espaçamento 3,0 x 2,8 m, no município de Bom Sucesso, MG.

Como não houve diferenças significativas do teor de carbono na madeira proveniente dos sistema avaliados, o que mais influenciou a massa de carbono foi a biomassa seca da madeira (Tabela 5). Portanto, como a biomassa seca de madeira do sistema 1 foi maior, a massa de carbono estocada na madeira deste sistema também foi superior aos demais. Esse comportamento evidencia que maiores IMAs aumentam o estoque de carbono no sistema agroflorestal.

A massa de carbono encontrada para o sistema 1 é próxima ao valor médio apresentado por Rocha (2011), que obteve massa de carbono na madeira correspondente a 8,63 t C ha⁻¹ ano⁻¹, para um plantio de eucalipto com idade de 48 meses em espaçamento de 3 x 3 m.

Müller et al. (2009), estudando um sistema silvipastoril misto, com *Eucalyptus grandis* (Eucalipto) e *Acacia mangium* (Acácia), aos 10 anos, com densidade de 105 árvores ha⁻¹, sendo 60 de eucalipto e 45 de acácia, implantado na Zona da Mata mineira, observaram massa de carbono de 1,43 t C.ha⁻¹ ano⁻¹.

Tsukamoto Filho et al. (2004), ao estudar a fixação de carbono em um sistema agrissilvipastoril com eucalipto, aos 11 anos, com espaçamento de 10 x 4 m, no município de Paracatu, MG, obtiveram uma massa de carbono na madeira correspondente a 5,17 t C ha⁻¹ ano⁻¹.

Analisando os valores médios obtidos para a energia estocada por hectare ano⁻¹, verifica-se que, a exemplo da biomassa seca e massa de carbono, os valores obtidos também aumentaram à medida que a área útil por árvore foi reduzida. Isso pode ser explicado pelos maiores valores obtidos de biomassa seca no sistema 1, além do maior poder calorífico superior da madeira para as árvores deste sistema (Figura 1).

Os resultados obtidos evidenciam a importância da produtividade volumétrica sobre as estimativas de biomassa seca, carbono e energia disponível nos sistemas agroflorestais avaliados. Vale destacar que no sistema 1 a área útil por árvore é menor, ocasionando maior número de árvores por hectare e produção de maior volume de madeira, contribuindo para o incremento em biomassa seca e, conseqüentemente, incrementando os demais parâmetros avaliados.

No entanto, é necessário fazer uma análise técnica e financeira da produção de madeira destes sistemas, considerando a competição entre as árvores com o tempo, os custos e as receitas advindas do desbaste para a produção de energia, a porcentagem de árvores retiradas e a idade deste desbaste.

4. Conclusões

- A densidade e o poder calorífico da madeira são afetados pelos arranjos espaciais dos sistemas agroflorestais. Já o teor de carbono não sofre influência de tais arranjos
- Os três sistemas apresentam potencial de produção de biomassa seca da madeira e de carbono e energia disponível, porém o sistema 1, que possui espaçamento mais reduzido, se apresenta com maior potencial energético.

5. Referências Bibliográficas

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Normas técnicas NBR 8633**. Brasília: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Normas técnicas NBR 11941**. Brasília: ABNT, 2003.

BERGER, R. **Crescimento e qualidade da madeira de um clone de Eucalyptus saligna Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização**, 2000. 110p. Dissertação, Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: Interscience (Wiley), 1963. 689p.

CORDEIRO, S. A.; SILVA, M. L. DA. Análise técnica e econômica de Sistemas Agrossilvipastoris. In: S. N. de Oliveira Neto; A. B. do Vale; A. de P. Nacif; M. B. Vilar; J. B. de Assis (Orgs.); **Sistema Agrossilvipastoril: integração lavoura, pecuária e floresta**. 2010. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais. p. 167-189.

FONTAN, I. C. I.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; et al. Growth of pruned eucalypt clone in an agroforestry system in southeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 83, n. 2, p. 121–131, 2011.

FRANKE, I. L.; FURTADO, S. C. **Sistemas silvipastoris: fundamentos e aplicabilidade**. Documentos, Rio Branco: Embrapa Acre, 2001. 51p

GONÇALVES, J. L. DE M.; STAPE, J. L.; LACLAU, J.-P.; SMETHURST, P.; GAVA, J. L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 45–61, 2004.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 30, n. 4, p. 603–612, 2006.

MANFREDI, V.; BARICHELO. Variação do rendimento de celulose sulfato ao longo do tronco do eucalipto. p.26, 1985. São Paulo: ABCP.

MÜLLER, M. D.; FERNANDES, E. N.; CASTRO, C. R. T. DE; PACIULLO, D. S. C.; ALVES, F. DE F. Estimativa de Acúmulo de Biomassa e Carbono em Sistema Agrossilvipastoril na Zona da Mata Mineira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 60, p. 11–17, 2009.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. DE C. O.; VITAL, B. R.; et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431–439, 2010.

OLIVEIRA, J. T. DA S.; HELLMEISTER, J. C.; SIMÕES, J. W.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: 1 - avaliações dendrométricas das árvores. **Scientia Forestalis**, v. 56, p. 113–124, 1999.

OLIVEIRA NETO, S. N. DE; PAIVA, H. N. DE. Implantação e manejo do componente arbóreo em Sistema Agrossilvipastoril. In: S. N. de Oliveira Neto; A. B. do Vale; A. de P. Nacif; M. B. Vilar; J. B. de Assis (Orgs.); **Sistema Agrossilvipastoril: integração lavoura, pecuária e floresta**. 2010. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais. p.15-68.

OLIVEIRA NETO, S. N. DE; REIS, G. G. DOS; REIS, M. DAS G. F. Eucalipto: as questões ambientais e seu potencial para sistemas agrossilvipastoris. In: E. N. Fernandes; D. S. Pacuillo; C. R. T. de Castro; et al. (Orgs.); **Sistemas agrossilvipastoris na América do Sul: desafios e potencialidades**, 2007. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite. p. 245-282

OLIVEIRA NETO, S. N. DE; REIS, G. G. DOS; REIS, M. DAS G. F.; NEVES, J. C. L. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, v. 27, n. 1, p. 15–23, 2003.

PAULA, R. R.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; OLIVEIRA NETO, S. N.; LEITE H.G.; MELIDO, R. C. N.; LOPES, H. N. S.; SOUZA, F.C. Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. **Agroforestry Systems**, n.6, p.1295-1307, 2013.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. DE C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; et al. Influence of Chemical Composition of Eucalyptus Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574–4592, 2013.

PRASAD, J. V. N. S.; KORWAR, G. R.; RAO, K. V.; et al. Tree row spacing affected agronomic and economic performance of Eucalyptus-based agroforestry in Andhra Pradesh, Southern India. **Agroforestry Systems**, v. 78, n. 3, p. 253–267, 2010.

PROTÁSIO, T. DE P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; ASSIS, M. R. DE; TRUGILHO, P. F. Clones comerciais de Eucalyptus de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 113–127, 2014.

RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A. R. D.; FORTES, L. T. G. **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990: edição revista e ampliada**. Brasília: INMET, 2009.

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de Eucalyptus grandis x Eucalyptus camaldulensis para energia**, 2011. 71 p. Dissertação, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de Eucalyptus grandis e E. urophylla com enfoque energético**, 2009. 92 p. Dissertação, Lavras: Universidade Federal de Lavras.

SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; et al. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de Eucalyptus plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, p. 971–980, 2012.

SANTOS, M. D. DOS. **Efeito do espaçamento de plantio na biomassa do fuste de um clone híbrido interespecífico de Eucalyptus grandis e Eucalyptus urophylla**, 2011. 140 p. Dissertação, Botucatu: Universidade Estadual Paulista.

SANTOS, R. C. DOS; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; et al. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 221–230, 2011.

SOUZA, A. P.; GASPAR, M.; TINÉ, M. A. S.; BUCKERIDGE, M. S. Ajustando os botões: como as plantas lidam com o aumento do CO₂ atmosférico. In: M. S. Buckeridge (Org.); **Biologia & Mudanças Climáticas no Brasil**. São Carlos: Rima Editora. p.101–113, 2008.

TRUGILHO, P. F.; ARANTES, M. D. C.; PÁDUA, F. A. DE; ALMADO, R. DE P.; BALIZA, A. E. R. Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone híbrido de Eucalyptus urophylla e Eucalyptus grandis. **Revista Cerne**, v. 16, n. suplemento, p. 33–40, 2010.

TSUKAMOTO FILHO, A. DE A.; COUTO, L.; NEVES, J. C. L.; PASSOS, C. A. M.; SILVA, M. L. DA. Fixação de carbono em um sistema agrissilvipastoril com eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. **Agrossilvicultura**, v. 1, n. 1, p. 29–41, 2004.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21p.

ZOBEL, B. The changing quality of the world wood supply. **Wood Science and Technology**, v. 18, n. 1, p. 1–17, 1984.

ARTIGO 3

Carbon sequestration and quantification of greenhouse gas emissions for agroforestry systems in the Southeastern Brazil

Abstract

Agroforestry systems have an important role for the mitigation and compensation of greenhouse gas (GHG) emissions. They can be an alternative to reduce the carbon footprint of animal production systems and increase carbon sequestration. The main objectives of this study were to estimate GHG emissions and aboveground carbon storage in silvopastoral and agrosilvopastoral systems in Southeastern Brazil and to estimate the number of trees necessary to offset these emissions. GHG emissions were calculated regarding production, storage and transportation of agrochemicals (pre-farm) and farm activities such as fertilization and machinery operation (on-farm). For all systems, we quantified aboveground tree biomass, aboveground grass biomass and carbon stock. We also fitted allometric equations to estimate individual tree volume, aboveground biomass and carbon. GHG emissions for the different agroforestry systems ranged from 2.81 t CO₂e ha⁻¹ to 7.98 t CO₂e ha⁻¹. The number of trees required to neutralize these emissions ranged from 17 to 44 trees ha⁻¹. Agroforestry systems, in Brazil, contribute to sequester CO₂ from the atmosphere and also they play an important role to help achieving GHG emission reduction targets established by the Brazilian government.

Keywords: Climate change, Carbon stock, Greenhouse gas, Emission, Mitigation, Adaptation.

1. Introduction

In the 15th Conference of the Parties (COP 15), Brazil voluntarily committed to a reduction of 36.1 % to 38.9 % of 2005 Greenhouse Gases (GHG) emission levels by 2020 (BRAZIL, 2011).

The main sources of GHG emissions in Brazil are related to agricultural activities (MCTI, 2010). For example, the principal source of carbon dioxide (CO₂) emissions is land use change, in particular, the conversion of forests into agricultural land, which contributed to 77 % of these emissions in 2005. In addition, agricultural activities are the main sources of

methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O). Enteric fermentation of ruminants was the largest source of CH₄ emissions in the country corresponding to 63.2 % in 2005. Also, the most important source of N₂O was animal manure on pasture, corresponding to 47.5 % of the emission of this gas (MCTI, 2010).

The Brazilian government established a Low Carbon Agriculture program (Agricultura de Baixo Carbono - ABC, in Portuguese) to help meeting its emission reduction goals and to mitigate GHG emissions from agriculture activities. One of the main objectives of this program is to encourage adoption of sustainable practices that guarantee the reduction of GHG emissions while also increasing farmers' income. The program aims at increasing the adoption of the following technologies and practices: renovation of degraded pastures, crop-livestock-forest integration and agroforestry systems, no-tillage systems, biological nitrogen fixation, and forests plantation (BRAZIL, 2011).

Agroforestry systems can be defined as any system of land use that involves the deliberate use of trees or any other woody perennials with crops, pastures and animals, in order to take benefits of ecological and economic interactions of different components (NAIR, 1993). It results in food production along with carbon sinks and also contributes to prevention of deforestation in tropical countries such as Brazil (IBRAHIM et al., 2010; OELBERMANN et al., 2004).

Agroforestry systems based on silvopastoral and agrosilvopastoral practices have an important role in the mitigation and compensation of GHG emissions by the Brazilian agricultural sector, mainly due to the interaction between cattle and forest (BALBINO et al., 2012; NAIR et al., 2011; PETERS et al., 2013). These systems can offer an alternative to reduce the high levels of emissions of animal production systems in developing countries (NAIR et al., 2011). They have the capacity of mitigating GHG emissions by enhancing carbon sequestration through the increase of above and belowground biomass (ALBRECHT; KANDJI, 2003; DUBE et al., 2012; NAIR, 2012; PAULA et al., 2013). Furthermore, when these systems include good management practices, such as minimum tillage, better fertilization management techniques, residue incorporation, and cover cropping they can significantly contribute to reducing GHG emissions in agriculture (HILLIER et al., 2012; KILLHAM, 2011; SMITH et al., 2008).

The main objective of this study was to estimate the GHG emissions and aboveground carbon storage in silvopastoral and agrosilvopastoral systems in southeastern Brazil and to estimate the number of trees necessary to offset these emissions.

2. Materials and methods

2.1. Study area

The study was conducted in two small farms with silvopastoral and agrosilvopastoral systems, located in Viçosa, State of Minas Gerais, Brazil (Fig.1). The climate is humid subtropical with dry winters and hot summers, classified as Cwa (Köppen classification) with average annual temperature of 19.4°C and 1,200 mm of average rainfall. The soil type is characterized as Yellow-Red Latosol. Topography is strongly undulating to mountainous with an average elevation is 689.7 m. This region is composed predominantly of small farms, of which almost 94% of farms have less than 50 hectares (PEREIRA et al., 2010).

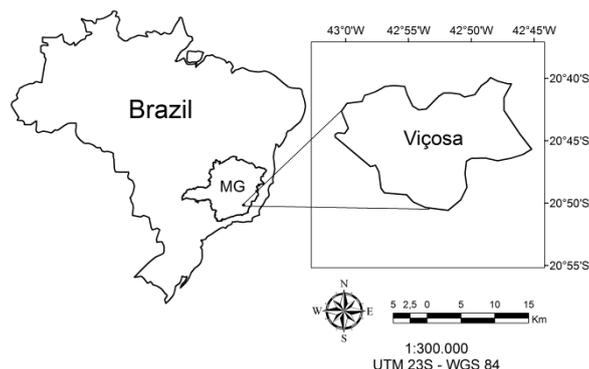


Fig.1 Location of the studied area, southeastern Brazil.

The agrosilvopastoral systems were established using agricultural crops (maize and beans) in the first year followed by brachiaria grass and beef-cattle grazing from the second year of eucalypt plantations establishment. The silvopastoral systems were conducted using brachiaria grass and beef-cattle grazing was introduced into the systems in the second year, when eucalypt plantations were established. No till planting was applied to all systems.

Three different systems were established in the first small farm (Table 1):

- System 1: Maize (*Zea mays*) + pasture (*Brachiaria decumbens*) + eucalypt clone (*Eucalyptus saligna*)
- System 2: Bean (*Phaseolus vulgaris*) + pasture (*Brachiaria decumbens*) + eucalypt clone (*Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*)
- System 3: Pasture (*Brachiaria decumbens*) + eucalypt clone (*Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*)

Only one system (system 4) was established in the second small farm (Table 1):

- System 4: Pasture (*Brachiaria decumbens*) + eucalypt clone (*Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*)

Table 1: Study areas summarize

System	Crop	Pasture	Planting	Area (ha)	Tree arrangements (m)
1	Maize	Brachiaria	Dec/2007	0.93	8 x 3
2	Beans	Brachiaria	Dec/2009	0.72	8 x 3
3	-	Brachiaria	Dec/2009	0.55	9 x 1
4	-	Brachiaria	Nov/2009	3.48	12 x 3

2.2.GHG inventory

2.2.1.System boundaries

GHG emissions were calculated regarding production, storage and transportation of agrochemicals (pre-farm) and farm activities such as fertilization and machinery operation (on-farm) (Fig. 2):

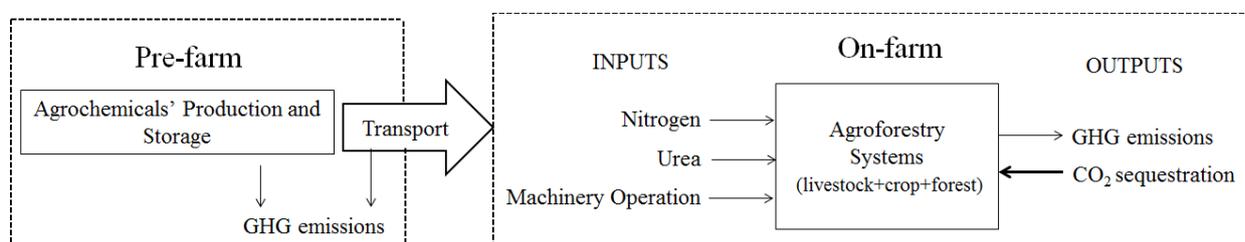


Fig.2 GHG inventory for agroforestry systems, for pre-farm and on-farm stages.

2.2.2.Input data

Required input data was collected through personal interviews with farmers. The information used included fuel usage for machine operations, agrochemicals application, and estimated crop yield. The livestock production system used in the farms was beef cattle with one animal unit per hectare.

System 1: Maize (*Zea mays*) + pasture (*Brachiaria decumbens*) + eucalypt clone (*Eucalyptus saligna*)

Soil tests were conducted in each research plot to determine the amount of fertilizer required. We used semi-mechanical hole-digging and 0.2 kg NPK (06-30-06) pit⁻¹ for no-till eucalypt planting. Additional fertilization consisting of 0.16 kg NPK (20-05-20) pit⁻¹ was conducted three months after planting (Table 2).

In the case of maize, animal traction was used and was applied 500 kg NPK (08-24-12) ha⁻¹ and 500 kg NPK (30-00-10) ha⁻¹ in broadcast, 30 days after planting. For pasture was applied 100 kg urea ha⁻¹ year⁻¹. Herbicide was applied to control weeds and ant control conducted before and after eucalypt planting.

Table 2. Activities related to System 1 management

Agrochemicals	Amount applied (kg ha ⁻¹)		
	2007	2008	2009 to 2012
Nitrogen	195.0	13.3	
Phosphorus	165.0	3.3	
Potassium	135.0	13.3	
Urea		100.0	100.0
Herbicide ^a	3.5	0.2	
Insecticide ^a	0.02		
Machine Operation	Fuel (l ha ⁻¹)		
	2007	2008	2009 to 2012
Eucalypt planting	7.5		

^aActive ingredient

System 2: Bean (*Phaseolus vulgaris*) + pasture (*Brachiaria decumbens*) + eucalypt clone (*Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*)

Eucalypt was implemented using the same methodology of System 1. For the bean crop, we applied 250 kg of NPK (08-28-16) ha⁻¹ and 200 kg urea ha⁻¹ in broadcast. In the case of pasture we applied 100 kg urea ha⁻¹ year⁻¹. Herbicide was used to control weeds before, during and after eucalypt planting (Table 3).

Table 3. Activities related to System 2 management

Agrochemicals	Amount applied (kg ha ⁻¹)			
	2009	2010	2011	2012
Nitrogen	25.0	13.3		
Phosphorus	95.0	3.3		
Potassium	45.0	13.3		
Urea	200.0	100.0	100.0	100.0
Herbicide ^a	3.5	0.2		
Insecticide ^a	0.02			
Machine Operation	Fuel (l ha ⁻¹)			
	2009	2010	2011	2012
Eucalypt planting	7.5			

^aActive ingredient

System 3: Pasture (*Brachiaria decumbens*) + eucalypt clone (*Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*)

Establishment of eucalypt and pasture followed the same procedure used in Systems 1 and 2 (Table 4).

Table 4. Activities related to System 3 management

Agrochemicals	Amount applied (kg ha ⁻¹)			
	2009	2010	2011	2012
Nitrogen	13.3	35.6		
Phosphorus	66.7	8.9		
Potassium	13.3	35.6		
Urea		100.0	100.0	100.0
Herbicide ^a	2.0	0.2		
Insecticide ^a	0.02			
Machine Operation	Fuel (l ha ⁻¹)			
	2009	2010	2011	2012
Eucalypt planting	20.0			

^aActive ingredient

System 4: Pasture (*Brachiaria decumbens*) + eucalypt clone (*Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis*)

Semi mechanical hole-digging was used to plant eucalypt and 0.2 kg NPK (06-30-06) pit⁻¹ applied. Four broadcast fertilizations were conducted after planting: 0.05 kg NPK (20-05-20) plant⁻¹ 60 days after planting 0.1 kg NPK (20-05-20) plant⁻¹ 120 days after planting, 0.15 kg NPK (20-05-20) plant⁻¹ 10 months after planting, and 0.1 kg KCl plant⁻¹ 1 ½ years after planting (Table 5).

In the case of pasture it was applied 100 kg NPK (20-05-20) ha⁻¹ in 2011. Herbicide was used for weed control and ant control performed before, during and after eucalypt planting.

Table 5. Activities related to System 4 management

Agrochemicals	Amount applied (kg ha ⁻¹)		
	2009	2010	2011
Nitrogen	3.3	16.6	20.0
Phosphorus	16.6	4.2	5.0
Potassium	3.3	16.7	33.8
Herbicide ^a	2.2	2.9	
Insecticide ^a	0.03	0.05	
Machine Operation	Fuel (l ha ⁻¹)		
	2009	2010	2011
Eucalypt planting	5.0		

^aActive ingredient

2.2.3. Footprint Calculations

Pre Farm

The Pre Farm emissions were calculated for the production, transportation, and storage of agrochemicals using emission factors reported by (LAL, 2004) (Table 6).

Table 6. Carbon emissions for the production, transportation, storage and transfer of agrochemicals. Values according to (LAL, 2004)

Agrochemicals	Carbon emission* (kg C kg substance ⁻¹)
Nitrogen fertilizer	1.3±0.3
Phosphorus fertilizer	0.2±0.06
Potassium fertilizer	0.15±0.06
Urea	0.16±0.11
Herbicide	6.3±2.7
Insecticide	5.1±3.0
Fungicide	3.9±2.2

*Mean ± S.D

On Farm

Calculations of GHG emissions were based on methodologies described in the Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006). GHG sources included nitrogen fertilization, machinery, enteric fermentation, and manure management.

Fertilizer

There are two pathways for synthetic fertilizer input emissions: direct and indirect. In this study, direct emissions occurred from the application of mineral fertilizers. Indirect emissions resulted from volatilization and subsequent atmospheric deposition of NH₃ and NO_x, in addition to nitrogen leaching and runoff of fertilizer applied (BOUWMAN et al., 2002; MOSIER et al., 1998).

Direct emissions were calculated as the product of the amount of N applied, the emission factor, which was assumed to be of 0.01 (IPCC, 2006), the factor 44/28 to convert from N₂ to N₂O, and N₂O global warming potential defined as 298 units of CO₂e (IPCC, 2007).

Indirect emissions were computed using variables cited above and also the fraction of N lost due to volatilization, leaching or runoff (JONES et al., 2012). The emission factor for

volatilization was 0.01 while for leaching/runoff was 0.0075. The fraction of N lost due to volatilization was assumed to be of 0.1 and for leaching/runoff 0.2 (IPCC, 2006).

$$Em_{DiF} = F_{SN} \cdot EF_1 \cdot \frac{44}{28} \cdot GWP$$

Where: Em_{DiF} = direct CO₂e emissions from N inputs to managed soils, kg CO₂ ha⁻¹;

F_{SN} = annual amount of synthetic fertilizer N applied to soils, kg N ha⁻¹;

EF_1 = emission factor developed for N₂O emissions from synthetic fertilizer; and

GWP = Global Warming Potential to N₂O.

Indirect Emission

Volatilization

$$Em_{InV} = F_{SN} \cdot Frac_{GASF} \cdot EF_2 \cdot \frac{44}{28} \cdot GWP$$

Where: Em_{InV} = amount of CO₂e produced from atmospheric deposition of N volatilized from managed soils, kg CO₂ ha⁻¹

F_{SN} = amount of synthetic fertilizer N applied to soils, kg N ha⁻¹;

EF_2 = emission factor for N₂O emissions from atmospheric deposition of N on soils and water surfaces;

$Frac_{GASF}$ = fraction of synthetic fertilizer N that volatilizes as NH₃ and, kg N volatilized (kg of N applied)⁻¹; and

GWP = N₂O Global Warming Potential .

Leaching/Runoff

$$Em_{InL} = F_{SN} \cdot Frac_{LEACH-(H)} \cdot EF_3 \cdot \frac{44}{28} \cdot GWP$$

Where: Em_{InL} = amount of CO₂e produced from leaching and runoff of N additions to managed soils, kg CO₂ ha⁻¹;

F_{SN} = amount of synthetic fertilizer N applied to soils, kg N ha⁻¹;

EF_3 = emission factor for N₂O emissions from N leaching and runoff, kg N₂O–N (kg N leached and runoff)⁻¹;

$Frac_{LEACH-(H)}$ = fraction of all N added to/mineralized in managed soils in regions where leaching/runoff occurs that is lost through leaching and runoff, kg N (kg of N additions)⁻¹; and

GWP = Global Warming Potential to N₂O.

Urea

NO₂ emissions were calculated with the same equations as the emissions from nitrogen fertilizer. CO₂ emissions from urea were done through the product of amount of urea applied to soils, of the emission factor for applied urea, which was assumed to be 0.20 (IPCC, 2006).

$$Em_L = M \cdot EF_4$$

Where: Em_L= amount of CO₂e produced from urea application, t CO₂ ha⁻¹;

M = amount of urea applied to soils, t N ha⁻¹; and

EF₄ = emission factor for applied urea, t of C (ton of urea)⁻¹

Machinery

CO₂ emissions of agricultural machinery are generated through the use of fuel during to eucalypt planting. Emissions from fuel usage was calculated using the amount of fuel consumed and the emission factor, that was 2.327 kg CO₂⁻¹ (IPCC, 2006).

$$Em_D = F \cdot EF_5$$

Where: Em_D= amount of CO₂e produced from fuel consumed, kg CO₂ ha⁻¹;

F = fuel consumed, l ha⁻¹; and

EF₅ = emission factor, kg CO₂ l⁻¹.

Livestock

Enteric Fermentation

Enteric fermentation is main source of CH₄ in Brazil (MCTI, 2010). This emission is a result of the complex microbiological fermentation occurring inside the rumen of animals, where carbohydrates are broken down into smaller molecules to ease absorption by the animal's organism, generating methane expelled mainly via eructation (LASSEY, 2007; MOSS et al., 2000; VERGÉ et al., 2007). ESTEVES et al. (2010) obtained an emission of 39 kg CH₄.ano⁻¹ head⁻¹, in well-managed pastures. Thus, we adopted this value for calculation of CH₄ emissions animals.

$$Em_{EF} = N \cdot EF_6 \cdot GWP$$

Where: Em_L= emissions from enteric fermentation, kg CO₂ ha⁻¹;

N = number of animals, head ha⁻¹;

EF_6 = emission factor for enteric fermentation (kg CH_4) head^{-1} ; and

GWP = CH_4 Global Warming Potential.

Manure Management

Manure in grazing systems is deposited directly in the pasture. This type of management produces small amounts of CH_4 , however, N_2O emissions can be higher (SAGGAR et al., 2004). Thus, N_2O emissions due to manure deposition was calculated with the same equations as the emissions from nitrogen fertilizer.

2.3. Aboveground biomass quantification

2.3.1. Trees

Field data from the different systems was collected between July and August of 2012 (by Forest Census - inventory 100%). All trees had their Diameter at Breast Height (DBH), total height, and commercial height (the stem height up to a diameter of 3 cm) measured. DBH were grouped in classes and three samples per class were selected and felled to determine total volume outside bark and amount of biomass and carbon in the stem, branches and leaves (SOARES et al., 2011).

The selected sample trees were cut at ground level and the stem diameters outside bark recorded at 0.3 m, 0.7 m, 1.3 m heights and thereafter in 2 m intervals, up to the 3 cm diameter limit. The volume of each stem section was calculated using the Smalian's formula (LOETSCH; HALLER, 1973). For aboveground biomass, the stems of each sample tree were weighted stem discs, approximately 2.5 cm thick, collected in 0, 25, 50, 75, and 100% of commercial height. An additional disc was cut at breast height (1.3m). All the leaves and branches of each sample tree were manually collected and the fresh weight recorded. A sample of the fresh leaves and branches of each sample tree were weighed in the field.

These samples were stored in bags and sent to the laboratory to determine dry weight/fresh weight ratio, according to VITAL (1984). The leaf samples were dried at $65 \pm 2^\circ\text{C}$ until the dry weight stabilized. And the branches and stem discs were dried at $103 \pm 2^\circ\text{C}$ until the dry weight stabilized. Samples carbon content (stems, leaves and branches) were determined with a LECO TruSpec Micro CHN analyzer (LECO Corp., St. Joseph, MI)

Field data was used to fit allometric equations based on (SCHUMACHER; HALL, 1933) and (SPURR, 1952) for each system to estimate volume, tree aboveground biomass, and the total amount of carbon (stem + branches + leaves).

$$Y_1 = \beta_{01} \cdot DBH^{\beta_{11}} \cdot H^{\beta_{21}} \cdot \varepsilon_1$$

$$Y_2 = \beta_{02} \cdot (DBH^2 \cdot H)^{\beta_{12}} \cdot \varepsilon_2$$

Where: Y_j refers to the total amount of carbon or biomass (kg) or volume (m^3) of the j th model; H refers to the total height (m); β_{0i} , β_{1i} and β_{2i} refer to parameters of the j th model and ε_i refers to random errors and DBH was defined above.

All statistical analyses were conducted using the R software package (R CORE TEAM, 2013). The follow criteria were used to select the best equations: a) parameters significance (p-value < 0.05) by Wald test; b) coherence of the sign (+/-) associated with a specific parameter; c) goodness-of-fit statistics:

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n-p-1}{n-p} \times (1 - R^2); \quad R^2 = 1 - \frac{\sum(y - \hat{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2}$$

$$BIAS \% = \frac{100}{\bar{y}} \times \frac{\sum(y - \hat{y})}{n}; \quad RMSE\% = \frac{100}{\bar{y}} \times \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{y})^2}{n}}$$

Where: R^2 is the empirical coefficient of determination or model efficiency; R_{adj}^2 is an empirical adjusted coefficient of determination; $BIAS\%$ is a relative bias; $RMSE\%$ is the percentage root square error; n is the number of observation, p is the number of explanatory variables; \bar{y} is the mean of dependent variable (volume, biomass and carbon); y_i is the i -th observed value and \hat{y} is the i -th value of the dependent variable.

2.3.2. Pasture

Pasture samples were collected three times between June 2012 and October 2013, within ten randomly selected $1 m^2$ quadrats located between tree rows. The fresh weight of all material was determined and ten samples of about 25 g oven dried in order to determine the fresh-to-dry weight ratio. Samples were dried at $\sim 65^\circ C$ in an oven until the stabilization of weight. The estimate of pasture biomass per area was calculated as mean of the ten measurements per area. This process was repeated for each season.

3. Results

System 1

In system 1, equation m_1 was the best equation to predict the individual tree volume, since it had all variables significant (p-value =0.05), R_{adj}^2 was higher and $RMSE$ (%) and \bar{E} (%) were lower. For the aboveground biomass and carbon stock, the equation chosen was m_2 .

Although both m_1 and m_2 equations had similar R_{adj}^2 , RMSE (%) and \bar{E} (%), equation m_2 had all the variables significant (p-value =0.05) (Table 7).

Table 7: Estimated regression coefficients and adjusted standard errors (\pm SE), adjusted coefficient of determination (R_{adj}^2), model bias (\bar{E}) and root mean square error (\pm RMSE) of equations used in system 1

	Model	Parameter	Estimate	SE	R_{adj}^2 (%)	\bar{E} (%)	RMSE (%)
Volume	m_1	b_{01}	$8.41 \cdot 10^{-5}$	$2.96 \cdot 10^{-5}$	99.244	-0.140	3.827
		b_{11}	1.7020	0.1265			
		b_{21}	1.1380	0.1625			
	m_2	b_{02}	$1.05 \cdot 10^{-4}$	$3.31 \cdot 10^{-5}$	99.093	-0.176	4.191
		b_{12}	0.9256	0.0332			
Aboveground biomass total	m_1	b_{01}	0.0204	0.0371	85.409	-0.549	19.588
		b_{11}	1.9908	0.6453			
		b_{21}	1.0264	0.8239			
	m_2	b_{02}	0.0208	0.0313	85.407	-0.551	19.589
		b_{12}	1.0035	0.1581			
Carbon total	m_1	b_{01}	0.0108	0.0197	85.439	-0.541	19.550
		b_{11}	1.9977	0.6440			
		b_{21}	1.0153	0.8218			
	m_2	b_{02}	0.0110	0.0165	85.439	-0.542	19.550
		b_{12}	1.0031	0.1578			

In system 1, stem contributed the most to tree aboveground biomass (90%), followed by leaves (6%), and branches (4%). Regarding carbon content, leaves ranked higher in average carbon content (57.0%), followed by stem (52.4%), and branches (52.1%).

Carbon stock in the aboveground tree biomass in system 1 was estimated to be of 54.58 t C ha⁻¹. The center class that most contributed to the carbon stock was 21.25 cm with tree density of 193 trees and aboveground carbon stock of 24.93 t C ha⁻¹. The carbon stock in the aboveground grass biomass was estimated to be 3.28 t C ha⁻¹, which corresponds to 6% of total carbon stock in system 1 (Table 8).

Estimated GHG emissions for system 1 was 6.85 t CO₂e ha⁻¹; of which 0.37 t CO₂e ha⁻¹ occurred during the pre-farm stage and 6.48 t CO₂e ha⁻¹ in the on farm. Nitrogen production and transportation were responsible for more than 70% of the emissions in pre-farm stage.

Table 8: Volume, biomass, aboveground carbon stock and CO₂e on the stand level for system 1.

Diameter size class (cm)	Center class (cm)	Tree density (tree ha ⁻¹)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	Biomass (t ha ⁻¹)	Carbon stock (t ha ⁻¹)	CO ₂ e (t ha ⁻¹)
5.00 – 7.49	6.25	1	0.02	0.01	4.18 · 10 ⁻³	0.02
7.50 – 9.99	8.75	2	0.21	0.07	0.04	0.14
10.00 - 12.49	11.25	4	0.46	0.17	0.09	0.32
12.50 - 14.99	13.75	11	1.94	0.74	0.39	1.43
15.00 – 17.49	16.25	16	4.49	1.76	0.92	3.39
17.50 – 19.99	18.75	62	25.88	10.40	5.46	20.03
20.00 – 22.49	21.25	193	115.97	47.50	24.93	91.41
22.50 – 24.99	23.75	123	93.82	39.12	20.53	75.28
25.00 – 27.49	26.25	12	9.81	4.21	2.21	8.11
Total		424	252.61	103.98	54.58	200.14
Aboveground grass				6.57	3.28	12.04
Total system				110.55	57.86	212.18

For the on-farm stage, nitrogen application was the main source of GHG emission in the first year due to maize fertilization. From the third year on, livestock was the main source of emissions, mainly from enteric fermentation (Fig. 3). For this system 17 trees ha⁻¹ were required to neutralize all GHG emissions, number equivalent to 4% of total trees present in the system (Table 15).

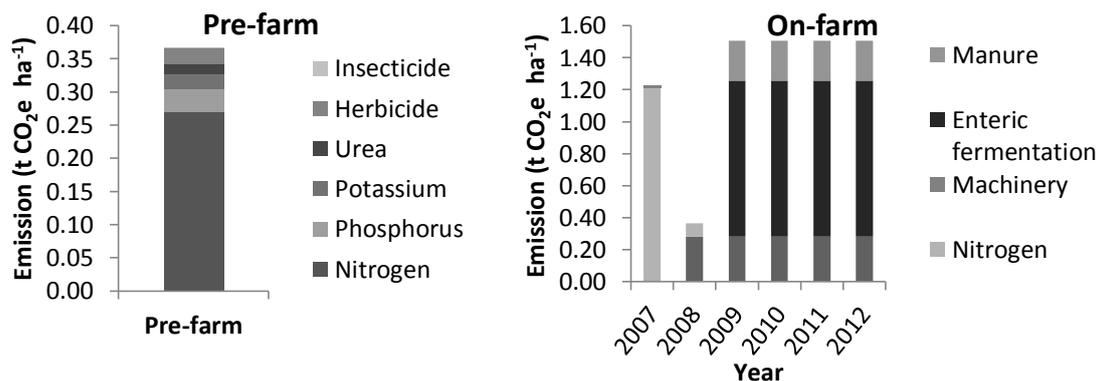


Fig. 3 Greenhouse gas emissions (t CO₂e ha⁻¹) in pre-farm and on-farm stage in system 1

System 2

In system 2, m_1 was the best equation to predict the individual tree volume. In this equation, all variables were significant (p-value = 0.05), R_{adj}^2 was higher, and RMSE (%) and \bar{E} (%) lower than for m_2 . For the aboveground biomass and carbon stock, the equation m_1 was rejected due to inconsistent results for parameter b_{21} , with negatives values (Table 9).

Table 9: Estimated regression coefficients and adjusted standard errors (\pm SE), adjusted coefficient of determination (R_{adj}^2), model bias (\bar{E}) and root mean square error (\pm RMSE) of equations used in system 2

	Model	Parameter	Estimate	SE	R_{adj}^2 (%)	\bar{E} (%)	RMSE (%)
Volume	m ₁	b ₀₁	$1.05 \cdot 10^{-4}$	$4.11 \cdot 10^{-5}$	98.982	-0.151	5.443
		b ₁₁	1.2940	0.3263			
		b ₂₁	1.4480	0.3988			
	m ₂	b ₀₂	$1.48 \cdot 10^{-4}$	$4.73 \cdot 10^{-5}$	98.751	-0.249	6.030
		b ₁₂	0.8769	0.0381			
Aboveground biomass total	m ₁	b ₀₁	0.1563	0.1784	90.699	-0.221	16.911
		b ₁₁	3.0839	1.0899			
		b ₂₁	-0.7883	1.2929			
	m ₂	b ₀₂	0.0601	0.0586	88.996	0.04	18.39
		b ₁₂	0.8691	0.1163			
Carbon total	m ₁	b ₀₁	0.0842	0.0960	90.663	-0.226	16.906
		b ₁₁	3.0889	1.0900			
		b ₂₁	-0.8036	1.2927			
	m ₂	b ₀₂	0.0322	0.0314	88.930	0.039	18.409
		b ₁₂	0.8663	0.1162			

In system 2, the proportion of stem, branches and leaves to total above-ground biomass was estimated at 70%, 18%, and 12%, respectively. Leaves were the compartment that had the highest carbon content (55.2%), followed by stem (52.1%), and branches (51.3%).

The carbon stock in the aboveground tree biomass of system 2 was estimated to be 11.42 t C ha⁻¹. The center class 13.75 cm was the one that most contributed to carbon storage. It had a tree density of 119 trees and aboveground carbon stock of 4.09 t C ha⁻¹. The carbon stock in the aboveground grass biomass was estimated to be 3.60 t C ha⁻¹, which corresponds to 24% of total carbon storage in system 2 (Table 10).

Estimated GHG emissions for system 2 was 3.69 t CO₂e ha⁻¹; of which 0.15 t CO₂e ha⁻¹ occurred during the pre-farm stage and 3.54 t CO₂e ha⁻¹ in the on farm. Urea and nitrogen production and transportation were responsible, together, for more than 65% of the emissions during the pre-farm stage.

Table 10: Volume, biomass, aboveground carbon stock and CO₂e on the stand level for system 2

Diameter size class (cm)	Center class (cm)	Tree density (tree ha ⁻¹)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	Biomass (t ha ⁻¹)	Carbon stock (t ha ⁻¹)	CO ₂ e (t ha ⁻¹)
2.50 – 4.99	3.75	3	0.04	0.01	0.01	0.03
5.00 – 7.49	6.25	8	0.23	0.08	0.04	0.16
7.50 – 9.99	8.75	18	1.01	0.39	0.20	0.75
10.00 - 12.49	11.25	153	14.51	5.66	2.97	10.89
12.50 - 14.99	13.75	119	21.27	7.82	4.09	15.01
15.00 – 17.49	16.25	83	19.90	7.33	3.83	14.06
17.50 – 19.99	18.75	4	1.32	0.50	0.26	0.96
Total		388	58.27	21.79	11.42	41.86
Aboveground grass				7.27	3.64	13.34
Total system				29.06	15.06	55.20

In the case of on farm emissions, the largest emissions occurred during the third year on. Livestock was the main source of emissions, mainly due to enteric fermentation (Fig.4). For this system 39 trees ha⁻¹ were required to neutralize all GHG emissions, number equivalent to 10.2% of the total trees present in the system (Table 15)

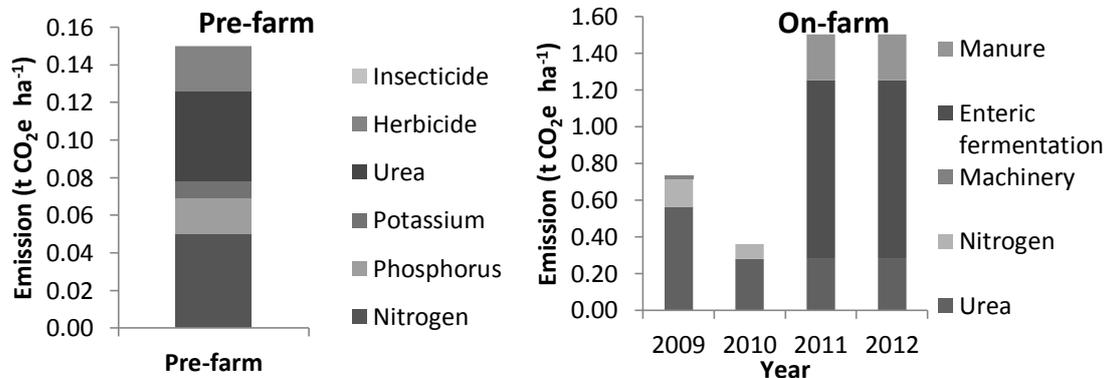


Fig. 4 Greenhouse gas emissions (t CO₂e ha⁻¹) in pre-farm and on-farm stage in system 2

System 3

In the case of system 3, equation m_1 was the best equation to predict individual tree volume, since all variables were significant (p -value =0.05), R_{adj}^2 was higher, and both RMSE (%) and \bar{E} (%) lower when compared to equation m_2 . For the aboveground biomass and carbon stock, the equation chosen was m_1 because it had the highest R_{adj}^2 and the smallest RMSE (%) and \bar{E} (%) (Table 11).

In system 3, stem was the compartment that contributed the most to tree aboveground biomass (76%), followed by branches (14%), and leaves (10%). Regarding carbon content, leaves was the compartment with the higher average carbon content (56.0%), followed by stem (52.2%) and branches (50.5%).

Table 11: Estimated regression coefficients and adjusted standard errors (\pm SE), adjusted coefficient of determination (R_{adj}^2), model bias (\bar{E}) and root mean square error (\pm RMSE) of equations used in system 3

	Model	Parameter	Estimate	SE	R_{adj}^2 (%)	\bar{E} (%)	RMSE (%)			
Volume	m ₁	b ₀₁	$1.94 \cdot 10^{-4}$	$7.20 \cdot 10^{-5}$	99.329	-0.066	4.899			
		b ₁₁	1.9150	0.1463						
		b ₂₁	0.6404	0.2258						
	m ₂	b ₀₂	$1.41 \cdot 10^{-4}$	$3.30 \cdot 10^{-5}$				99.265	0.038	5.130
		b ₁₂	0.8846	0.0283						
Aboveground biomass total	m ₁	b ₀₁	0.0737	0.1087	90.182	-0.922	19.953			
		b ₁₁	1.8942	0.5883						
		b ₂₁	0.6112	0.9028						
	m ₂	b ₀₂	0.0534	0.0480				90.112	-0.857	20.023
		b ₁₂	0.8678	0.1086						
Carbon total	m ₁	b ₀₁	0.0382	0.0564	90.193	-0.920	19.920			
		b ₁₁	1.8823	0.5867						
		b ₂₁	0.6251	0.9013						
	m ₂	b ₀₂	0.0282	0.0253				90.131	-0.859	19.982
		b ₁₂	0.8666	0.1083						

The carbon stock in the aboveground tree biomass of system 3 was estimated to be 25.73 t C ha⁻¹. The center class that most contributed was 13.75 cm with tree density of 477 trees and aboveground carbon stock of 15.08 t C ha⁻¹. The carbon stock in the aboveground grass biomass was estimated to be 3.77 t C ha⁻¹, which corresponds to 13% of total (Table 12).

Table 12: Volume, biomass, aboveground carbon stock and CO₂e on the stand level for system 3

Diameter size class (cm)	Center class (cm)	Tree density (tree ha ⁻¹)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	Biomass (t ha ⁻¹)	Carbon stock (t ha ⁻¹)	CO ₂ e (t ha ⁻¹)
2.50 – 4.99	3.75	7	0.11	0.04	0.02	0.07
5.00 – 7.49	6.25	117	3.37	1.15	0.60	2.21
7.50 – 9.99	8.75	75	5.01	1.69	0.88	3.24
10.00 - 12.49	11.25	268	31.78	10.59	5.55	20.33
12.50 - 14.99	13.75	477	87.11	28.79	15.08	55.30
15.00 – 17.49	16.25	87	20.85	6.87	3.59	13.18
Total trees		1031	148.23	49.12	25.73	94.33
Aboveground grass				7.54	3.77	13.83
Total System				56.66	29.50	108.16

Estimated GHG emissions for system 3 was 3.69 t CO₂e ha⁻¹, of which 0.15 t CO₂e ha⁻¹ occurred during the pre-farm stage and 3.54 t CO₂e ha⁻¹ in the on farm stage. Nitrogen

production and transportation were responsible for more than 50% of the emissions in pre-farm stage. For on farm stage in the first year, machinery was the main source of GHG emissions mostly related to eucalypt planting. From the third year on, livestock was the main source of emissions mainly due to enteric fermentation (Fig. 5). For this system 35 trees ha⁻¹ were required to neutralize all GHG emissions, number equivalent to 3.4% of the total trees present in the system (Table 15).

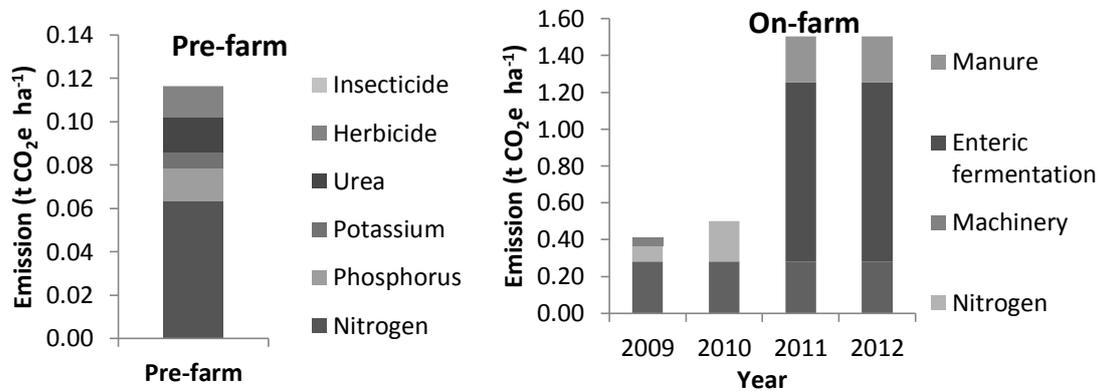


Fig. 5 Greenhouse gases emissions (t CO₂e ha⁻¹) in pre-farm and on-farm stage in system 3

System 4

In system 4, the best equation to predict the individual tree volume, aboveground biomass and carbon stock was equation m₁. This equation had the highest R_{adj}^2 , and the smallest RMSE (%) and \bar{E} (%) when compared to equation m₂ (Table 13).

Table 13: Estimated regression coefficients and adjusted standard errors (\pm SE), adjusted coefficient of determination (R_{adj}^2), model bias (\bar{E}) and root mean square error (\pm RMSE) of equations used in system 4

	Model	Parameter	Estimate	SE	R_{adj}^2 (%)	\bar{E} (%)	RMSE (%)
Volume	m ₁	b ₀₁	2.41·10 ⁻⁴	1.11·10 ⁻⁴	97.973	-0.665	10.865
		b ₁₁	2.2707	0.4191			
		b ₂₁	0.1635	0.5310			
	V ₂	b ₀₂	1.63·10 ⁻⁴	6.13·10 ⁻⁵	97.723	-0.392	11.513
		b ₁₂	0.8656	0.0401			
Aboveground biomass total	m ₁	b ₀₁	0.0895	0.0659	94.741	-0.769	16.781
		b ₁₁	1.4018	0.6370			
		b ₂₁	1.0429	0.8270			
	B ₂	b ₀₂	0.1027	0.0543	94.706	-0.857	16.836
		b ₁₂	0.7960	0.0621			
Carbon total	m ₁	b ₀₁	0.0475	0.0344	94.868	-0.736	16.536
		b ₁₁	1.3937	0.6278			
		b ₂₁	1.0498	0.8151			
	m ₂	b ₀₂	0.0547	0.0285	94.831	-0.827	16.596
		b ₁₂	0.7950	0.0612			

In system 4, the proportion of stem, branches and leaves to total above-ground biomass was 70%, 15%, and 15%, respectively. Leaves were the compartment that had the most carbon content (56%), followed by stem (52.3%), and branches (52.3%).

Carbon stock in the aboveground tree biomass of system 4 was estimated to be 5.94 t C ha⁻¹. The center class 13.75 cm was the one that most contributed to carbon stock. It had a tree density of 84 trees and aboveground carbon stock of 2.19 t C ha⁻¹. The carbon stock in the aboveground grass biomass was estimated to be 3.32 t C ha⁻¹, which corresponds to 49% of total aboveground carbon stock (Table 14). This proportion was higher than in any other systems evaluated in this paper. This happened due lower density of trees and age of planting.

Table 14: Volume, biomass, aboveground carbon stock and CO₂e on the stand level for system 4

Diameter size class (cm)	Center class (cm)	Tree density (tree ha⁻¹)	Volume (m³ ha⁻¹)	Biomass (t ha⁻¹)	Carbon stock (t ha⁻¹)	CO₂e (t ha⁻¹)
0.00 – 2.49	1.25	1	8.44·10 ⁻⁴	9.01 10 ⁻⁴	4.83 10 ⁻⁴	1.77 10 ⁻³
2.50 – 4.99	3.75	2	1.42·10 ⁻²	7.20 10 ⁻³	3.82 10 ⁻³	1.40 10 ⁻²
5.00 – 7.49	6.25	11	0.26	0.10	0.05	0.19
7.50 – 9.99	8.75	37	1.85	0.67	0.35	1.29
10.00 - 12.49	11.25	86	7.70	2.85	1.50	5.52
12.50 - 14.99	13.75	84	11.61	4.14	2.19	8.03
15.00 – 17.49	16.25	42	8.57	3.04	1.61	5.89
17.50 – 19.99	18.75	4	1.27	0.44	0.23	0.86
Total		267	31.27	11.24	5.94	21.78
Aboveground grass				6.70	3.32	8.55
Total system				17.94	9.26	30.33

Estimated GHG emissions for system 4 was 2.81 t CO₂e ha⁻¹; of which 0.10 t CO₂e ha⁻¹ occurred during the pre-farm stage and 2.71 t CO₂e ha⁻¹ in the on farm. Nitrogen production and transportation were responsible, together, for more than 50% of the emissions in pre-farm stage. For on farm stage, the biggest emission happened from the third year on. The livestock was the main source of emissions, mainly from enteric fermentation (Fig. 6). For this system 35 trees ha⁻¹ were required to neutralize all GHG emissions, number equivalent to 13.1% of the total tree present in the system (Table 15)

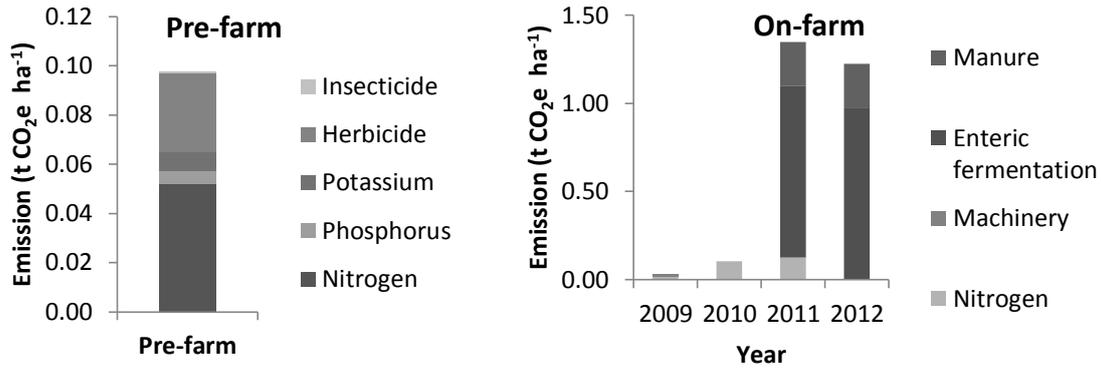


Fig. 6 Greenhouse gases emissions ($t\ CO_2e\ ha^{-1}$) in pre-farm and on-farm stage in system 4

Table 15: Carbon balance in the systems

System	Emission ($t\ CO_2e\ ha^{-1}$)			Carbon Stock ($t\ CO_2e\ ha^{-1}$)	Balance ($t\ CO_2e\ ha^{-1}$)	Trees to offset	Total trees	Surplus trees
	On-farm	Pre-farm	Total					
1	7.61	0.37	7.98	200.14	192.16	17	424	407
2	4.10	0.15	4.25	41.86	37.61	39	388	349
3	3.92	0.12	4.04	94.33	90.29	44	1031	987
4	2.71	0.10	2.81	21.78	18.97	35	267	232

4. Discussion

All systems evaluated had aboveground carbon stock lower than silvopastoral and agrosilvopastoral systems previously reported in Brazil (Table 16). However, the mean annual aboveground carbon increment (MAI-AGB) we observed in systems 1 e 3 was higher than other systems presented in Table 16. Results for system 2 were similar to other systems listed while system 4 had lower MAI-AGB. The amount of C sequestered by agroforestry systems depends on tree species, age, geographic location, environmental factors, and system management (ALBRECHT; KANDJI, 2003; JOSE, 2009). Beyond carbon sequestration, agroforestry systems bring other environmental benefits, such as increase of soil fertility, erosion reduction, and water quality improvement (BLANCO-CANQUI; LAL, 2010; OLIVEIRA NETO et al., 2010; PAULA et al., 2013; SILVA et al., 2011).

Estimated aboveground grass carbon ranged from 3.28 to 4.05 $kg\ C\ ha^{-1}$ which is similar to the 3.71 $kg\ C\ ha^{-1}$ estimated for agrosilvopastoral system with eucalypt established in Minas Gerais, Brazil (TSUKAMOTO FILHO et al., 2004) and to the 3.29 $kg\ C\ ha^{-1}$ estimated for silvopastoral system with pines, with tree density of 200 trees ha^{-1} , in São Paulo, Brazil (GUTMANIS, 2004). In Brazil, where most cultivated pastures are degraded, the implementation of agroforestry systems is an alternative to increase pasture production, recovering their chemical, physical, and biological conditions, and also enhancing carbon

sequestration (FREITAS et al., 2013; MACEDO, 2009; NAIR et al., 2011; PAULA et al., 2013; TONUCCI et al., 2011).

Enteric fermentation was the most important source of GHG in all systems. In Brazil, enteric fermentation is the main contributor to CH₄ emissions and the third contributor in CO₂e (CERRI et al., 2009; MCTI, 2010). Agroforestry systems can reduce CH₄ emission from fermentation in the rumen through the improvement of grass quality, which increases digestive efficiency and decreases the maintenance subsidy, producing less CH₄ (CERRI et al., 2010; DERAMUS et al., 2003).

The use of conservation tillage in the systems resulted in low GHG emissions. This happened due to a reduction in the use of machinery, thus, decreasing fuel inputs and CO₂ emissions (STAVI; LAL, 2013). In addition, the use of conservation tillage can increase soil organic carbon, soil nitrogen content and microbial biomass, causing mitigation of GHG emissions (SIX et al., 2004; THOMAS et al., 2007; VARVEL; WILHELM, 2011; WEST; POST, 2002).

Agroforestry systems combined with conservation practices, such as minimum tillage, optimal fertilizer/manuring regimes and cover cropping, can enhance C-sequestration and reduce GHG emissions (KILLHAM, 2011). This combination brings additional environmental benefits such as a reduction of soil erosion (DELGADO; CANTERS, 2012; SOUZA et al., 2012), and increased water-use efficiency (NORWOOD, 2000), and biodiversity (LACLAU et al., 2013).

The number of trees required to offset emissions ranged from 15 to 44 trees ha⁻¹. These numbers of trees are lower than the number of existing trees in the systems, demonstrating the potential of agroforestry systems for C sequestration and GHG reduction, as reported by (MONTAGNINI; NAIR, 2004; NAIR et al., 2011; SCHOENEBERGER, 2009).

Agroforestry systems have an important role in the Low-Carbon Agriculture Program implemented by the Brazilian government and in its strategy to achieve GHG emission reduction targets. They help to decrease pressure on natural forests (MONTAGNINI; NAIR, 2004) and support animal and crop production (NAIR et al., 2011). In addition, Agroforestry systems allow the intensification of agricultural systems while conserving biodiversity (BERCHIELLI et al., 2012; TSCHARNTKE et al., 2012), increasing C sequestration and reducing GHG emissions (KILLHAM, 2011).

Table 16: Aboveground tree carbon and mean annual aboveground carbon increment (MAI-AGB) in different agroforestry systems in Brazil

Location, coordinates	System	Tree density (tree ha ⁻¹)	Age (year)	Aboveground tree carbon (t ha ⁻¹)	MAI-AGB (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Source
Minas Gerais, Brazil; 20° 48' S; 42° 53' W	1	424	4.75	54.58	11.49	This study
Minas Gerais, Brazil; 20° 48' S; 42° 53' W	2	388	2.75	11.42	4.15	This study
Minas Gerais, Brazil; 20° 48' S; 42° 53' W	3	1031	2.75	25.73	9.36	This study
Minas Gerais, Brazil; 20° 48' S; 42° 49' W	4	267	2.75	5.94	2.16	This study
Minas Gerais, Brazil; 21° 33' S; 43° 6' W	Eucalyptus grandis + Acacia mangium + Brachiaria decumbens cv Basilisk	105	10	14.29	1.43	(MÜLLER et al., 2009)
Minas Gerais, Brazil; 17° 13' S; 46° 52' W	Eucalyptus spp + Oriza sativa+ Glycine max + Braquiaria brizantha	250	11	63.55	5.78	(TSUKAMOTO FILHO et al., 2004)
São Paulo, Brazil; 22° 41' S; 47° 18' W	Pinus elliottii + different grasses	200	30	66.01	2.20	(GUTMANIS, 2004)
São Paulo, Brazil; 22° 41' S; 47° 18' W	Pinus elliottii + different grasses	400	30	119.70	3.99	(GUTMANIS, 2004)
Rio Grande do Sul, Brazil; 29° 47' S; 55° 47' W	Eucalyptus grandis + natural grass	1000	21	80.20	3.82	(OLIVEIRA et al., 2008)
Rio Grande do Sul, Brazil; 29° 47' S; 55° 47' W	Eucalyptus grandis + natural grass	500	21	71.50	3.40	(OLIVEIRA et al., 2008)
Rio Grande do Sul, Brazil; 29° 47' S; 55° 47' W	Pinus elliottii + natural grass	1000	21	70.60	3.36	(OLIVEIRA et al., 2008)
Rio Grande do Sul, Brazil; 29° 47' S; 55° 47' W	Pinus elliottii + natural grass	500	21	63.10	3.00	(OLIVEIRA et al., 2008)

5. Conclusions

Agrosilvopastoral systems have higher GHG emissions when compared with silvopastoral systems. On the other hand, these systems that have higher emissions are those that have higher carbon storage capacity.

All systems had more trees than what was necessary to offset GHG emissions. These systems had a positive carbon balance, ranged from 18.97 t CO₂e ha⁻¹ to 192.16 t CO₂e ha⁻¹ and surplus trees ranged from 232 to 987. Therefore, we conclude that agroforestry systems effectively contribute to mitigate GHG emissions.

6. References

- ALBRECHT, A.; KANDJI, S. T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 99, n. 1–3, p. 15–27, 2003.
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; MARTÍNEZ, G. B. Contributions of the Crop-Livestock-Forest Integration Systems (iLPF) for a low Carbon Emission Agriculture. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 6, p. 1163–1175, 2012.
- BERCHIELLI, T. T.; MESSANA, J. D.; CANESIN, R. C. Enteric Methane production in tropical pastures. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 13, n. 4, p. 954–968, 2012.
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Agroforestry. In: BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. (Eds) **Principles of Soil Conservation and Management**. [s.l.] Springer Netherlands, 2010. p. 259–283.
- BOUWMAN, A. F.; BOUMANS, L. J. M.; BATJES, N. H. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, n. 4, p. 6–1–6–13, 2002.
- BRAZIL. **Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura**. Brasília, Brazil: Casa Civil da Presidência da República, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério do Desenvolvimento Agrário, 2011.
- BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: Interscience (Wiley), 1963. 689p.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal**. 4^a. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. 605p.
- CERRI, C. C. et al. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 6, p. 831–843, 2009.
- CERRI, C. C. et al. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 1, p. 102–116, 2010.

CORDEIRO, S. A.; SILVA, M. L. DA. Análise técnica e econômica de Sistemas Agrossilvipastoris. In: OLIVEIRA NETO, S. N. DE et al. (Eds.). **Sistema Agrossilvipastoril: integração lavoura, pecuária e floresta**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 2010. p. 167-189.

DELGADO, M. E. M.; CANTERS, F. Modeling the impacts of agroforestry systems on the spatial patterns of soil erosion risk in three catchments of Claveria, the Philippines. **Agroforestry Systems**, v. 85, n. 3, p. 411–423, 2012.

DERAMUS, H. A. et al. Methane Emissions of Beef Cattle on Forages. **Journal of Environment Quality**, v. 32, n. 1, p. 269, 2003.

DUBE, F. et al. Productivity and carbon storage in silvopastoral systems with *Pinus ponderosa* and *Trifolium* spp., plantations and pasture on an Andisol in Patagonia, Chile. **Agroforestry Systems**, v. 86, n. 2, p. 113–128, 2012.

ESTEVEZ, S. N. et al. **Estimativas da emissão de metano por bovinos criados em sistema de integração lavoura-pecuária em São Carlos, SP**: Circular Técnica. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2010. 7p.

FONTAN, I. C. I. et al. Growth of pruned eucalypt clone in an agroforestry system in southeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 83, n. 2, p. 121–131, 2011.

FRANKE, I. L.; FURTADO, S. C. **Sistemas silvipastoris: fundamentos e aplicabilidade**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2001. 51p

FREITAS, E. C. S. et al. Litter fall and nutrient deposition on soil in an Agrosilvopastoral System with eucalypt and acacia. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 409–417, jun. 2013.

GARCIA, R.; TONUCCI, R. G.; GOBBI, K. F. Sistemas Silvipastoris: uma integração Pasto, Árvore e Animal. In: OLIVEIRA NETO, S. N. DE et al. (Eds.). **Sistema Agrossilvipastoril: integração lavoura, pecuária e floresta**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 2010. p. 190.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 45–61, 2004.

GORGENS, E. B. et al. Tendência de crescimento de povoamento de eucalipto após aplicação de desbaste. **Revista Árvore**, v. 31, n. 5, p. 879–885, 2007.

GUTMANIS, D. **Estoque de carbono e dinâmica ecofisiológica em sistemas silvipastoris**. 2004. 142 f. Tese, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP.

HASELEIN, C. R. et al. Propriedades de flexão estática da madeira úmida e a 12% de umidade de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da adubação. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 2, p. 147–152, 2002.

HILLIER, J. et al. Which cropland greenhouse gas mitigation options give the greatest benefits in different world regions? Climate and soil-specific predictions from integrated empirical models. **Global Change Biology**, v. 18, n. 6, p. 1880–1894, 2012.

IBRAHIM, M. et al. Importance of silvopastoral systems for mitigation of climate change and harnessing of environmental benefits. In: ABBERTON, M.; CONANT, R.; BATELLO, C. (Eds.). **Grassland carbon sequestration: Management, policy and economics. Proceedings of the workshop on the role of grassland carbon sequestration in the mitigation of climate change.** Integrated Crop Management. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010.

IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.** Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. ed. Japan: IGES, 2006.

IPCC. **Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller ed. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. 996p.

JONES, C. D.; FRAISSE, C. W.; OZORES-HAMPTON, M. Quantification of greenhouse gas emissions from open field-grown Florida tomato production. **Agricultural Systems**, v. 113, p. 64–72, 2012.

JOSE, S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. **Agroforestry Systems**, v. 76, n. 1, p. 1–10, 2009.

KILLHAM, K. Integrated soil management – moving towards globally sustainable agriculture. **The Journal of Agricultural Science**, v. 149, n. Supplement S1, p. 29–36, 2011.

LACLAU, J. P. et al. Mixing Eucalyptus and Acacia trees leads to fine root over-yielding and vertical segregation between species. **Oecologia**, v. 172, n. 3, p. 903–913, 2013.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623–1627, 2004.

LASSEY, K. R. Livestock methane emission: From the individual grazing animal through national inventories to the global methane cycle. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, n. 2–4, p. 120–132, 2007.

LEITE, H. G. et al. Evaluation of weibull and hyperbolic fitting functions to data of eucalypt stands submitted to thinning. **Revista Árvore**, v. 34, n. 2, p. 305–311, 2010.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; MOREIRA, A. M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, v. 30, n. 4, p. 603–612, 2006.

LIMA, I. L. DE; FLORSHEIM, S. M. B.; LONGUI, E. L. Influência do espaçamento em algumas propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. **Revista Cerne**, v. 15, n. 2, p. 244–250, 2009.

MACEDO, M. C. M. Crop and livestock integration: the state of the art and the near future. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. SPE, p. 133–146, 2009.

MACEDO, R. L. G.; VALE, A. B. DO; VENTURIM, N. Eucalipto em sistemas silvipastoris e agrossilvipastoris. **Informe Agropecuário**, v. 29, n. 242, p. 71–85, 2008.

MACEDO, R. L. G.; VENTURIM, N.; TSUKAMOTO FILHO, A. DE A. Princípios de agrossilvicultura como subsídio ao manejo sustentável. **Informe Agropecuário**, v. 21, n. 202, p. 99–109, 2000.

MANFREDI, V.; BARICHELO. **Variação do rendimento de celulose sulfato ao longo do tronco do eucalipto**. In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP. São Paulo: ABCP, 1985. p. 5-29.

MCTI. **Segunda Comunicação Inicial do Brasil - Parte II: Inventário de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal**. Brasília, Brazil: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2010. 102p.

MONTAGNINI, F.; NAIR, P. K. R. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 61-62, n. 1-3, p. 281–295, 2004.

MONTE, M. A. et al. Crescimento de um clone de eucalipto submetido a desrama e desbaste. **Revista Árvore**, v. 33, n. 5, p. 777–787, 2009.

MOSIER, A. et al. Closing the global N₂O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 52, n. 2-3, p. 225–248, 1998.

MOSS, A. R.; JOUANY, J.-P.; NEWBOLD, J. Methane production by ruminants: its contribution to global warming. **Annales de Zootechnie**, v. 49, n. 3, p. 231–253, 2000.

MÜLLER, M. D. et al. Estimativa de Acúmulo de Biomassa e Carbono em Sistema Agrossilvipastoril na Zona da Mata Mineira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 60, p. 11–17, 2009.

NAIR, P. K. R. **An Introduction to Agroforestry**. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993. 499p.

NAIR, P. K. R. et al. Silvopasture and Carbon Sequestration with Special Reference to the Brazilian Savanna (Cerrado). In: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. (Eds.). **Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems**. Advances in Agroforestry. [s.l.] Springer Netherlands, 2011. p. 145–162.

NAIR, P. K. R. Climate Change Mitigation: A Low-Hanging Fruit of Agroforestry. In: NAIR, P. K. R.; GARRITY, D. (Eds.). **Agroforestry - The Future of Global Land Use**. Advances in Agroforestry. [s.l.] Springer Netherlands, 2012. p. 31–67.

NOGUEIRA, G. S. et al. Diametric distribution model for thinned Eucalyptus sp. stands. **Revista Árvore**, v. 29, n. 4, p. 579–589, 2005.

NORWOOD, C. A. Water Use and Yield of Limited-Irrigated and Dryland Corn. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 1, p. 365, 2000.

OELBERMANN, M.; PAUL VORONEY, R.; GORDON, A. M. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: a review with examples from Costa Rica and southern Canada. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 104, n. 3, p. 359–377, 2004.

OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431–439, 2010.

OLIVEIRA, E. B. et al. Produção, carbono e rentabilidade econômica de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* em sistemas silvipastoris no sul do Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 57, p. 45–56, 2008.

OLIVEIRA NETO, S. N. DE et al. **Sistema Agrossilvipastoril: Integração Lavoura, Pecuária e Floresta**. 1ª. ed. Viçosa, MG, Brazil: Sociedade de Investigações Florestais,, 2010. 190 p.

OLIVEIRA NETO, S. N. DE; PAIVA, H. N. DE. Implantação e manejo do componente arbóreo em Sistema Agrossilvipastoril. In: S. N. de Oliveira Neto; A. B. do Vale; A. de P. Nacif; M. B. Vilar; J. B. de Assis (Orgs.); **Sistema Agrossilvipastoril: integração lavoura, pecuária e floresta**. 2010. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais. p.15-68.

PAULA, R. R. et al. Eucalypt growth in monoculture and silvopastoral systems with varied tree initial densities and spatial arrangements. **Agroforestry Systems**, , n.6, p.1295-1307, 2013.

PEREIRA, B. L. C. et al. Influence of Chemical Composition of Eucalyptus Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574–4592, 2013.

PEREIRA, M. W. G.; TEIXEIRA, E. C.; LIMA, J. E. DE. Adoção sequencial de tecnologia pós-colheita aplicada à cafeicultura em Viçosa (MG). **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, n. 2, p. 381–404, 2010.

PETERS, M. et al. Tropical Forage-based Systems to Mitigate Greenhouse Gas Emissions. In: HERSHEY, C. H.; PAUL NEATE (Eds.). **Eco-Efficiency: From Vision to Reality**. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2013. p. 171–190.

PRASAD, J. V. N. S. et al. Tree row spacing affected agronomic and economic performance of Eucalyptus-based agroforestry in Andhra Pradesh, Southern India. **Agroforestry Systems**, v. 78, n. 3, p. 253–267, 2010.

PROTÁSIO, T. DE P. et al. Clones comerciais de Eucalyptus de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 113–127, 2014.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2013.

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de Eucalyptus grandis x Eucalyptus camaldulensis para energia**, 2011. 71 p. Dissertação, Viçosa: Universidade Federal de Viçosa.

SAGGAR, S. et al. A review of emissions of methane, ammonia, and nitrous oxide from animal excreta deposition and farm effluent application in grazed pastures. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 4, p. 513–544, 2004.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de Eucalyptus grandis e E. urophylla com enfoque energético**, 2009. 92 p. Dissertação, Lavras: Universidade Federal de Lavras.

SANTOS, R. C. et al. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 221–230, 2011.

SANTOS, L. C. et al. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de Eucalyptus plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, p. 971–980, 2012.

SCHOENEBERGER, M. M. Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands. **Agroforestry Systems**, v. 75, n. 1, p. 27–37, 2009.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v. 47, n. 9, p. 719–734, 1933.

SILVA, G. L. et al. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma**, v. 167–168, p. 61–70, 2011.

SIX, J. et al. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term. **Global Change Biology**, v. 10, n. 2, p. 155–160, 2004.

SMITH, P. et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1492, p. 789–813, 2008.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F. DE; SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. 2. ed. Viçosa, MG, Brazil: Editora UFV, 2011. 272p.

SOARES, T. S. et al. Economic evaluation of eucalyptus stands submitted to thinning. **Revista Árvore**, v. 27, n. 4, p. 481–486, 2003.

SOUZA, A. P. et al. Ajustando os botões: como as plantas lidam com o aumento do CO₂ atmosférico. In: BUCKERIDGE, M. S. (Ed.). **Biologia & Mudanças Climáticas no Brasil**. São Carlos: Rima Editora, 2008. p. 101–113.

SOUZA, H. N. DE et al. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 146, n. 1, p. 179–196, 2012.

SPURR, S. H. **Forestry inventory**. New York: Ronald Press, 1952. 476p.

STAVI, I.; LAL, R. Agroforestry and biochar to offset climate change: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n. 1, p. 81–96, 2013.

THOMAS, G. A.; DALAL, R. C.; STANDLEY, J. No-till effects on organic matter, pH, cation exchange capacity and nutrient distribution in a Luvisol in the semi-arid subtropics. **Soil and Tillage Research**, v. 94, n. 2, p. 295–304, 2007.

TONUCCI, R. G. et al. Soil Carbon Storage in Silvopasture and Related Land-Use Systems in the Brazilian Cerrado. **Journal of Environment Quality**, v. 40, n. 3, p. 833, 2011.

TRUGILHO, P. F. et al. Estimativa de carbono fixado na madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. **Revista Cerne**, v. 16, n. suplemento, p. 33–40, 2010.

TSCHARNTKE, T. et al. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. **Biological Conservation**, v. 151, n. 1, p. 53–59, 2012.

TSUKAMOTO FILHO, A. A. et al. Fixação de carbono em um sistema agrissilvipastoril com eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. **Agrossilvicultura**, v. 1, n. 1, p. 29–41, 2004.

VALE, A. T. et al. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, v. 6, n. 1, p. 83–88, 2000.

VARVEL, G. E.; WILHELM, W. W. No-tillage increases soil profile carbon and nitrogen under long-term rainfed cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v. 114, n. 1, p. 28–36, 2011.

VERGÉ, X. P. C.; DE KIMPE, C.; DESJARDINS, R. L. Agricultural production, greenhouse gas emissions and mitigation potential. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 142, n. 2–4, p. 255–269, 2007.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21p.

WEST, T. O.; POST, W. M. Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 6, p. 1930–1946, 2002.

ZOBEL, B. The changing quality of the world wood supply. **Wood Science and Technology**, v. 18, n. 1, p. 1–17, 1984.

Artigo 4

Balanco de Carbono em dois sistemas agroflorestais em Viçosa, MG

Carbon Balance in two agroforestry systems in Viçosa, MG

Resumo: A carência de estudos sobre o perfil das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e estoque de carbono em sistemas agroflorestais (SAFs) no Brasil, motivaram a execução deste trabalho. O objetivo foi avaliar a contribuição de dois SAFs para a redução da concentração de GEEs na atmosfera. O estudo foi conduzido em uma propriedade no município de Viçosa, MG. Foram avaliados dois sistemas agroflorestais implantados em dezembro de 2008. Um sistema agrissilvipastoril composto por Eucalipto + Feijão + Braquiária e outro sistema silvipastoril composto por Eucalipto + Braquiária. O componente arbóreo foi plantado no espaçamento de 8 m entre linhas e 3 m entre plantas. Nas unidades, empregou-se o método indireto para quantificação da biomassa do componente florestal. Para a pastagem, a biomassa foi estimada pelo método direto. As emissões de GEE foram oriundas das atividades agrícolas (adubação nitrogenada) e pecuária (fermentação entérica e manejo de dejetos). Tanto para o plantio quanto para colheita agrícola, as práticas foram realizadas de forma manual, sendo, portanto, inexistentes as emissões de GEE pela queima de combustíveis fósseis. As emissões de GEE foram estimadas com base nas Diretrizes do IPCC para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa. O sistema agrissilvipastoril apresentou maior remoção (49,99 tCO₂e) em relação ao sistema silvipastoril (42,00 tCO₂e ha⁻¹). A bovinocultura foi a atividade que apresentou maior emissão de GEE (3,49 tCO₂e ha⁻¹), quando comparado às culturas do eucalipto, do feijão e da braquiária. Os sistemas apresentaram um excedente de árvores quando se pensa em neutralização, pois, seriam necessárias, em média, 50 árvores e haviam em torno de 351 árvores ha⁻¹. Assim, conclui-se que os sistemas agroflorestais contribuem para diminuir a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, que evidencia a importância do plano do Governo Federal no âmbito do programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC), o qual incentiva a implantação de sistemas Agroflorestais como forma de reduzir as emissões de GEE em propriedades rurais.

Palavras-Chave: Estoque de Carbono, Gases de Efeito Estufa, Biomassa.

Abstract: The lack of studies on the profile of emissions of Greenhouse Gases (GHG) and carbon stock in Agroforestry Systems (AFS) in Brazil, as well as increased demand by society for sustainable products, motivated to the execution of this study. The objective was to evaluate the contribution of two agroforestry systems to reduce the concentration of GHGs in the atmosphere. The study was conducted on a small farm in Viçosa, MG. Two agroforestry systems were planted in December 2008. An agrosilvopastoral composed of Eucalyptus + Beans + Brachiaria. The other, a silvopastoral composed of Eucalyptus +

Brachiaria. The forestry component was planted in 8 m between rows and 3 m between plants. In both systems was used the indirect method for the quantification of forest biomass. For brachiaria, biomass was estimated by the direct method. GHG emissions were derived from agricultural activities (nitrogen fertilization) and livestock (enteric fermentation and manure management). Planting and for crop harvest were performed manually and GHG emissions from burning fossil fuels were disregarded. Emissions were estimated based on IPCC Guidelines for National Inventories of Greenhouse Gases. The agrosilvopastoral showed the highest stock (49,99 tCO₂e ha⁻¹) in relation to silvopastoral (42,00 tCO₂e ha⁻¹). The cattle showed higher GHG emissions (3,49 tCO₂e ha⁻¹) compared to cultures of eucalyptus, beans and brachiaria. The systems had a surplus of trees, on average, would be needed 50 trees and there were about 351 trees ha⁻¹. Thus, it is concluded that agroforestry systems contribute to decrease the concentration of greenhouse gases in the atmosphere. Therefore, the study shows the importance of the plan of the Federal Government under the Low Carbon Agriculture program, which encourages the establishment of agroforestry systems in order to reduce GHG emissions

Keywords: Carbon Stocks, Greenhouse Gases, Biomass.

1. Introdução

O dióxido de carbono (CO₂), juntamente com o vapor d'água (H₂O), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e clorofluorcarbonos (CFC's), são conhecidos como gases de efeito estufa. Esses gases possibilitam a ocorrência do efeito estufa natural, responsável por manter a superfície terrestre cerca de 30°C mais aquecida do que na ausência desse fenômeno (SCARPPINELLA, 2002).

O efeito estufa é necessário para a manutenção da vida na Terra, entretanto sua intensificação, principalmente pela queima de combustíveis fósseis, tais como petróleo, carvão e gás natural e as queimadas decorrentes dos desmatamentos, tem preocupado a sociedade. Em virtude do aumento significativo desses gases está ocorrendo a elevação da temperatura terrestre e de fenômenos climáticos extremos (RIBEIRO, 2007; IPCC, 2013).

No Brasil, estudos indicam que o aumento da temperatura e as alterações no regime hídrico, causados pelo aquecimento global, terão um grande impacto na produção agrícola (ASSAD et al., 2004). Um estudo realizado por Souza et al. (2012) sugere que a partir de simulações feitas com base no aumento de temperatura de 1° C, 3° C e 5,8° C e no acréscimo de 5%, 10% e 15% na precipitação pluviométrica, um forte rearranjo espacial poderá acontecer na geografia da produção agrícola brasileira.

Em virtude desse panorama, durante a 15ª Conferências das Partes (COP 15), o Brasil assumiu, de forma voluntária, reduzir as emissões de GEE, entre 36,1% e 38,9%, dos níveis de 2005, até o ano de 2020 (BRASIL, 2011). As principais fontes das emissões de GEE no Brasil estão relacionadas com as atividades agropecuárias, sendo por exemplo, a mais importante fonte de emissão de CO₂ a mudança do uso da terra, em particular da conversão

de florestas para uso agropecuário, com 77% dessas emissões, em 2005. Além disso, as atividades agropecuárias em si são as principais fontes de CH₄ e NO₂. A fermentação entérica nos ruminantes é a fonte de maior emissão de CH₄ no país com 63,2%, em 2005. Já para o NO₂, os dejetos de animais em pastagem são as mais importantes, com 47,5% da emissão desse gás (MCT, 2010).

Para mitigar as emissões de GEE advindas da mudança do uso da terra e cumprir as metas de redução estabelecidas, o Governo Federal criou o programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC). Esse programa visa incentivar a adoção de práticas sustentáveis que garantem a redução de emissões de GEE, aliadas ao aumento de renda aos produtores rurais, sobretudo com a expansão das seguintes tecnologias: Recuperação de pastagens degradadas; sistemas agroflorestais (SAFs); sistema de plantio direto (SPD); fixação biológica de nitrogênio (FBN); e florestas plantadas (BRASIL, 2011).

Os sistemas agroflorestais são entendidos como uma das formas mais adequadas de desenvolvimento dos trópicos úmidos, assim como o manejo de florestas secundárias (capoeiras) e os reflorestamentos. Portanto, os SAFs surgem como alternativas viáveis do ponto de vista ambiental e econômico, porque são capazes de contribuir na absorção de CO₂ e reduzir o efeito estufa (OSTERROHT et al. 2002). Apesar de já existirem alguns estudos sobre quantificação de carbono em SAFs, ainda há carência de informações, dada a grande variedade de arranjos possíveis, em termos de espécies, atividades desenvolvidas na área, produtos explorados, etc. Além disso, nas pesquisas existentes tem-se apenas estocagem de carbono e não incorporam as emissões, para gerar o balanço, que é o que interessa no contexto das mudanças climáticas.

Diante do exposto, objetivou-se avaliar o balanço de carbono em dois SAFs, por meio da quantificação das emissões e estocagem de carbono anual.

2. Material e Métodos

2.1. Localização e Caracterização da Área

O trabalho foi conduzido em dois sistemas agroflorestais implantados em 2008, em uma área com pastagem degradada, na localidade rural do Paraíso, no município de Viçosa (20°45' S e 42°51' W), MG.

O clima na região é do tipo Cwa, segundo o sistema de Köppen, ou seja, mesotérmico com verões quentes e chuvosos e invernos frios e secos. A temperatura média anual é de 19,4°C e a precipitação média anual de 1.200 mm (RAMOS et al. 2009). De acordo com Golfari (1975), pelo balanço hídrico de Thornthwaite e Mather verifica-se a ocorrência de um

período de déficit hídrico e retirada de água do solo de maio até setembro. Os tipos de solos predominantes na região são Latossolos profundos e bem drenados, porém ácidos e pobres em nutrientes disponíveis. Esta área apresenta relevo ondulado a fortemente ondulado.

2.2. Sistemas agroflorestais estudados

Dentro da propriedade, destinou-se uma área para o sistema agrissilvipastoril composto por Eucalipto + Feijão + Braquiária e outra para o sistema silvipastoril composto por Eucalipto + Braquiária. As informações sobre o histórico dos sistemas e adubações realizadas foram coletadas por meio de entrevistas aos produtores rurais

2.2.1. Sistema Agrissilvipastoril

O sistema foi implantado em dezembro de 2008 em uma unidade demonstrativa com área de 0,73 ha. Esse SAF está sendo manejado com objetivo de produzir madeira para serraria e pastagem para o gado, através de pousio rotacionado.

Para a determinação da quantidade adequada de fertilizantes para cada espécie, foram coletadas amostras do solo. Para o plantio do eucalipto, utilizou-se 0,2 Kg cova⁻¹ de NPK (06-30-06). Para a cultura do feijão, utilizou-se 500 Kg ha⁻¹ de NPK (04-14-08).

O plantio em cova do componente arbóreo foi realizado de forma manual, adotando-se o híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, no espaçamento de 8 x 3 m, totalizando 416 plantas ha⁻¹. Três meses após o plantio, realizou-se a adubação de cobertura do eucalipto com 0,160 Kg planta⁻¹ de NPK (20-05-20).

Os plantios do capim braquiária (*Brachiaria decumbens*) e do feijão (*Phaseolus vulgaris*) foram realizados simultaneamente, com auxílio de plantadeira com tração animal específica para o plantio direto. O espaçamento entre linhas adotado foi de 60 cm. Para a cultura do feijão, aplicou-se 300 Kg ha⁻¹ de NPK (08-28-16) e 200 Kg ha⁻¹ de uréia em cobertura na área de plantio. Para o pasto foi utilizado 100 Kg ha⁻¹ ano⁻¹ de uréia.

2.2.2. Sistema Silvipastoril

O sistema foi implantado em dezembro de 2008 em uma unidade demonstrativa com área de 1,90 ha. Para o plantio e a adubação do eucalipto e do capim braquiária, utilizou-se a mesma metodologia empregada no sistema agrissilvipastoril.

2.3. Determinação da Biomassa do Eucalipto

Os dados de campo foram coletados em julho de 2012. Nas unidades foram lançadas parcelas de 750 m² (25 x 30 metros) distribuídas de forma aleatória. A relação foi de uma amostra para cada 0,5ha. Assim, nos sistema agrissilvipastoril e silvipastoril, foram lançadas 3 e 4 parcelas, respectivamente. Todas as árvores dentro da parcela tiveram CAP (circunferência com casca a 1,30m) e altura (total e comercial) mensuradas. Para o CAP, utilizou-se uma fita métrica de 1m e para determinação das alturas, utilizou-se o VERTEX.

Para a determinação da biomassa foi utilizado o método indireto, o qual consiste na seleção de uma equação para a área com características semelhantes à área de estudo. Para isso, utilizou-se o modelo Schumacher-Hall (logaritimizado) ajustado para determinação de biomassa em um sistema agrissilvipastoril com feijão, presente na mesma propriedade, porém, implantado em 2009, encontrado por Castro Neto (2013), conforme apresentado a seguir:

$$\ln B = -2,172 + 2,385 * \ln DAP + 0,0005 * \ln Ht \quad (1)$$
$$R^2 = 93,69\%$$

O carbono estocado na biomassa foi estimado por meio da multiplicação dos valores de biomassa pelo fator 0,47 para espécies arbóreas, conforme recomendação do IPCC (2006).

2.4. Determinação da Biomassa do Capim Braquiária

Para estimar a biomassa do pasto, foram lançadas, de forma aleatória, 10 parcelas em cada unidade, com 1m² e posicionadas entre as linhas de plantio do eucalipto. As parcelas foram delimitadas com o auxílio de um gabarito e todo o material vegetal presente em cada uma delas foi cortado rente ao solo, com uma tesoura de poda. O material foi acomodado em sacos de polietileno e pesado em campo com auxílio de uma balança de precisão. Logo após, foram retiradas e pesadas amostras. Estas amostras foram acondicionadas em sacos de papel e levadas para secagem em estufa de circulação forçada de ar, a uma temperatura de 65°C, até a estabilização da massa de matéria seca.

A determinação da biomassa seca no campo foi obtida por meio do método da proporcionalidade, tal qual utilizado por Soares e Oliveira (2002), por meio da seguinte equação:

$$Ms(c) = \frac{Mu(c) * Ms(a)}{Mu(a)} \quad (2)$$

Em que:

Ms(c) = massa de matéria seca total, em kg;

Ms(a) = massa de matéria seca das amostras, em kg;

Mu(a) = massa de matéria úmida das amostras, em kg;

Mu(c) = massa de matéria úmida total no campo, em kg.

O carbono da pastagem foi estimado conforme a metodologia empregada para o componente florestal.

2.5. Inventário de Emissões de GEE

Os cálculos das emissões de GEE foram baseados nas metodologias, contidas no Guia de Orientação para Inventários Nacionais de Gases de Efeito Estufa (IPCC, 2006). Dessa forma, estimaram-se as emissões de GEE oriundas das fertilizações nitrogenadas e da criação de bovinos.

As emissões totais de N₂O, pelo uso de fertilizantes, foram calculadas pelo somatório das emissões diretas e emissões indiretas de óxido nitroso (Equação 3). As emissões diretas são provenientes da adição de esterco animal em pastagens, uso de fertilizantes sintéticos, cultivo de plantas fixadoras de nitrogênio, pela incorporação no solo de resíduos de colheita e pela mineralização de nitrogênio associada ao cultivo de solos orgânicos (Equação 4). Já as emissões indiretas de N₂O referem-se à porção de nitrogênio incorporado no solo que é volatilizada na forma de NH₃ e NO_x e também perdida por lixiviação (Equações 5 e 6).

$$E_{N_2O} = E_{N_2O_d} + E_{N_2O_i} \quad (3)$$

$$E_{N_2O_d} = Q_f * FE_{N_2O_d} * F_{N-N_2O} \quad (4)$$

$$E_{N_2O_v} = (Q_f * Frac_{gas}) * FE_{N_v} * F_{N-N_2O} \quad (5)$$

$$E_{N_2O_l} = (Q_f * Frac_{lixiv.}) * FE_{N_l} * F_{N-N_2O} \quad (6)$$

Em que:

E_{N_2O} = emissão de N₂O, em toneladas por hectare;

$E_{N_2O_d}$ = emissão de N₂O direta, em toneladas por hectare;

$E_{N_2O_i}$ = emissão de N₂O indireta, em toneladas por hectare;

Q_f = quantidade de fertilizante utilizada, em toneladas por hectare;

$Frac_{gas}$ = fração de N volatilizada na forma de NH₃ e NO_x, em toneladas por hectare. Foi adotado o default do IPCC (10%);

$Frac_{lixiv.}$ = fração de N lixiviado, em toneladas por hectare. Foi adotado o default do IPCC (30%);

$FE_{N_2O_d}$ = fator de emissão de N₂O para emissão direta. Foi adotado o default do IPCC (1%);

FE_{N_v} = fator de emissão de N volatilizado. Foi adotado o default do IPCC (1%);

FE_{N_l} = fator de emissão de N lixiviado. Foi adotado o default do IPCC (2,5%);

F_{N-N_2O} = fator de conversão N-N₂O. Massa específica do N₂O sobre a massa específica do N₂ (44/28).

Além disso, calculou-se a emissão do componente animal do sistema. Adotou-se 1 unidade animal (u.a.) por hectare, conforme informação fornecida pelo produtor. O bovino emite GEE basicamente por dois processos: fermentação entérica e pelo manejo de seus dejetos. A fermentação entérica é parte do processo digestivo natural dos herbívoros ruminantes que ocorre de forma anaeróbica no aparelho digestivo dos animais (rúmen e retículo), gerando energia, CO₂ e CH₄ (CETESB et al., 2011), sendo a magnitude destas emissões dependente da quantidade e qualidade de alimento ingerido, grau de digestibilidade e atividade física animal, além de fatores intrínsecos aos animais.

De acordo com MCT (2010), cada unidade animal criada em sistema extensivo a pasto no Brasil, em média, emite entre 55 e 58 Kg CH₄.ano⁻¹. Em um sistema de integração lavoura-pecuária com pasto bem manejado, Esteves et al. (2010) obtiveram para cada animal uma emissão de cerca de 39 Kg CH₄ ano⁻¹. Assim, adotou-se este valor para cálculo das emissões de CH₄ animal (Equação 7).

$$E_{CH_4} = Q_A * FE_{CH_4} \quad (7)$$

Em que:

E_{CH_4} = emissão de CH₄, em toneladas por hectare por ano;

Q_A = quantidade de animais por hectare;

FE_{CH_4} = fator de emissão de CH₄ por fermentação entérica.

O resíduo dos animais no SAF é depositado junto à pastagem. Este tipo de manejo gera quantidades pequenas de CH₄, entretanto a emissão de N₂O pode ser elevada. A urina do bovino, por exemplo, gera 80% de todo o N₂O lançado à atmosfera pelo animal (LESSA, 2011). Deste modo, quantificou-se a emissão de N₂O proveniente da deposição das fezes e urina do animal na pastagem da mesma maneira que foi calculada a emissão de N₂O pelo uso de fertilizantes.

Posteriormente, para conversão da emissão total de CH₄ e N₂O em CO₂e. (dióxido de carbono equivalente), multiplicou-se o valor obtido pelo Potencial de Aquecimento Global do óxido nitroso e metano, conforme a equação 8.

$$E_{CO_{2e}} = E_{GEE} * PAG_{GEE} \quad (8)$$

Em que:

$E_{CO_{2e}}$ = emissão de dióxido de carbono equivalente, em toneladas por hectare;

E_{GEE} = emissão de CH₄ e N₂O, em toneladas por hectare;

PAG_{GEE} = potencial de Aquecimento Global do GEE. Segundo o IPCC (2007) o PAG do N₂O é igual a 298 e do CH₄ é 25.

Ao final, contabilizaram-se as emissões de GEE, em toneladas de dióxido de carbono equivalente, para cada atividade dos sistemas.

3. Resultados e Discussões

3.1. Estoque de Carbono no sistema agrissilvipastoril e silvipastoril

Por meio da equação 1 foi estimada a biomassa. Em seguida, estimou-se o estoque de carbono e CO₂e dos dois sistemas (Tabela 1).

Tabela 1. Biomassa, carbono e CO₂e do componente arbóreo (tonelada por hectare) para os dois sistemas aos 44 meses de idade

Table 1. Biomass, carbon and CO₂e (ton per hectare) for the two systems at 44 months old

Sistema	Biomassa (t ha ⁻¹)	Carbono (t ha ⁻¹)	CO ₂ e (t ha ⁻¹)
Agrissilvipastoril com Feijão	29,01	13,64	49,99
Silvipastoril	24,46	11,46	42,00
Média	26,68	12,54	45,98

O sistema agrissilvipastoril obteve maior estoque de carbono quando comparado ao sistema silvipastoril. Esta diferença pode ser explicada pela presença do feijão no sistema agrissilvipastoril, uma vez que, a adubação e restos culturais deste componente podem melhorar a fertilidade do solo. Desta forma, explica-se o maior acúmulo de biomassa neste sistema.

Os sistemas agrissilvipastoril e silvipastoril apresentaram incremento anual de carbono (3,72 e 3,12 tC ha⁻¹ ano⁻¹), respectivamente. Müller et al., (2009) estimaram um incremento de 1,43 tC ha⁻¹ ano⁻¹ para um sistema silvipastoril misto com eucalipto e acácia com densidade de 105 árvores por hectare no município de Coronel Pacheco, MG, portanto, menor em relação aos deste trabalho. Valores próximos aos desta pesquisa foram observados em dois sistemas silvipastoris no município de Alegrete, RS, onde Oliveira (2008) estimou um incremento de carbono para a unidade com pinus de 3,00 e 3,36 tC ha⁻¹ ano⁻¹, para densidade de 500 e 1.000 árvores por hectare, respectivamente. Já para unidade com eucalipto, o incremento foi de 3,40 e 3,82 tC ha⁻¹ ano⁻¹, nesta mesma sequência. Em Nova Odessa, SP, Gutmanis (2004) observou um incremento no sistema silvipastoril com pinus de 2,93 e 5,30 tC ha⁻¹ ano⁻¹, na densidade de 200 e 400 árvores por hectare, respectivamente. Valores estes que foi inferior para menor densidade e superior para maior densidade de

árvores em relação aos deste trabalho. Já em um estudo feito por Tsukamoto Filho (2003), estimou incremento de $7,67 \text{ tC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para um sistema agrissilvipastoril com eucalipto, com espaçamento de $10 \times 4 \text{ m}$, e arroz, no município de Paracatu, MG, portanto, maior em relação ao observado nesta pesquisa (Tabela 2).

3.2. Inventário de Emissões de GEE

Para o cultivo do eucalipto no sistema agrissilvipastoril foram contabilizadas as emissões provenientes da adubação de plantio em 2008 e de cobertura em 2009, perfazendo total de $0,17 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1}$ (2,32% do total). Embora tenha sido utilizada menor quantidade de NPK por planta, a adubação de cobertura apresentou maior emissão em relação à de plantio, em função da concentração de nitrogênio no NPK utilizado em cobertura. Para o cultivo de feijão, a adubação em cobertura feita em 2009 apresentou maior valor em relação à de plantio em 2008, totalizando $1,45 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1}$ (20,09% do total). Esta diferença é devido à maior concentração de nitrogênio no NPK e da adição de ureia em cobertura. Para a bovinocultura, foram contabilizadas as emissões a partir de 2009, ano em que foi adicionado o gado ao sistema, sendo responsável por emissão de $3,49 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1}$, correspondente à 48,26% do total. Para o capim braquiária, foram contabilizadas as emissões a partir do plantio em 2008, obtendo emissão total de $2,12 \text{ t CO}_2\text{e ha}^{-1}$, correspondente à 29,33% do total (Tabela 3).

Tabela 2. Incremento médio anual em carbono para sistemas agroflorestais em diferentes municípios do Brasil**Table 2.** Mean annual increment in carbon for agroforestry systems in different cities of Brazil

Sistema	Espécie Florestal	Cultura Agrícola	Densidade (arvs.ha⁻¹)	Estoque (tC.ha⁻¹)	Incremento	Idade (anos)	Município	Fonte
Agrissilvipastoril	Eucalipto	Feijão	369	13,64	3,72	3,67	Viçosa/MG	-
silvipastoril	Eucalipto	-	333	11,45	3,12	3,67	Viçosa/MG	-
silvipastoril	Eucalipto + Acácia	-	105	14,29	1,43	10	Coronel Pacheco/MG	Müller et al., (2009)
Silvipastoril	Eucalipto	-	500	63,10	3,00	21	Alegrete/RS	Oliveira (2008)
Silvipastoril	Eucalipto	-	1000	70,60	3,36	21	Alegrete/RS	Oliveira (2008)
Silvipastoril	Pinus	-	500	71,50	3,40	21	Alegrete/RS	Oliveira (2008)
Silvipastoril	Pinus	-	1000	80,20	3,82	21	Alegrete/RS	Oliveira (2008)
Silvipastoril	Pinus	-	200	87,97	2,93	30	Nova Odessa/SP	Gutmanis (2004)
Silvipastoril	Pinus	-	400	158,94	5,30	30	Nova Odessa/SP	Gutmanis (2004)
Agrissilvipastoril	Eucalipto	Arroz	250	84,38	7,67	11	Paracatu/MG	Tsukamoto Filho (2003)

Para o sistema silvipastoril, o cultivo do eucalipto foi responsável por uma emissão total de 0,17 tCO₂e ha⁻¹, correspondente à 2,91% do total. Para a bovinocultura, obteve-se uma emissão total de 3,49 tCO₂e ha⁻¹, correspondente à 60,39% do total. Já para o capim braquiária, obteve-se uma emissão total de 2,12 tCO₂e ha⁻¹, correspondente à 36,70% do total das emissões geradas por este sistema (Tabela 3).

Tabela 3. Emissão de CO₂e em t.ha⁻¹, em cada ano, para os sistemas avaliados
Table 3. Emission of CO₂e in t.ha⁻¹ in every year for the systems evaluated

Sistema	Componente	Emissão (t CO ₂ e. ha ⁻¹)					Total	Porcentagem (%)
		2008	2009	2010	2011	2012		
Silvipastoril	Eucalipto	0,05	0,12	-	-	-	0,17	2,91
	Bovino	0,00	0,98	0,98	0,98	0,57	3,49	60,39
	Braquiária	0,46	0,46	0,46	0,46	0,27	2,12	36,70
Total		0,51	1,56	1,44	1,44	0,84	5,79	100,00
Agrissilvipastoril com feijão	Eucalipto	0,05	0,12	-	-	-	0,17	2,32
	Feijão	0,32	1,13	-	-	-	1,45	20,09
	Bovino	0,00	0,98	0,98	0,98	0,57	3,49	48,26
	Braquiaria	0,46	0,46	0,46	0,46	0,27	2,12	29,33
Total		0,51	2,69	1,44	1,44	0,84	7,24	100,00

A diferença em relação às emissões entre um sistema e outro está relacionada à adição do cultivo de feijão no sistema agrissilvipastoril. O ano de 2009 foi o que apresentou maior emissão devido à adubação em cobertura para o eucalipto e feijão, na unidade agrissilvipastoril, e do eucalipto na unidade silvipastoril. O bovino apresentou maior emissão de CO₂e, em seguida o capim braquiária, feijão e eucalipto. É importante frisar que neste estudo levou-se em consideração apenas um cultivo agrícola, no caso o feijão, e sabe-se que, em sistemas agrissilviculturais é interessante ter uma diversidade de produção, a fim de gerar maior renda ao produtor e amortizar os custos gerados. Além disso, o fato de não ter sido utilizado nenhuma máquina nas operações de plantio e colheita, evitaram-se as emissões de GEE pela queima dos combustíveis fósseis.

3.3. Balanço de Carbono

Os sistemas, até a idade estudada, apresentaram balanço de carbono positivo. A unidade agrissilvipastoril com feijão apresentou remoção de 49,99 tCO₂e ha⁻¹ e, em contrapartida, estimou-se emissão de 7,24 tCO₂e ha⁻¹. Portanto, o sistema apresentou um balanço de carbono positivo de 42,76 tCO₂e ha⁻¹. Já a unidade silvipastoril, apresentou um

estoque de 42,00 tCO₂e ha⁻¹, emissão de GEE de 5,79 tCO₂e ha⁻¹ e balanço de 36,22 tCO₂e ha⁻¹ (Tabela 4). O número de árvores necessárias para compensar as emissões provenientes das atividades dos sistemas foi de 53 e 46, para o sistema agrissilvipastoril e silvipastoril, respectivamente. Quantidade superior ao encontrado no artigo anterior, que variou de 17 a 44 árvores ha⁻¹.

Tabela 4. Balanço de carbono e quantidade de árvores necessárias para neutralizar as emissões dos sistemas avaliados

Table 4. Carbon balance and amount of trees needed to offset the emissions of the evaluated systems

	Sistema		Média
	Agrissilvipastoril	Silvipastoril	
Estoque	49,99	42,00	46,00
Emissão (t CO₂e ha⁻¹)	7,24	5,79	6,51
Balanço	42,76	36,22	39,49
Estoque (t CO₂e arv⁻¹)	0,14	0,13	0,13
Árvores Necessárias	53	46	50
Árvores Sistema	369	333	351
Árvores Excedentes	316	287	302
% Árvores Compensar	14,48	13,77	14,13

Para o sistema agrissilvipastoril com feijão seriam necessárias 53 árvores (14,48%) para compensarem as emissões e haviam 369 árvores, portanto, houve um excedente de 316 árvores. O sistema silvipastoril necessitaria de 46 árvores (13,77%) para neutralizar as emissões e haviam 333 árvores, apresentando, portanto, um excedente de 287 árvores (Tabela 4). Esta diferença foi devido à maior emissão de GEE pelo sistema agrissilvipastoril. Em média, seriam necessárias 14,15% das árvores para neutralização das emissões. Assim, os resultados evidenciaram que os sistemas foram capazes de neutralizar as emissões de GEE e ainda foram superavitários.

4. Conclusões

Os sistemas agroflorestais possuem um balanço de carbono positivo, sendo de 42,76 tCO₂e ha⁻¹ para o sistema agrissilvipastoril com feijão e 36,22 tCO₂e ha⁻¹ para o sistema silvipastoril.

A presença do componente agrícola (feijão) no sistema agrissilvipastoril propicia maior remoção (49,99 tCO₂e ha⁻¹) em relação ao sistema silvipastoril (42,00 tCO₂e ha⁻¹), porém, exige maior número de árvores para neutralizar as emissões de GEE.

Em sistemas em que não se utiliza máquinas na implantação, a adubação de cobertura, é a que mais contribui nas emissões, em função do maior potencial de emissão do nitrogênio.

Os sistemas agrissilvipastoris e silvipastoris apresentam excedente de árvores quando se pensa na neutralização de carbono, permitindo inferir que os sistemas Agroflorestais contribuem de forma efetiva para diminuir a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

O componente bovino é que mais emite GEE, quando comparado às emissões do cultivo do eucalipto, feijão e capim braquiária.

5. Referências Bibliográficas

ASSAD, E. D, et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.39, n.11, p.1057-1064, 2004.

BRASIL. **Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – Versão Preliminar**. 75 p., 2011.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; PROCLIMA – Programa de Mudanças Climáticas do Estado de São Paulo; EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Inventário de emissão de metano pela pecuária (fermentação entérica e sistemas de manejo de dejetos animais) do estado de São Paulo, 1990 a 2008**. In: 1º Relatório de Referência do estado de São Paulo de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, período de 1990 a 2008. São Paulo, SP, 52p., 2011.

ESTEVES, S. N.; BERNARDI, A. C. C.; VINHOLIS, M. M.; PRIMAVESI, O. **Estimativas da emissão de metano por bovinos criados em sistema de integração lavoura-pecuária em São Carlos – SP**. Embrapa: Circular Técnica, 7p. 2010.

GOLFARI, L. **Zoneamento ecológico do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado, 1975. 65 p.

GUTMANIS, D. **Estoque de carbono e dinâmica ecofisiológica em sistemas silvipastoris**. 2004. 142 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: the physical Science basis**. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>. Acesso em: 01 nov. 2012.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013: the physical Science basis**. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/#.UpUkzMRDtn1>>. Acesso em: 12 nov. 2013.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Publicado: IGES, Japan. 2006.

LESSA, A. C. R. **Emissão de óxido nitroso e volatilização de amônia de urina e fezes bovinas em pastagens.** 2011. 58f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, RJ.

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia. **Status de ratificação do protocolo de Kyoto.** Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/4457.html>>. Acesso em: 10 Jan. 2010.

MÜLLER, M. D.; FERNANDES, E. N.; CASTRO, C. R. T.; PACIULLO, D. S. C.; ALVES, F. F. Estimativa de acúmulo de biomassa e carbono em sistema agrossilvipastoril na Zona da Mata Mineira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 60, p. 11-17, dez. 2009. Edição Especial.

NETO CASTRO, F. **Balço de carbono em uma propriedade com diferentes sistemas agroflorestais localizada na zona da mata de Minas Gerais.** 2013. 67p. Monografia - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.

OLESEN, J. E.; BINDI, M. **Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy.** European Journal of Agronomy, v. 16, n. 4, p. 239-262, 2002.

OLIVEIRA, E.B.; RIBASKI, J.; ZANETTI, É.A.; PENTEADO JÚNIOR, J.F. Produção, carbono e rentabilidade econômica de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* em sistemas silvipastoris no Sul do Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.57, p.45-56, 2008.

Osterroht, M. O que é uma adubação verde: Princípios e ações. **Agroecologia Hoje**, v.1, p.9-11, 2002.

RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A. R. D.; FORTES, L. T. G. **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990: edição revista e ampliada.** Brasília: INMET, 2009.

RIBEIRO, S. C. **Quantificação do estoque de biomassa e análise econômica da implementação de projetos visando a geração de créditos de carbono em pastagem, capoeira e floresta primária.** 2007.139f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.

SCARPINELLA, G. A. **Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Quioto.** 2002. 182 p. Dissertação (Mestrado em Energia) Universidade de São Paulo. São Paula, SP.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F. DE; SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal.** 2. ed. Viçosa, MG, Brazil: Editora UFV, 2011. 272p.

SOARES, C. P. B.; OLIVEIRA, M. L. R. Equações para estimar a quantidade de carbono na parte aérea de árvores de eucalipto em Viçosa, Minas Gerais. **Revista Árvore**, v.26, n.5, p. 533-539, 2002.

SOUZA, J. L. et al. Potencial de sequestro de carbono em solos agrícolas sob manejo orgânico para redução da emissão de gases de efeito estufa. **IDESIA**, v.30, n.1, p. 7-15, 2012.

TSUKAMOTO FILHO, A.A. **Fixação de carbono em um sistema agroflorestal com eucalipto na região do Cerrado de Minas Gerais.** 2003. 98p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sistemas agroflorestais contribuem para mitigação de dos gases de efeito estufa na atmosfera e desempenham um importante papel para o alcance das metas de redução de emissões de GEE estabelecidas pelo governo brasileiro. Estes sistemas devem ser incentivados no Plano Nacional sobre Mudanças do Clima, de forma a tornar as práticas agropecuárias ambientalmente mais sustentáveis.

Recomenda-se estudos sobre indicadores ambientais (infiltração de água, agrotóxicos, etc) e técnico-econômicos (desbaste, desrama, colheita, comercialização dos produtos, etc) como forma de tomada de decisões para os produtores rurais. Além disso, necessita-se melhores políticas de extensão a fim de demonstrar aos produtores os benefícios da implantação de sistemas agroflorestais.