



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS

ANDRÉ DE ALMEIDA SILVA

Dinâmica do carbono e nitrogênio no sistema silvipastoril com núcleos: a pecuária de baixo carbono mitigando os impactos da produção convencional

FLORIANÓPOLIS – SC, 2020

ANDRÉ DE ALMEIDA SILVA

**DINÂMICA DO CARBONO E NITROGÊNIO NO SISTEMA SILVIPASTORIL
COM NÚCLEOS: A PECUÁRIA DE BAIXO CARBONO MITIGANDO OS
IMPACTOS DA PRODUÇÃO CONVENCIONAL**

Tese submetida como requisito final para a obtenção do grau de Doutor em Agroecossistemas pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Abdon L. Schmitt Filho

Coorientador: Prof. Dr. Alfredo Celso Fantini

FLORIANÓPOLIS – 2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Almeida Silva, André

Dinâmica do carbono e nitrogênio no sistema silvipastoril com núcleos: A pecuária de baixo carbono mitigando os impactos da produção convencional / André Almeida Silva ; orientador, Abdon Luiz Schmitt Filho, coorientador, Alfredo Celso Fantini, 2020.

71 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós Graduação em Agroecossistemas, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Agroecossistemas. 2. Mata Atlântica. 3. Sequestro de carbono. 4. Restauração Ecológica. 5. Nucleação. I. Luiz Schmitt Filho, Abdon. II. Celso Fantini, Alfredo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Agroecossistemas. IV. Título.

ANDRÉ DE ALMEIDA SILVA

**DINÂMICA DO CARBONO E NITROGÊNIO NO SISTEMA SILVIPASTORIL COM
NÚCLEOS: A PECUÁRIA DE BAIXO CARBONO MITIGANDO OS IMPACTOS DA
PRODUÇÃO CONVENCIONAL**

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arcângelo Loss, PPGA/UFSC

Prof. Dr. Paulo Antônio de Almeida Sinisgalli, IEE/USP

Prof. Dr. Sérgio Augusto Ferreira de Quadros DZDR/UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutor em Agroecossistemas.

Prof. Dr. Arcângelo Loss, Coordenador PPGA/UFSC

Prof. Dr. Abdon Luiz Schmitt, Orientador PPGA/UFSC

Florianópolis, 29 de Maio de 2020.

AGRADECIMENTOS

Este estudo teve a colaboração e incentivo da minha família, amigos, colegas e instituições. A todas essas pessoas, gostaria de agradecer. Em primeiro lugar minha família. Não há palavras suficientes para agradecer aos meus pais que tanto amo, por ser meu esteio, Josmar de Almeida Silva, Josefa Vieira Silva, meus irmãos Emerson Vieira Silva e Eder Vieira Silva.

Agradeço aos meus professores e amigos que auxiliaram na construção desse trabalho. Ao Prof. Dr. Abdon Luiz Schmitt Filho, pela orientação durante esses 4 anos. Obrigado pelos seus ensinamentos, estímulos e conselhos. Ao Prof. Dr. Alfredo Celso Fantini que me coorientou durante o processo de doutoramento. Aos Professores Dr. Arcângelo Loss, Dr. Fernando Joner e Prof. Dr. Rodrigo Macedo – UFPR, por ter composto a banca de defesa do projeto e de qualificação. A professora Dra. Daniele Kazama pelo apoio nas discussões dos dados da tese e disponibilidade do Laboratório de Forragicultura e também a Pós-doutoranda Monique Souza.

Agradeço a Gisele Francioli Simioni pela ajuda em parte das minhas coletas a campo, leitura dos meus trabalhos e trocas de ideias.

Agradeço aos amigos do Laboratório Sistema Silvipastoril e Restauração Ecológica-LASSre/UFSC, Giovana Pittarelli, Ana Heck, Stéfano Kretzer, Carina Rover, Matheus Deniz pela ajuda na coleta dos dados em campo e pelo auxílio no laboratório durante todo o experimento.

Agradeço a Fabiana pelo apoio fundamental em todas as questões burocráticas que envolvem a universidade na secretaria do Programa de Pós-graduação em Agroecossistemas-PPGA/UFSC.

Agradeço aos agricultores do município de Santa Rosa de Lima – SC, pela oportunidade, aos Bloemer, Vandresen, Hardet e Vanderlinde.

Agradeço aos colegas da graduação e pós-graduação, e companheiros de moradia, aos quais se tornaram bem mais que grandes amigos e sim verdadeiros irmãos ao longo desses anos. Também agradeço a todos os professores da pós-graduação que me concederam uma parcela de conhecimento.

Agradeço aos amigos do curso, Gildean Portela, Adevan Pulga, Antônia, e aos amigos do Centro de Estudos e Promoção da Agricultura de Grupos – CEPAGRO.

A gratidão é IMENSA!

“Não existe no planeta Terra nenhum país que deu certo, que se desenvolveu, que cresceu economicamente pela ignorância, pelo analfabetismo ou pelo empobrecimento. Todos os países que cresceram investiram muito em educação”.

Luiz Inácio Lula da Silva

RESUMO

A degradação dos Biomas se tornou uma preocupação ambiental global. A pecuária especialmente sob manejo inadequado tem protagonizado o agravamento desta crise. Hoje, é premente mitigar a degradação dos agroecossistemas pastoris através da revisão das práticas de manejo para minimizar impactos ambientais da pecuária convencional nas mudanças climáticas e degradação dos ecossistemas. O Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPNúcleos) vem sendo apresentado como uma alternativa que sinergicamente tem viabilizado a reabilitação e restauração ecológicas, reestabelecido funções e serviços ecossistêmicos, e aumentado a competitividade econômica dos sistemas pecuários, especialmente no contexto da agricultura familiar multifuncional. Os núcleos arbóreos agroflorestais estrategicamente distribuídos nas áreas de pastagem têm favorecido a biodiversidade, a regulação microclimática, os atributos do solo, e a produção de biomassa. Estas características podem resultar em um incremento do estoque de carbono e nitrogênio por hectare. Considerando esta possibilidade, esta pesquisa objetivou: 1) avaliar a biomassa dos componentes arbóreos e estimar o incremento no estoque de carbono devido a implantação dos núcleos agroflorestais; 2) analisar a influência dos núcleos arbóreos no estoque de carbono e nitrogênio no dossel da pastagem. O estudo foi conduzido durante 2018 e 2019, no município de Santa Rosa de Lima SC, sul do Brasil. Para alcançar o primeiro objetivo foram realizadas coletas de dados a partir da medição a altura (H) e diâmetro altura do peito (DAP) em 437 indivíduos de 30 espécies em 49 núcleos arbóreos. Através de modelos matemáticos foram estimados a biomassa e o carbono sequestrado por hectare. A relação entre o carbono sequestrado e a riqueza, densidade e presença de leguminosas também foi avaliada. O acúmulo de biomassa e estoque de carbono foram de 17.804 kg ha⁻¹ e 4.205 kg ha⁻¹, respectivamente. A biomassa foi significativa para as variáveis riqueza e densidade de espécies nos núcleos (R^2 0,08 e *p-value* 0,04). Para o segundo objetivo, foram realizadas coletas de forragens em áreas do SSPnúcleos e em pastagens sem árvores (PSA). No SSPnúcleos as coletas foram divididas em área próximo ao núcleo (APN, 30% do ha) e área entre núcleos (AEN, 60% do ha). O SSPnúcleos não afetou negativamente a produção de biomassa e o carbono estocado no dossel por hectare, mesmo considerando que 10% da área foram alocados para os núcleos arbóreos agroflorestais. Nas AEN o estoque de carbono foi superior ao observado na PSA. O Sistema Silvipastoril demonstrou ser um importante sumidouro de carbono para áreas de pastagens com potencial para mitigar o impacto da pecuária convencional nas mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mata Atlântica. Sequestro de carbono. Sumidouro de carbono. Restauração ecológica. Reabilitação ecológica. Nucleação.

ABSTRACT

The degradation of biomes has become a global environmental concern. Livestock, especially under inadequate management, has played a role in aggravating this crisis. Today, it is imperative to mitigate the degradation of pastoral agroecosystems by reviewing management practices to minimize the environmental impacts of conventional livestock on climate change and ecosystem degradation. The High Biodiversity Silvopastoral System (SSPnúcleos) has been presented as an alternative that has synergistically enabled ecological rehabilitation and restoration, reestablished ecosystemic functions and services, and increased the economic competitiveness of livestock systems, especially in the context of multifunctional family farming. Agroforestry tree nuclei strategically distributed in pasture areas have favored biodiversity, microclimate regulation, soil attributes, and biomass production. These characteristics can result in an increase in the carbon and nitrogen stock per hectare. Considering this possibility, this research aimed to: 1) evaluate the biomass of the tree components and estimate the increase in the carbon stock due to the implantation of SSPnúcleos; 2) to analyze the influence of SSPnúcleos on the carbon and nitrogen stock in the pasture canopy. The study was conducted during 2018 and 2019, in the municipality of Santa Rosa de Lima, southern Brazil. In order to achieve the first objective, data collections were performed from the measurement of height (H) and diameter of breast height (DBH) in 437 individuals of 30 species in 49 nuclei. Using mathematical models, biomass and carbon sequestered per hectare were estimated. The relationship between and the sequestered carbon and the richness, density and presence of legumes was also evaluated. The accumulation of biomass and carbon stock was $17.804 \text{ kg ha}^{-1}$ and 4.205 kg ha^{-1} , respectively. Biomass was significant for the variables richness and density of species in the nuclei (R^2 0.08 and p-value 0.04). For the second objective, forage collections were carried out in areas of the SSPnúcleos and pastures without trees (PSA). In the SSPnúcleos the collections were divided into an area close to the nucleus (APN, 30% of the ha) and an area between nuclei (AEN, 60% of the ha). SSPnúcleos did not negatively affect biomass production and carbon stored in the canopy per hectare, even considering that 10% of the area was allocated to agroforestry tree nuclei. In the AEN, the carbon stock was higher than PSA. The SSPnúcleos has proven to be an important carbon sink for pasture areas with the potential to mitigate the impact of conventional livestock on climate change.

Keywords: Atlantic forest. Carbon sequestration. Carbon sink. Ecological restoration. Ecological rehabilitation. Nucleation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Representação esquemática do sistema silvipastoril com núcleos.....30
- Figura 2.** Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnúcleos) com 5 anos.31
- Figura 3.** Relação do acúmulo de biomassa com (A) o número de espécies (riqueza) e (B) a densidade (número de indivíduos por hectare) dos núcleos.....44
- Figura 4.** Relação do acúmulo de carbono com (A) número de espécies (riqueza) e (B) densidade (número de indivíduos por hectare)45
- Figura 5.** Representação esquemática da divisão dos tratamentos. Sistema Silvipastoril com Núcleos SSPnúcleos, área perto dos núcleos (APN, 30%), área entre os núcleos (AEN, 60%), núcleos arbóreos agroflorestais (N, 10%), e pastagem sem árvores (PSA) com pontos de coletas fictícias.....54

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Lista de espécies com % de ocorrência nos núcleos estudados.....33
- Tabela 2.** Equações utilizadas para a estimativa de biomassa e carbono.....36
- Tabela 3.** Espécies componentes do SSPnúcleos e sua % de ocorrência, biomassa e carbono.....40
- Tabela 4.** Parâmetros dos modelos de regressão para estimativa da produção de biomassa e estoque de carbono e função de presença de leguminosas, riqueza de espécies e densidade de indivíduos nos núcleos do SSPnúcleos.....43
- Tabela 5.** Análise de variância para massa do dossel (MS), carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) no SSPnúcleos e na pastagem sem árvores (PSA).....57
- Tabela 6.** Médias das variáveis (MS), carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono nitrogênio (C/N) para os dois tratamentos: (1) Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnúcleos) e pastagem sem árvores (PSA) em 2018 e 2019.....58
- Tabela 7.** Análise de variância para massa do dossel (MS), carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) em uma pastagem sem árvores (PSA) e duas áreas distintas do SSPnúcleos, área próxima aos núcleos (APN) e área entre os núcleos (AEN)63
- Tabela 8.** Médias das variáveis massa do dossel (MS), carbono (C), nitrogênio (N) e relação nitrogênio (C/N) em uma pastagem sem árvores (PSA) e nas duas áreas distintas do SSPnúcleos, área próxima aos núcleos APN e área entre os núcleos AEN em 2018 e 2019...65

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANOVA –	Análise de Variância
AEN –	Área entre núcleos
APN –	Área próximos núcleos
°C –	Graus Celsius
CCA –	Centro de Ciências Agrárias
Cfa -	Classificação Climática
cm -	Centímetros
CAPES –	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq –	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DAP -	Diâmetro a altura do peito
FAO –	Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura)
Gb -	Gigabytes
GEE –	Gás de Efeito Estufa
ha -	Hectare
INPE -	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC –	Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas
Km ² -	Quilômetro quadrado
LASSre -	Laboratório de Sistema Silvipastoril e Restauração Ecológica
m -	Metro
Mg –	Miligrama
SAFs -	Sistemas Agroflorestais
sp. -	Espécie
ssp. -	Espécies
SSPs -	Sistemas Silvipastoris
SSP -	Sistema Silvipastoril
SSPnúcleos -	Sistema Silvipastoril com núcleos
UFSC -	Universidade Federal de Santa Catarina
PCN –	Piquetes com núcleos
PSN -	Piquetes sem núcleos

ESTRUTURA DA TESE

Esta tese encontra-se dividida em dois estudos independentes, mas complementares, além da introdução geral, composta pela justificativa, e revisão bibliográfica. Os estudos foram realizados ao longo de quatro anos avaliando a dinâmica do carbono e nitrogênio no Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnúcleos) em relação às pastagens sem árvores no Bioma Mata Atlântica, sul do Brasil. O estudo inicial mensurou o carbono sequestrado nos núcleos arbóreos agroflorestais implantados nas pastagens sem árvores e a relação com riqueza e densidade de espécies nos núcleos. O segundo estudo avaliou o efeito do SSPnúcleos na biomassa do dossel forrageiro, no estoque de carbono e nitrogênio em locais distintos do sistema. Partiu-se da hipótese de que o SSPnúcleos não prejudicaria o carbono estocado no dossel forrageiro mesmo considerando que 10% da área pastoril foi ocupada por núcleos. Com esta estrutura de trabalho foi determinado a dinâmica do carbono a partir da implantação do SSPnúcleos em pastagens desprovidas de árvores do Bioma Mata Atlântica.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. Objetivo geral.....	18
2.2. Objetivos específicos.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1. Agricultura e sua relação com as mudanças climáticas.....	19
3.2. Pecuária e sua relação com a dinâmica do carbono e nitrogênio.....	20
3.3. Sistemas agroflorestais e sua relação com o carbono.....	21
3.4. O potencial dos sistemas silvipastoris no sequestro e estoque de carbono.....	21
4. CAPÍTULO I - A nucleação aplicada potencializando a pecuária de baixo carbono: o sistema silvipastoril com núcleos.....	23
4.1. INTRODUÇÃO.....	24
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	27
4.2.1. Área de estudo.....	27
4.2.2. Coleta de dados.....	31
4.2.3. Análise estatística.....	32
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.4. CONCLUSÃO.....	39
5. CAPÍTULO II – Massa do dossel forrageiro e estoque de carbono e nitrogênio no sistema silvipastoril com núcleos: a nucleação aplicada viabilizando a pecuária de baixo carbono.....	40
5.1. INTRODUÇÃO.....	41
5.2 MATERIAIS E MÉTODOS	45
5.2.1 Localização da área de estudo.....	45
5.2.2 Coleta de dados.....	46

5.2.3. Determinação dos teores de Carbono e Nitrogênio.....	47
5.2.4. Construção das curvas com modelos quimiométricos.....	48
5.2.5. Validação do método.....	48
5.2.6. Análises estatísticas.....	48
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.3.1. Massa do dossel forrageiro, Carbono e Nitrogênio no SSPnúcleos e nos PSA.....	50
5.3.2. Massa do dossel forrageiro, carbono e nitrogênio na APN, AEN e PSA.....	55
5.4. CONCLUSÕES.....	59
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
7. LIMITAÇÕES PARA A EXECUÇÃO DESSE TRABALHO	61
8. ESTUDOS FUTUROS.....	61
9. AGRADECIMENTOS	62
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

1. INTRODUÇÃO

O crescente comprometimento dos recursos naturais, a perda da biodiversidade e serviços ambientais, e a premente incapacidade dos ecossistemas em absorver e processar os resíduos oriundos das atividades antrópicas se constituem nos grandes problemas da atualidade. Estes impactos são impulsionados pelos mecanismos de correntes das mudanças climáticas, pelo qual os principais fatores são o aumento significativo nas temperaturas (DEVI et al., 2020). Este fato tem comprometido a resiliência dos principais ecossistemas da Terra (PICASSO et al., 2019). Aliada a esses problemas, destaca-se a crescente preocupação com o impacto das mudanças climáticas a médio e longo prazo (STEFFEN et al., 2011). Neste contexto, a agricultura está entre um dos grandes vilões, comprometendo as funções ecossistêmicas devido a perdas insubstituíveis de solo, uso intensivo de agroquímicos e combustíveis fósseis, e a expansão sobre os remanescentes florestais (TILMAN et al., 2011).

O modelo da agricultura, fomentado a partir da revolução industrial, resultou na adoção de pacotes tecnológicos para produção agropecuária. No Brasil, este fenômeno é conhecido como a modernização da agricultura brasileira nos anos 60 (MATOS e PESSOA, 2011). O Bioma Mata Atlântica, por sua vez, embora seja um dos biomas com maior número de endemismos do planeta, já estava sofrendo com a perda de seus remanescentes naturais desde o período da colonização do Brasil (VILELA e CALLEGARO, 2019).

A Mata Atlântica é considerada um dos 25 *hotspots* mundiais de biodiversidade (MYERS et al., 2000), e seus remanescentes totalizam apenas 15% da cobertura original (METZGER, 2003). Ao longo de sua extensão, a região compreendida originalmente pelo bioma, concentra quase dois terços da população brasileira, provendo serviços ambientais fundamentais para a região considerada o “centro nervoso” da economia nacional (YOUNG, 2006). Entre os principais impactos da devastação da Mata Atlântica está a expansão urbana e a conversão de áreas florestais em pastagens (VILELA e CALLEGARO, 2019).

A Região Sul, foi a região com maior produção de leite do país, boa parte a base de pasto. Com a região sudeste, estas são responsáveis por 69,3% da produção nacional. As maiores produtividades de leite do país também ocorreram na região Sul, destacando-se o Estado do Rio Grande do Sul com a maior produtividade nacional (3.034 litros/vaca/ano), seguido por Santa Catarina (2.694 litros/vaca/ano), que apresentou a maior taxa de crescimento anual dos últimos anos (IBGE, 2015). Porém, a maior parte da produção pecuária

praticada nestes estabelecimentos se faz da forma convencional, a qual trata-se de uma prática degradante a diversos ecossistemas da Mata Atlântica (VILELA e CALLEGARO, 2019).

A produção intensiva de leite a base de pasto em sistema Voisin se apresenta como um sistema agroecológico de produção animal em que o pastor controla a frequência e intensidade de pastoreio aumentando substancialmente a produção forrageira e produção animal (SCHMITT-FILHO et al., 2013). A produção de leite em sistema Voisin é considerada como uma alternativa viável para a produção de leite na agricultura familiar do estado utilizado amplamente na encosta da Serra Catarinense e Litoral (EPAGRI-CEPA, 2015). Na região sul de Santa Catarina a produção diária de leite passou de 250 mil litros para 750 mil litros nos últimos dez anos graças ao Projeto Produção de Leite à Base de Pasto, desenvolvido pela Epagri, com o apoio do Grupo de Pastoreio Voisin da Universidade Federal de Santa Catarina (EPAGRI-CEPA, 2015). No município de Santa Rosa de Lima, estima-se que cerca de 30% das propriedades agrícolas apresentam a produção leiteira como principal atividade econômica (EPAGRI-CEPA, 2018).

Os produtores de leite vêm enfrentando o problema da falta de sombra nas pastagens, o que tem se mostrado como fator de impacto sobre a produtividade e qualidade do leite (PORFÍRIO, 2003). Pinheiro Machado (2004) ressalta com mais ênfase que a vegetação arbórea é um “complemento necessário” do Pastoreio Racional Voisin – PRV, pelos benefícios que traz para os animais, para os pastos e para o solo.

Os sistemas silvipastoris consistem em uma das principais estratégias recomendadas para a recuperação da produtividade de pastagens degradadas (DIAS-FILHO, 2006). As pastagens consorciadas podem fornecer tanto sombra para o gado, fixação de nitrogênio, melhoria na ciclagem de nutrientes, redução da erosão do solo e proteção de nascentes, quanto produtos madeireiros e não madeireiros (ELIAS e SANTOS, 2016).

Estudo sobre estoque de carbono (ARYAL et al., 2019) mostrou que há variação entre pastagens sem árvores e sistemas silvipastoril indicando o potencial promissor do SSP. As leguminosas arbóreas intercaladas com gramíneas forrageiras em Sistema Silvipastoril podem aumentar o nitrogênio através da fixação biológica (ASHWORTH et al., 2015).

A introdução de árvores em área de pastagem convencional pode favorecer os serviços ambientais pela maior diversidade de espécies que irá resistir nos diferentes nichos que se formam. Mais recentemente, os sistemas silvipastoris entraram também no debate sobre o pagamento por serviços ambientais e sequestro de carbono (MORA, 2006).

A compatibilização dos interesses de manutenção da biodiversidade e serviços ambientais associados ao aumento de produtividade e conforto térmico animal consiste em grande desafio para a conservação do bioma Mata Atlântica em longo prazo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar os efeitos da implantação do Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnúcleos) na dinâmica do carbono acima do solo, entendendo assim o potencial do sistema em mitigar as emissões de gases de efeito estufa no Bioma Mata Atlântica.

2.2. Objetivos específicos

1. Quantificar a biomassa arbórea e o carbono sequestrado nos núcleos arbóreos agroflorestais do SSPnúcleos, avaliando a relação com riqueza e a densidade dos indivíduos arbóreos.

2. Avaliar a efeito do Sistema Silvipastoril com Núcleos na biomassa, estoque de carbono e nitrogênio no dossel da pastagem (cobertura de pasto).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Agricultura e sua relação com as mudanças climáticas

O desafio do setor agropecuário é aumentar a produção de alimentos, fibras e energia sem comprometer a integridade ambiental e reduzindo as emissões de gases de efeito estufa (PARRA et al., 2017).

As consequências adversas das mudanças climáticas globais, estão entre as principais preocupações ambientais reais enfrentados pelos seres humanos (KERR, 2005).

Do ponto de vista científico, as mudanças climáticas globais são causadas por importantes radioativas naturais e antropogênicas (IPCC, 2014). Os gases de efeito estufa (GEE) emitidos nos trópicos estão relacionados principalmente com o desmatamento e à intensificação agrícola, enquanto nas regiões temperadas, os GEE vêm da combustão de combustíveis fósseis nos setores de transporte e indústria. A agricultura (20%) e a mudança no uso da terra (14%) completam as emissões antropogênicas totais (IPCC, 2019).

As mudanças climáticas globais causadas pelo aumento das emissões de GEE na atmosfera por atividades tropogênicas têm influenciado diretamente no funcionamento natural e do agroecossistema (LAL, 2002). Portanto, qualquer modificação no uso ou manejo do solo pode induzir mudanças nos estoques de carbono do solo, mesmo em sistemas agrícolas nos quais o carbono é percebido em estado invariável (LAL, 2006).

O Brasil, localizado quase inteiramente na zona tropical, não é uma exceção a essa regra e, portanto, é suscetível a reduções na produção agrícola e pecuária. Além disso, a agricultura compreende o maior setor único da economia brasileira, representando 29% do Produto Interno Bruto (PIB) em 2002 e cerca de 47,5% das exportações brasileiras em 2003. Portanto, compreendendo os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre o Brasil é um ponto-chave para os tomadores de decisão governamentais, a fim de evitar comprometer a produção de alimentos e as exportações agrícolas (CERRI et al., 2007). E possui um grande território com uma variação substancial nas condições agroclimáticas (ASSUNÇÃO, 2016).

Segundo Huang et al. (2011), as áreas de produção que já são menos resilientes sofrerão mais porque as temperaturas aumentarão nas latitudes tropicais. Estudo realizado por Timmins (2006) sugere que os efeitos das mudanças climáticas no Brasil são impulsionados principalmente pelo aumento das temperaturas. Vale ressaltar que as estimativas são baseadas

em dados de painel de municípios brasileiros e levam em consideração apenas cenários de mudanças uniformes no país. Na prática, mudanças no clima podem ser heterogêneas em um país do tamanho do Brasil.

Neste sentido, Lybbert e Sumner (2012) argumentam que o desenvolvimento e a difusão de novas práticas na agricultura determinam a capacidade dos agricultores de mitigar e se adaptar as mudanças climáticas.

3.2. Pecuária e sua relação com a dinâmica do carbono e nitrogênio

O Brasil possui cerca de 214 milhões de cabeças de gado bovino, o maior rebanho comercial do mundo. Em 2015, a produção foi de 9,2 milhões de toneladas de carne (FAO, 2016). Em 2014, a produção brasileira de leite foi de 35,2 bilhões de litros (IBGE, 2015). A região Sul passou a ocupar em 2014, as primeiras posições no ranking das grandes regiões produtoras de leite, com 34,7% da produção nacional (EPAGRI-CEPA, 2015). A expansão da pecuária no Brasil sempre teve associação ao desmatamento para implantação de novas pastagens, que por sua vez são manejadas extensivamente perdendo a produtividade rapidamente e conseqüentemente demandando por novas áreas. Hoje, o manejo inadequado se

A pecuária extensiva precisa migrar para uma pecuária que gere bens (leite, carne e madeira) enquanto conserva e reabilita os agroecossistemas e serviços ecossistêmicos (MURGUEITIO, 2011). As mudanças na forma de produção pecuária precisam seguir quatro elementos básicos: (1) aumento da biomassa e a diversidade de plantas, (2) redução da degradação do solo e promoção da sua recuperação, (3) proteção das fontes de água e uso racional das mesmas e (4) aumento da produtividade animal por hectare.

A degradação das pastagens compromete a rentabilidade da produção pecuária brasileira e a recuperação é uma estratégia promissora para a intensificação sustentável da agricultura. Além de aumentar o sequestro de carbono no solo, pode potencialmente evitar o desmatamento já que potencializará a produção de biomassa, reduzindo assim a intensidade das emissões de GEE (SAKADEVAN e NGUYEN, 2017).

O Brasil apresenta regiões de clima tropical e subtropical, fator que pode ser considerado limitante na produção animal, em virtude de altas temperatura e radiação solar incidente sobre os animais (BORBUREMA et al., 2013). Uma característica importante da pecuária, principalmente na região Sul do Brasil é ter a maior parte de seu rebanho com boas características genéticas e criado a base de pasto. A produção a base de pasto quando bem manejada é conhecida por reduzir custos, minimizar impactos ambientais, melhorar a

produção e qualidade forrageira, com características nutricionais mais saudáveis (BIAVATTI et al., 2014).

Há uma crescente preocupação e estudos em práticas de manejo que proporcionem um aumento da produtividade animal e vegetal (FERRAZ e FELÍCIO, 2010). O aumento produtivo da pecuária é eminente, todavia deve ser sinérgico com processos de reabilitação dos ecossistemas, conciliando os diferentes usos do solo, incrementando a biodiversidade e aumentando a provisão de serviços ecossistêmicos (ALVES-PINTO et al., 2016).

3.3. Sistemas agroflorestais e sua relação com o carbono

Os sistemas agroflorestais (SAFs) compreendem árvores e culturas, ou árvores e pastagens dentro da mesma área. Globalmente, eles cobrem aproximadamente 1 bilhão de hectares de terra e contribuem para a subsistência de mais de 900 milhões de pessoas. Os SAFs têm a capacidade de sequestrar grandes quantidade de carbono no solo e na biomassa aérea (CARDINAEL et al., 2017).

O benefício dos SAFs em termos de regulação das mudanças climáticas é amplamente reconhecido (ALBRECHT e KANDJI, 2003), com sínteses recentes (LORENZ e LAL, 2014) e metanálises (CHATTERJEE et al., 2018; STEFANO e JACOBSON, 2018; SHI et al., 2018), reiterando seu impacto positivo no sequestro de carbono e nos orçamentos globais e nacionais de carbono (ZOMER et al., 2016).

Estudos recentes que avaliam o estoque de carbono geralmente se concentram em práticas agroflorestais, como pousios naturais ou plantadas, parques agroflorestais e pastagens naturais (MARONE et al., 2017), ou espécies específicas, como agrofloresta de café (GUILLEMOT et al., 2018) ou agrofloresta de cacau (MIDDENDORP et l., 2018). Ao avaliar os benefícios das árvores, tanto no aspecto climático quanto na produção conecta-se estoques de carbono, diversidade de espécies e práticas agroflorestais, e assim, identifica-se características comuns das propriedades que podem impulsionar o armazenamento de carbono enquanto produzindo (REPPIN et al., 2019).

3.4. O potencial dos sistemas silvipastoris no sequestro e estoque de carbono

O sistema silvipastoril é um termo que compreende diferentes arranjos agroflorestais que combinam plantas forrageiras, como gramíneas e leguminosas, com arbustos e árvores

para nutrição animal e usos complementares (MURGUEITIO et al., 2011; CALLE et al., 2013).

Esse sistema é apresentado como uma das alternativas à recuperação da diversidade funcional em agroecossistemas (ALTIERI, 1999), diminuindo os impactos ambientais negativos próprios dos cultivos tradicionais de criação de gado, por meio do favorecimento à restauração ecológica de pastagens degradadas, diversificando a produção das propriedades rurais (FURTADO e FURTADO, 2001). Os SSPs também podem influenciar positivamente na oferta de serviços ecossistêmicos a partir da escolha de práticas agrícolas diversificadas e sustentáveis com alternativa às atividades potencialmente degradantes, como a pecuária extensiva (GAITÁN et al., 2016; MURADIAN, et al., 2010).

De acordo com Calle et al. (2009), os SSPs fornecem mais serviços ecossistêmicos do que pastagens abertas. Além de promover a resiliência e a conservação dos recursos naturais, auxilia na recuperação dos agroecossistemas (ALTIERI, 2012; PACIULLO et al., 2010; SOLORIO et al., 2016). É importante considerar que os SSPs viabilizam a reabilitação das pastagens degradadas enquanto aumentam os estoques de carbono e nitrogênio nos solos tropicais (LÓPEZ-SANTIAGO et al., 2018; JUNIOR et al., 2020).

O SSP núcleo se diferencia dos demais SSPs, pois o elemento arbóreo está inserido em núcleos de 25 m², equivalentes a 10% da área total. Estes são devidamente cercados e distribuídos de forma equidistante dentro de cada piquete, projetando uma sombra que pode variar de 10 a 40% da área total, dependendo do regime de poda (SCHMITT-FILHO et al., 2013).

Os Núcleos geram multifuncionalidade a paisagem, proporcionando sombra para maximizar a produção animal (DENIZ et al. 2020), produtos agroflorestais não madeireiros (SCHMITT FILHO e FARLEY, 2020), sequestro de carbono (SILVA et al., 2020), melhoria do solo (BATTISTI et al., 2018), bem-estar animal (DENIZ et al., 2019).

4. CAPÍTULO I - A nucleação aplicada potencializando a pecuária de baixo carbono: o sistema silvipastoril com núcleos

RESUMO

Apesar das críticas contundentes, os sistemas de produção pecuária adequadamente desenhados e manejados em áreas de pastagens não naturais podem contribuir substancialmente para mitigar as mudanças climáticas, não só minimizando perdas de carbono, mas também incrementando a quantidade de carbono sequestrado. O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial do Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnúcleos) em sequestrar carbono por meio da implantação dos núcleos arbóreos em áreas de pastagens não naturais do bioma Mata Atlântica. Os Sistemas Silvipastoris têm promovido estabilidade microclimática, reabilitação dos atributos físicos e químicos do solo, incremento da biodiversidade, e restauração de paisagens rurais densamente antropizadas. Apesar do potencial dos SSPs para a melhoria dos sistemas socioecológicos, eles representam menos de 1% das áreas pastoris brasileiras. No Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnúcleos), cada hectare de pastagem é enriquecido com 40 núcleos agroflorestais de 25 m² distribuídos de forma equidistante. Nesta pesquisa foi quantificado o acúmulo de biomassa e carbono sequestrado em 49 núcleos, totalizando 437 indivíduos de 30 espécies arbóreas nativas. Também foi analisada a relação entre o acúmulo de biomassa e carbono sequestrado com riqueza e densidade de espécies arbóreas, e a presença de leguminosas nos núcleos. O acúmulo de biomassa e estoque de carbono foram de 17.804 Mg ha⁻¹ e 4.205 Mg ha⁻¹, respectivamente. A biomassa foi significativa para as variáveis riqueza e densidade de espécies nos núcleos (R^2 - 0,08 e *p-value* - 0,04). O SSPnúcleos demonstrou ser um importante sumidouro de carbono para áreas de pastagem com potencial para mitigar o impacto da pecuária convencional nas mudanças climáticas.

Palavras-chave: Sequestro de carbono, sumidouro de carbono, agroecossistemas, SSP.

4.1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas se caracterizam como um fenômeno global que afetam não somente os sistemas biofísicos, mas também os conceitos do que é aceitável no curto, médio e longo prazo no que diz respeito ao nosso *modus vivendi*, incluindo os sistemas de produção agropecuários (BUSTAMANTE, 2019).

A agricultura tem contribuído com uma parcela significativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE), 17% diretamente através de atividades agrícolas e um adicional de 7-14% através de mudanças no uso da terra (PRASAD et al., 2017). Os impactos são adversos, principalmente em eficiência técnica devido a perdas de produtividades agrícola (PEÑA-LÉVANO et al., 2019). Esse fato tem comprometido a resiliência dos agroecossistemas. Além disso, há preocupação com o impacto das mudanças climáticas no longo prazo (STEFFEN et al., 2011).

A pecuária também tem se mostrado uma atividade intrinsecamente relacionada à degradação ambiental, caracterizando a atividade como um dos vilões das mudanças climáticas (GERBER et al., 2013, (IPCC, 2014). Estima-se que a pecuária emite 7,1 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂ – eq) por ano, representando 14,5% de todas as emissões induzidas pelo homem (GLATZLE, 2014). Por outro lado, sabe-se que somente na América Latina temos 2 milhões de quilômetros quadrados de pastagens severamente degradados (BUSTAMANTE, 2019), com baixa disponibilidade de forragem, cobertura vegetal do solo reduzida e perda significativa da fertilidade do solo (GAITÁN et al., 2016; KRETZER et al., 2019). Estima-se, ainda, que as mudanças climáticas venham piorar a qualidade e a resiliência dessas pastagens, sejam nativas, naturalizadas, ou implantadas com forrageiras exóticas em ecossistemas não pastoris. Tal fato já tem aumentado a vulnerabilidade da agricultura familiar, que em muito depende da produção de leite à base de pasto, especialmente no Sul do Brasil (WICKHAM, 2010).

Assim, uma solução integrada e holística para mitigar o impacto da agricultura sobre as mudanças climáticas deve envolver políticas de uso da terra que direcionem a atividade para sistemas de produção economicamente competitivos que sinergicamente viabilizem a reabilitação e a restauração dos ecossistemas (BUSTAMANTE, 2019).

Os sistemas silvipastoris, caracterizados pela integração dos componentes arbóreos nas áreas pastoris, têm um reconhecido potencial para mitigar os impactos da pecuária no clima global e na biodiversidade (GAITÁN et al., 2016). No entanto, ainda não são

suficientes os estudos que analisam a viabilidade socioeconômica e ecológica da produção pecuária integrada com os componentes arbóreos, sejam árvores exóticas ou nativas dos respectivos Biomas. O aumento da produtividade pecuária é premente, todavia deve ser sinérgico com processos de reabilitação dos ecossistemas, conciliando os diferentes usos da terra, incrementando a biodiversidade e aumentando a provisão de serviços ecossistêmicos (COHN et al., 2014; LATAWIEC et al., 2014; ALVES-PINTO et al., 2016). Melhorias de produtividade dos ecossistemas pastoris dissociadas da sustentabilidade têm sofrido críticas incisivas que demandam inovações (BARCELLOS et al., 2008). A pecuária pode ser uma atividade sustentável e mitigadora das mudanças climáticas viabilizando a conservação do solo, da água e da biodiversidade através de pastagens polifíticas manejadas rotativamente (ALVEZ et al., 2015) com presença de árvores e arbustos nativos, em paisagens multifuncionais (CHARÁ et al., 2017; MURGUEITIO et al., 2019). Em tais sistemas de produção, a energia solar é convertida eficientemente em produtos florestais madeireiros ou não madeireiros e forragens de qualidade. Assim, os ruminantes podem se alimentar exclusivamente a base pasto, não competindo por grãos demandados pelo crescente contingente populacional humano (CHARÁ et al., 2017).

Os Sistemas Silvipastoris (SSP) se caracterizam como alternativas para viabilizar a reabilitação dos ecossistemas pastoris e simultaneamente aumentar a produtividade e competitividade econômica da atividade. São arranjos agroflorestais que combinam intencionalmente a produção animal, o componente florestal e o manejo das pastagens, seja este rotativo ou não, otimizando a produtividade através da multifuncionalidade da paisagem (MOTTET et al., 2017; BRANCALION et al., 2009).

Já no Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnúcleos), uma variante dos SSPs, pequenos núcleos agroflorestais são distribuídos na área de pastagem. Esse modelo de SSP desenhado no Laboratório de Sistemas Silvipastoris e Restauração Ecológica (LASSre/UFSC) é derivado da teoria de nucleação ou nucleação aplicada, (REIS et al., 2010), metodologia amplamente utilizada na recuperação de áreas florestais degradadas. Através dos núcleos agroflorestais sucessionais e da diversidade funcional das espécies utilizadas o SSPnúcleos viabiliza o sombreamento das pastagens exclusivamente com espécies nativas, aumento da renda com produtos florestais não-madeireiros, e sinergicamente reabilita as funções e os serviços ecossistêmicos, principalmente incrementando a biodiversidade (SIMIONI et al., 2019) (SILVA et al., 2018; DENIZ et al., 2019). Assim, através da multifuncionalidade, concretiza-se uma alternativa para a restauração das paisagens rurais densamente antropizadas do Bioma Mata Atlântica no sul do Brasil (METZGER, 2003).

A presença dos núcleos arbóreos agroflorestais em pastagens anteriormente desprovidas do componente arbóreo tem-se revelado um fator reabilitador do solo (CASALS et al., 2014; KRETZER et al., 2019), amenizador dos extremos microclimáticos, indutor de ambiência e bem-estar animal (DENIZ et al., 2019), promotor de biodiversidade (SIMIONI et al., 2019), além de amortizar os custos de implantação entre o sexto e oitavo ano, por meio da geração de renda dos produtos florestais não madeireiros (ALVEZ et al., 2015).

O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial do SSPnúcleos em sequestrar carbono a partir da implantação dos núcleos agroflorestais em áreas de pastagens não naturais do Bioma Mata Atlântica, testando a hipótese de que o SSPnúcleos pode contribuir para mitigar o impacto da pecuária convencional nas mudanças climáticas.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1. Área de estudo

O município de Santa Rosa de Lima está localizado no Sul do Estado de Santa Catarina, Brasil (28° 02' 27" Sul, 49° 07' 44" Oeste). Possui uma área de 202 km² e tem uma população de 2.095 habitantes. Está a 235 metros acima do nível do mar e inserido na zona climática Subtropical Úmida (Cfa) (IBGE, 2015). A precipitação anual é de 1.400 a 1.600 mm (ALVARES et al., 2014). O município encontra-se totalmente inserido no bioma Mata Atlântica, sendo que a vegetação original é composta pela Floresta Ombrófila Densa e alguns pontos de Floresta Ombrófila Mista (IBGE, 2015). A população é predominantemente rural e as principais atividades econômicas do município são: hortaliças, produção de leite, turismo rural, produção de madeira e suínos. As áreas das propriedades estudadas são de agricultores familiares que historicamente são produtores de leite, bem representativas da maioria dos produtores da região Sul do Brasil (EPAGRI-CEPA, 2018; ALVARES et al., 2014).

As áreas de pastagens pesquisadas apresentam dominância das gramíneas *Axonopus catharinensis* Valls e *Hemarthria altíssima* manejadas sob Sistema Voisin ou Pastoreio Racional Voisin – PRV (SCHMITT-FILHO et al., 2010), desde de 1999 (ALVEZ et al., 2015). Durante o período de inverno, a pastagem é sobressemeada com *Avena sativa*, *Lolium multifolium*, e *Trifolium repens*, como forma de compensar a baixa produção forrageira durante outono e inverno (OLIVO et al., 2010).

O SSPnúcleos se caracteriza por 40 núcleos arbóreos agroflorestais de espécies nativas distribuídos de forma equidistante em um hectare de pastagem (Figura 1). O conjunto dos 40 núcleos de 25 m² dentro de cada piquete equivalente 10% da área total (SCHMITT-FILHO et al., 2013). O SSPnúcleos foi implantado em propriedades rurais em 2012, como parte do Projeto Sinergias – atividade de pesquisa e extensão da Universidade Federal de Santa Catarina, através do Laboratório de Sistema Silvopastoril e Restauração Ecológica – LASSre/UFSC.

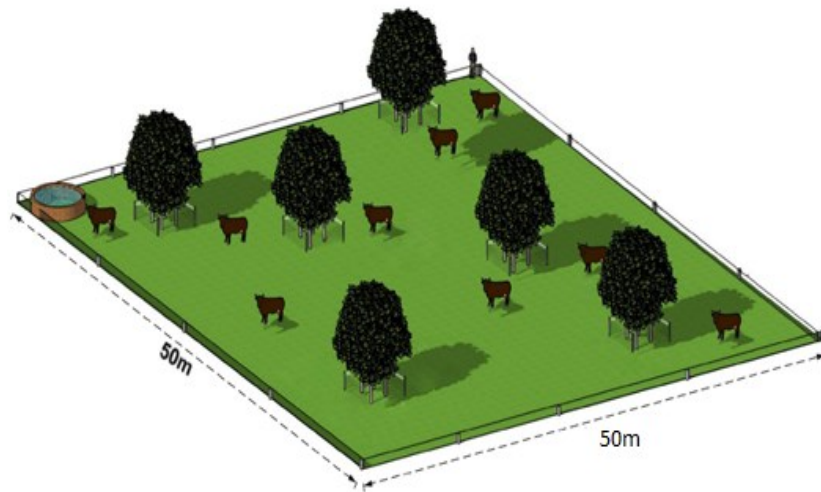


Figura 1: Representação esquemática do sistema silvipastoril com núcleos. Fonte: LASSre (2017).

Nestas propriedades rurais, os núcleos são compostos por quatro mudas de *Mimosa scabrella*, quatro mudas de espécies melíferas ou frutíferas, oito mudas de *Euterpe edulis*, além de uma espécie climácica distinta por núcleo. Entre as espécies melíferas, frutíferas e climácicas buscou-se a maior diversidade possível.



Figura 2. Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnúcleos) com 5 anos na propriedade da Sra. Rosângela Vanderlinde em Santa Rosa de Lima. Foto: LASSre (2018).

A pesquisa foi desenvolvida nas propriedades com participação dos agricultores na implementação do projeto, bem como manejo dos animais nas propriedades. Neste sentido, a pesquisa-ação fundamentada na perspectiva social, assume um valor especial na participação dos agricultores (BERTOLIN et al., 2011). Isso porque, os mesmos participam da idealização do projeto e acompanham o desenvolvimento prático no campo. Em consequência, ao viabilizarem a pesquisa em propriedades rurais, melhorar-se o reconhecimento das instituições envolvidas na pesquisa, possibilitando a popularização e aplicação imediata dos resultados na região.

Tabela 1. Lista de espécies com % de ocorrência nos núcleos estudados.

Nº	Nomes comum	Nomes científicos	Família botânica	(%)
1	Angico	<i>Albizia polycephala</i> (Benth.)	Mimosoideae	1,01%
2	Chal-chal	<i>Allophyllus edulis</i> (A.St. Hil Cambess. Et A. Juss)	Sapindaceae	0,13%
3	Angico vermelho	<i>Anadenanthera macrocarpa</i> (Benth)	Mimosoideae	3,89%
4	Peroba	<i>Aspidosperma subincanum</i> (Mart.)	Apocynaceae	0,13%
5	Gabiroba	<i>Campomanesia xanthocarpa</i> (O. Berg)	Myrtaceae	0,38%
6	Cedro	<i>Cedrela Odorata</i> L.	Meliaceae	0,13%
7	Aguaí	<i>Chrysophyllum gonocarpum</i> (Mart. & Eichler)	Sapoaceae	0,63%
8	Tucaneira	<i>Citharexylum myrianthum</i> (Cham.)	Verbenaceae	15,83
9	Pitanga	<i>Eugenia uniflora</i> L.	Mirtaceae	1,01%
10	Juçara	<i>Euterpe edulis</i> (Mart.)	Arecaceae	15,20%
11	Figueira comum	<i>Ficus</i> sp.	Moraceae	0,25%
13	Catiguá-morcego	<i>Guarea macrophylla</i> (Vahl.)	Meliaceae	0,25%
14	Nó de cachorro	<i>Heteropterys tomentosa</i> (A. Juss.)	Malpighiaceae	0,38%
15	Ingá cipó	<i>Inga edulis</i> (Mart.)	Mimosoideae	4,78%
16	Ingá feijão	<i>Inga marginata</i> (Mart.)	Fabaceae	8,42%
17	Dedaleiro	<i>Lafoensia pacari</i> (Saint-Hilaire)	Lythraceae	0,38%
18	Espinheira santa	<i>Maytenus ilicifolia</i> (Mart. ex Reissek)	Celastraceae	0,75%
19	Bracatinga	<i>Mimosa scabrella</i> (Bentham)	Mimosoideae	33,92
20	Canela preta	<i>Ocotea catharinensis</i> (Mez.)	Laureaceae	0,50%
21	Canela	<i>Ocotea odorifera</i> (Vell.)	Laureaceae	1,26%

	sassafrás			
22	Pau-jacaré	<i>Piptadenia gonoacantha</i> (Mart.)	Mimosoideae	5,78%
23	Baga de macaco	<i>Posoqueria acutifolia</i> (Mart.)	Rubiaceae	0,13%
24	Bacupari	<i>Posoqueria latifolia</i> (Rudge)	Rubiaceae	0,25%
25	Embiraçu	<i>Pseudobombax grandiflorum</i> (Cav.)	Malvaceae	0,50%
26	Araçá	<i>Psidium cattleyanum</i> (Sabine)	Mirtaceae	1,0%
27	Goiabeira	<i>Psidium guajava</i> L.	Mirtaceae	0,50%
28	Aroeira	<i>Shinus terebinthifolius</i> (Raddi)	Anacardiaceae	1,26%
29	Ipê branco	<i>Sparattosperma vernicosum</i> (Bureau & K. Schum)	Bignoniaceae	0,50%
30	Ipê amarelo	<i>Tabebuia seratifolia</i> (Vahl.)	Bignoniaceae	0,88%
	Total			100%

4.2.2. Coleta de dados

Os dados foram coletados nos meses de fevereiro e março de 2017. Os indivíduos arbóreos mensurados têm seis anos de idade e foram tomadas medidas de diâmetro à altura do peito (DAP) e de altura total (h) (HIGA et al., 2014). Para medição do diâmetro dos indivíduos arbóreos foi utilizada uma fita métrica, enquanto que para a medição da altura foi utilizada uma régua telescópica de 15 metros (LACERDA et al., 2009).

As análises dos dados para estimar a biomassa e carbono foram feitas com base nos dados de 49 núcleos arbóreos agroflorestais. Para calcular a biomassa presente em cada núcleo foi utilizada a equação proposta por (BROWN, 1997) para espécies arbóreas da floresta tropical da América do Sul, e para carbono foi utilizada a equação proposta por Miranda et al. 2011 para indivíduos arbóreos em plantios florestais e agroflorestas (Tabela 2).

Tabela 2 – Equações utilizadas para a estimativa de biomassa e carbono.

Variável	Equação
Biomassa	$\ln \text{Biomassa (kg)} = -2,134 + 2,530 \times \ln (\text{DAP})^*$
Carbono	$\ln \text{Carbono (kg)} = -3,59289 + 1,65173 \times \ln (\text{DAP}) + 1,19272 \times \ln (\text{h})^{**}$

*Brown (1997) ** Miranda et al. (2011)

4.2.3. Análise estatística

Foi utilizada a análise de permutação pelo fato dos dados não apresentarem distribuição normal de resíduos. A partir desse método, foram gerados os modelos de permutação ajustada. Os resultados foram sistematizados por meio do RStudio (RStudio, 2015), utilizando os pacotes ImPerm e ggplot2 (STEIN et al., 2014).

Para análise dos dados de biomassa e carbono foi utilizado o método *Stepwise* (STEFFEN et al., 2011). O ajuste de modelos de regressão e da escolha de variáveis preditivas foi feita de acordo com cada passo com base no teste estatístico (STEIN et al., 2014).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram amostrados 437 indivíduos arbóreos em 49 núcleos distribuídos em 14 piquetes. O DAP (diâmetro a altura do peito) variou entre 0,45 e 27 cm e a altura de 0,14 a 10,5 metros. O estoque de biomassa arbórea acima do nível do solo nos 40 núcleos do Sistema Silvipastoril foi 17.804 kg ha⁻¹. Este aporte de biomassa equivaleu a 4,205 kg de C sequestrado pelos núcleos em cada hectare de pastagens após seis anos da implantação dos núcleos do SSPnúcleos. Considerando que os 40 núcleos (25 m² cada) ocupam somente 10% da área total de pastagem de cada piquete, o volume de C sequestrado é equivalente a 0,1 hectare de núcleos agroflorestais contíguos, ou equivalente a 1 ha de pastagens com SSPnúcleos. Para efeito de análise comparativa é importante notar que esse valor equivale a 42,05 Mg de C sequestrado por hectare de núcleos contíguos. Esses resultados estão alinhados com os vários estudos publicados que enfatizam o potencial dos SSP e das agroflorestas como sumidouros do carbono atmosférico, podendo assim, mitigar os impactos da produção agropecuária convencional.

O potencial dos sistemas agroflorestais (SAFs) para sequestrar e estocar carbono tem sido estimado entre 12 e 288 Mg ha⁻¹ (ALBRECHT e KANDJI, 2003). Estudo realizado por Yazaki et al. (2016) encontraram valores de aproximadamente 26,58 Mg ano⁻¹ de carbono estocado em cada hectare de agrofloresta. Em outra pesquisa realizado por Yazaki et al. (2016) observou-se que cada hectare de agrofloresta de dois anos estocava 28,81 Mg de carbono. Na Amazônia Brasileira foi registrado um estoque do carbono de 16,27 Mg ha⁻¹ em um sistema agroflorestal com 9 anos (BRANCHER, 2010). Já nos sistemas agroflorestais com café e bandarra e com café e seringueira, o estoque total de carbono foi de 97,2 e 64,5 Mg ha⁻¹, respectivamente. Esses valores equivalem a 65,7% e 43,6%, respectivamente, do carbono contido em floresta madura. No sistema de monocultivo de café com 7 anos o carbono máximo estocado na parte aérea foi de 16,60 Mg C ha⁻¹, 11,2% da quantidade de carbono estocado em uma floresta vizinha. Para a área em pousio com capoeira natural de 5 anos, o estoque de C foi de 11,23 Mg ha⁻¹, 7,6% do montante sequestrado na floresta (UDAWATTA e SHIBU, 2011).

Em Chiapas, no México, os sistemas silvipastoris (SSPs) apresentaram uma amplitude de remoção de carbono atmosférico de 11,53 a 14,63 Mg ha⁻¹ (ARYAL et al., 2019). Nos EUA, estimaram-se cifras de carbono sequestrado por hectare em SSPs de 19,72 Mg (WICKHAM, 2010). Estudo realizado por Cardona et al. (2013) estimaram uma remoção máxima de carbono da atmosfera em SSP na ordem de 26,6 Mg C ha⁻¹ ano. Em

agrossilvicultura, no Senegal, observou-se estoques totais (solos e parte áreas) de carbono maiores quando em pousio do que nas pastagens com valores de 40 Mg C ha⁻¹ e 29 Mg C ha⁻¹, respectivamente, (MARONE et al., 2017).

No processo de implantação dos núcleos agroflorestais do sistema SSPnúcleos, a espécie que apresentou maior acúmulo de biomassa foi *Mimosa scabrella*, com 5,847 Mg C ha⁻¹, enquanto *Citharexylum myrianthum* apresentou maior estoque de carbono: 0,352 Mg C ha⁻¹ (Tabela 4). A estimativa de biomassa é importante para compreender a dinâmica do estoque de nutrientes e a contribuição do desflorestamento para a emissão de gases (BROW et al., 1995; LEE et al., 2017). A dinâmica de acúmulo do carbono permite planejar sistemas produtivos e ainda recuperar áreas degradadas (AMADO et al., 2001; MINASNY et al., 2017). Assim, os dados podem servir de referência para avaliar os ganhos ambientais, ou como parâmetros para o planejamento de sistemas de pagamento por serviços ecossistêmicos.

Como observado por CHAZDON 2008, e CASALS et al. 2014, espécies pioneiras de rápido crescimento são mais eficientes no acúmulo de carbono a curto prazo. Este fato foi observado entre as espécies presentes nos núcleos. Aproximadamente quase metade da biomassa dos indivíduos arbóreos que são pioneiras de rápido crescimento é composta por carbono (CASALS et al., 2014), logo sendo considerada sumidouros de carbono.

O modelo e a disposição das espécies no sistema podem influenciar no acúmulo de biomassa, tanto pela composição quanto pela densidade de espécies (SHIMAMOTO, 2012). A utilização apenas de espécies pioneiras poderá promover um maior acúmulo de biomassa no início da sucessão, tendendo à estabilidade a longo prazo.

A implantação do SSPnúcleos viabilizou o sequestro de quantidades significativas de carbono em áreas pastoris previamente desprovidas do componente arbóreo apresentando potencial para mitigar o impacto da agropecuária tradicional nas mudanças climáticas.

Como já demonstrado por outros autores, a implantação do sistema SSPnúcleos traz ganhos quantitativos nos atributos do solo (BATTISTI et al. 2018), estabilidade microclimática (YASIN et al., 2018; DENIZ et al., 2018), ambiência e bem-estar animal (DENIZ et al., 2020), e biodiversidade (SIMIONI et al., 2019), além de uma possível amortização dos custos de implantação em um período de seis anos por meio da produção de produtos florestais não madeireiros nos núcleos agroflorestais (SCHMITT-FILHO et al., 2013; SCHMITT FILHO e FARLEY, 2020).

Tabela 3. Espécies componentes do SSPnúcleos e sua % de ocorrência, biomassa e carbono.

	<i>Nome científico</i>	<i>Ocorrência nos núcleos (%)</i>	<i>Biomassa (kg ha⁻¹)</i>	<i>Carbono (kg ha⁻¹)</i>
1	<i>Albizia polycephala</i>	1,01%	262,64	36,97
2	<i>Allophyllus Edulis</i>	0,13%	20,78	1,49
3	<i>Anadenanthera macrocarpa</i>	3,89%	2.451,38	385,10
4	<i>Aspidosperma subincanum</i>	0,13%	10,03	0,86
5	<i>Campomanesia xanthocarpa</i>	0,38%	14,78	5,35
6	<i>Cedrela Odorata</i>	0,13%	14,82	1,86
7	<i>Chrysophyllum gonocarpum</i>	0,63%	93,22	25,61
8	<i>Citharexylum myrianthum</i>	15,83%	7.141,89	1.852,80
9	<i>Eugenia uniflora</i>	1,01%	22,75	5,65
10	<i>Euterpe edulis</i>	15,20%	4.755,37	490,57
11	<i>Ficus carica</i>	0,25%	9,00	3,18
12	<i>Guarea macrophylla</i>	0,25%	1.175,01	273,92
13	<i>Heteropterys tomentosa</i>	0,38%	22,60	11,45
14	<i>Hieronyma alchorneoides</i>	0,13%	1,03	0,23
15	<i>Inga edulis</i>	4,65%	1.592,33	223,08
16	<i>Inga marginata</i>	8,42%	627,16	203,43
17	<i>Lafoensia pacari</i>	0,38%	443,59	107,48
18	<i>Maytenus ilicifolia</i>	0,75%	72,15	11,43
19	<i>Mimosa scabrella</i>	33,92	1.325,26	307,74
20	<i>Ocotea catharinensis</i>	0,50%	48,94	5,58
21	<i>Ocotea odorifera</i>	1,26%	277,02	48,76
22	<i>Piptadenia gonoacantha</i>	5,78%	1.151,96	332,35
23	<i>Posoqueira acutifolia</i>	0,13%	0,62	0,15

24	<i>Posoqueria latifolia</i>	0,25%	8,86	3,51
25	<i>Pseudobombax grandiflorum</i>	0,50%	63,97	12,19
26	<i>Psidium cattleianum</i>	1,0%	159,93	24,31
27	<i>Psidium guajava L.</i>	0,50%	32,44	7,83
28	<i>Shinus terebinthifolius</i>	1,26%	124,14	152,66
29	<i>Sparattosperma vernicosum</i>	0,50%	61,08	8,74
30	<i>Tabebuia seratifolia</i>	0,88%	286,25	50,95
	Total	100%	153.847	35.063

Os resultados da modelagem para análise da relação do acúmulo de biomassa e carbono sequestrado com as variáveis riqueza e densidade de espécies e presença de leguminosas nos núcleos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros dos modelos de regressão para estimativa da produção de biomassa e estoque de carbono e função de presença de leguminosas, riqueza de espécies e densidade de indivíduos nos núcleos do SSPnúcleos.

<i>Modelos</i>	<i>Coefficientes</i>			<i>R²</i>	<i>valor-p</i>
	Leguminosa	Riqueza	Densidade		
Produção de Biomassa					
leguminosa+riqueza+densidade	0,92	0,18	0,18	0,06	0,10
riqueza + densidade		0,32	0,19	0,08	0,04
densidade			0,05	0,06	0,03
Estoque de Carbono					
leguminosa+riqueza+densidade	0,0345	0,24	0,78	0,02	0,02
riqueza+densidade		1,00	0,92	0,04	0,97
densidade			1,00	0,02	0,82

Para os modelos analisados para biomassa, o que apresentou melhor resultado foi o modelo com os preditores riqueza e densidade ($R^2 = 0,08$ p-value = 0,04). Para estimar o

estoque de carbono, o modelo completo (leguminosa + riqueza + densidade) apresentou o melhor desempenho ($R^2 = 0,02$, $p\text{-value} = 0,02$).

O acúmulo de biomassa está relacionado com a riqueza de espécies e densidade de indivíduos arbóreos nos núcleos (Figura 3).

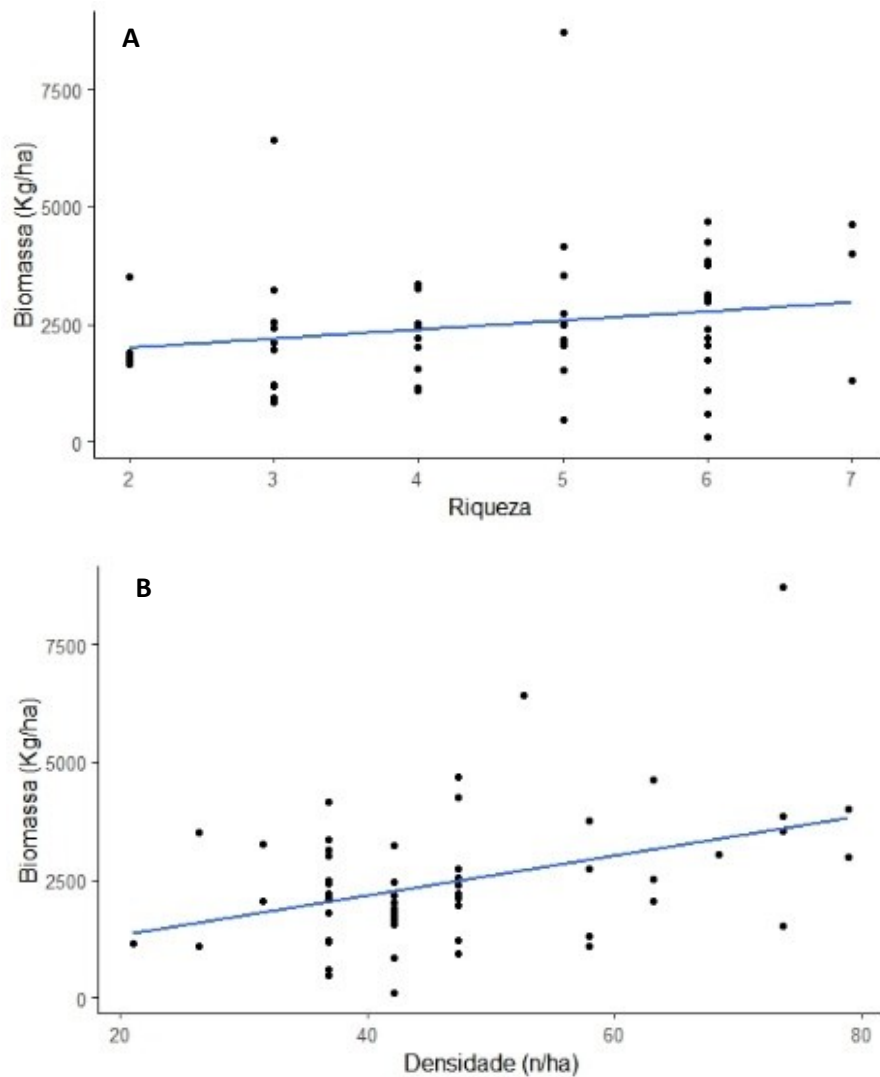


Figura 3 – Relação do acúmulo de biomassa com (A) o número de espécies (riqueza) e (B) a densidade (número de indivíduos por hectare) dos núcleos.

O índice de densidade é definido pelo número de indivíduos por unidade de área (YADAV et al., 2019). Estudos em sistemas agroflorestais e sistemas silvipastoris têm demonstrado uma relação positiva entre o acúmulo de biomassa e a idade sucessional, com as variações de altura e de DAP, número de indivíduos por hectare e composição florística (ROZENDAAL, 2015; YADAV et al., 2019).

Da mesma forma que o observado em relação à biomassa, o acúmulo de carbono está relacionado com a densidade de indivíduos arbóreos presentes nos núcleos na área de pastagem. Nesta pesquisa observou-se que maior acúmulo de carbono, 4.204 Mg C por 40 núcleos ou 1000 m² de agroflorestas, está relacionado com a densidade de indivíduos arbóreos em cada núcleo (Figura 4).

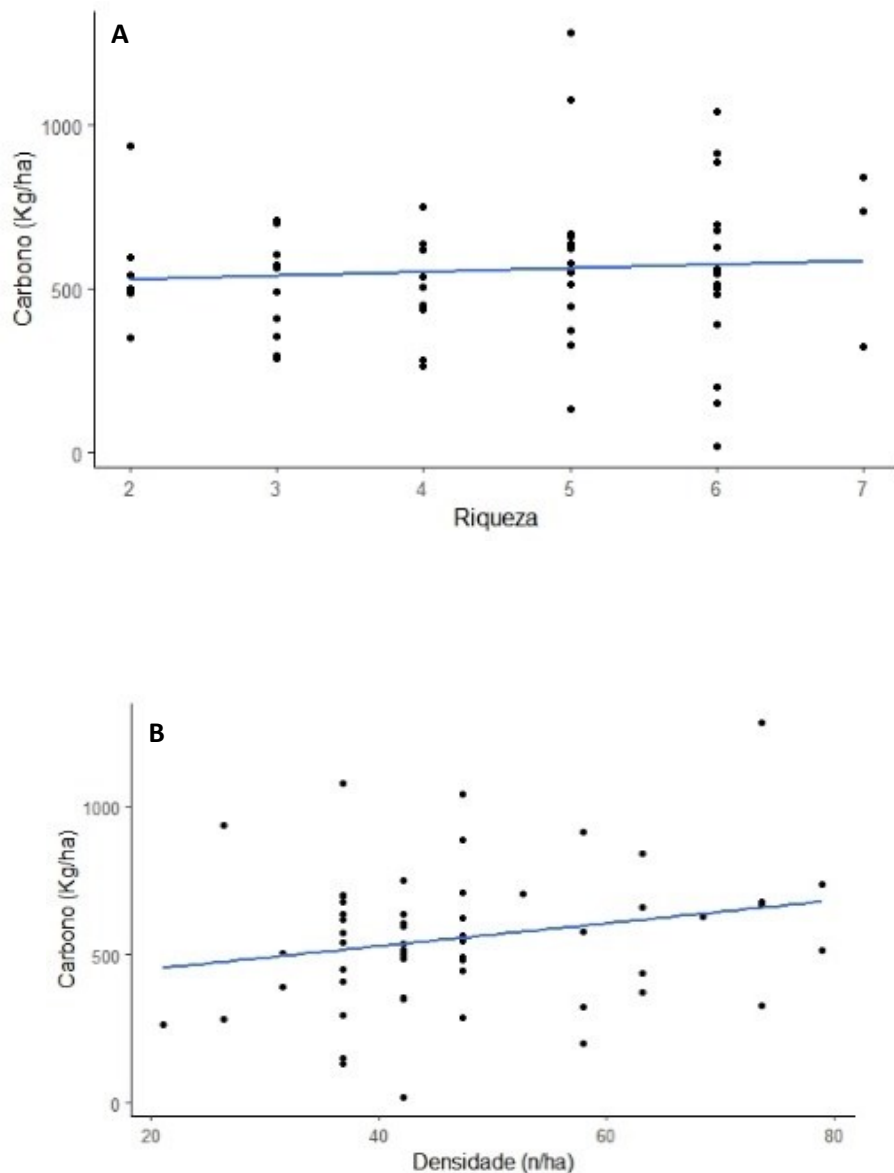


Figura 4 – Relação do acúmulo de carbono com (A) número de espécies (riqueza) e (B) densidade (número de indivíduos por hectare).

4.4 CONCLUSÃO

Foi estimado no Sistema Silvopastoril com Núcleos 17.804 kg ha⁻¹ de biomassa acumulada em um período de seis anos. Isto equivale a uma absorção de carbono atmosférico na ordem de 4,204 Mg somente nos elementos arbóreos e acima do solo. Considerando que o sistema é composto de 40 núcleos de 25 m² por hectare, a quantidade de carbono atmosférico sequestrado é equivalente a 1000 m² (0,1 ha) de núcleos agroflorestais contíguos. Assim, a extração do carbono atmosférico através da implantação dos núcleos agroflorestais no Sistema Silvopastoril com Núcleos pode ser considerada um importante sumidouro de carbono com potencial para mitigar o impacto da pecuária convencional nas mudanças climáticas.

A implantação dos núcleos agroflorestais em pastagens não naturais do Bioma Mata Atlântica viabilizou a reabilitação ecológica dos agroecossistemas e das paisagens rurais densamente antropizadas. Constitui-se ainda em um modelo de pecuária de baixo carbono com potencial para implantação através de programas de Pagamento por Serviços Ambientais. Assim, os resultados deste estudo e a natureza do SSPnúcleos indicam um significativo impacto desse na redução do passivo ambiental gerado pela produção de leite à base de pasto, especialmente se considerarmos que as pastagens são a cobertura do solo mais comum nas áreas desflorestadas do Bioma Mata Atlântica.

5. CAPÍTULO II – Massa do dossel forrageiro e estoque de carbono e nitrogênio no sistema silvipastoril com núcleos: a nucleação aplicada viabilizando a pecuária de baixo carbono

RESUMO

A agricultura tem se mostrado um dos principais emissores dos gases efeito estufa (GGE). Porém, grande parte está relacionada ao manejo inadequado do solo e das pastagens, e não a atividade *per si*. Hoje é notório que apesar do aumento de produtividade, a pecuária brasileira tem se estruturado a partir de pastagens em franco processo de degradação, o que compromete o meio ambiente e a rentabilidade. A adoção de sistemas de produção que reduzam esses efeitos é premente, pois além de promoverem a conservação dos recursos naturais e viabilizarem a reabilitação dos agroecossistemas, melhoram a competitividade econômica da atividade pecuária. Neste contexto, compreender a dinâmica entre componentes arbóreos e gramíneas é fundamental para identificação de sinergias. Os sistemas silvipastoris, reconhecidos por seu potencial em restaurar o solo, são caracterizados pelo manejo simultâneo dos animais, plantas forrageiras e árvores em uma mesma área. Nesta pesquisa foi avaliado a efeito do sistema silvipastoril com núcleos (SSPnúcleos) na massa do dossel forrageiro (cobertura de pasto), estoque de carbono e nitrogênio. Partiu-se da hipótese de que este sistema não prejudica o carbono e nitrogênio estocado no dossel forrageiro por hectare mesmo considerando que 10% da área pastoril é ocupada com núcleos arbóreos. As variáveis foram mensuradas em três situações, duas áreas dentro do SSPnúcleos, sendo área de pastagem sombreada próxima dos núcleos (T2, APN) e área de pastagem constantemente ensolarada entre os núcleos (T3, AEN), além dos piquetes pareados sem árvores (T4, PSA). A participação proporcional das variáveis das áreas APN (30%) e AEN (60%) em cada hectare de pastagem originou as variáveis relativas a área pastoril do SSPnúcleos como um todo (T1). Os resultados mostraram que o SSPnúcleos não afetou negativamente a massa do dossel forrageiro (*pasture cover*), tão pouco o estoque de carbono ($P < 0,05$) e Nitrogênio. A massa e o carbono e o nitrogênio do dossel forrageiro nas duas áreas dentro do SSPnúcleos apresentaram um padrão onde AEN era superior, PSA intermediária, e APN com valores menores que as demais ($P < 0,05$). O sombreamento SSPnúcleos não afetou negativamente a massa do dossel e o carbono e nitrogênio estocado por hectare, mesmo considerando que em 10% da pastagem foram alocados os núcleos arbóreos. Nas áreas entre os núcleos (SSPnúcleos) os valores de biomassa e estoque de carbono foram superiores a pastagem sem árvores (PSA). Considerando que o SSPnúcleos manteve a massa do dossel e o estoque de carbono por hectare do PSA, mesmo em 90% da área, e que nos outros 10% foram implantados os núcleos arbóreos agroflorestais, descortina-se no SSPnúcleos possibilidades de mitigar a emissão dos GGE da pecuária convencional brasileira.

PALAVRAS-CHAVE: Sequestro de carbono. Mata Atlântica. Reabilitação ecológica. Restauração ecológica. Agricultura familiar.

5.1. INTRODUÇÃO

Nos últimos dois séculos, o mundo testemunhou um aumento notável nas concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), como resultado de atividades humanas após a era industrial (JAT et al., 2016). Os efeitos são visíveis na vulnerabilidade ecológica, socioeconômica, como derretimento das geleiras, ondas de calor severas, incêndios florestais e mudanças nos padrões de precipitações (FOUNTAIN, 2019). E esses danos continuarão a crescer caso medidas mitigadoras não sejam tomadas (PACHAURI, 2013). Na América Latina, estima-se que 200 milhões de hectares de pastagens estão severamente degradadas com redução da cobertura vegetativa, perda de fertilidade do solo e disponibilidade reduzida de forragem (GAITÁN et al., 2016).

O setor agrícola tem contribuído para emissão total de GEE, com uma participação de aproximadamente 24% de emissões antropogênicas com uma população global crescente, isso significando que a produção agrícola permanecerá alta e as demandas alimentares deverão ser atendidas. Ao mesmo tempo, há um enorme potencial sumidouro de carbono nesse setor, incluindo o uso da terra, as mudanças no uso e no setor florestal (LENKA et al., 2015; CERRI et al., 2004).

O Brasil é um dos principais emissores mundiais de GEE, e grande parte dessas emissões originárias no país contribuem para as mudanças climáticas. Essas emissões vêm da queima ligada ao desmatamento, e não de combustíveis fósseis, que são os principais culpados na maioria dos países (AZEVEDO et al., 2018). O setor agrícola está enfrentando uma encruzilhada de questões ligadas a segurança alimentar, meios de subsistência rurais, sustentabilidade ambiental, bioenergia, adaptação e mitigação das mudanças climáticas, em um contexto de negociação importantes e difíceis para o futuro regime por meio do uso da terra, mudanças no uso da terra e atividade florestais sob o Quadro das Nações Unidas, por meio da Convenção sobre Mudanças do Clima em um acordo internacional pós-2012 (CERRI et al., 2007; IPCC, 2019).

A agricultura é um dos setores econômicos mais sensíveis aos efeitos das mudanças climáticas, pois sua produtividade depende diretamente das condições de temperatura e precipitação da área geográfica em que é realizada (TOL, 2018). Em geral, estudos mostram que as mudanças climáticas têm mais probabilidade de impactar negativamente o rendimento das culturas do que positivamente (IPCC, 2014).

No Brasil, os impactos negativos das mudanças climáticas na agricultura podem levar a perdas econômicas substanciais, uma vez que, o agronegócio é responsável por grande parte do Produto Interno Bruto (PIB), com aproximadamente 22% (CEPEA, 2017). Estimativas mostram que pode-se ter perdas de produtividade agrícola entre 19% e 40% a médio e longo prazo (Assunção, 2016). Nesse contexto, para reverter este quadro, destaca-se a diversificação de culturas como uma das principais práticas de adaptação (ASFAW et al., 2018) e promotora de sistemas agrícolas sustentáveis (NGUYEN 2017). As práticas agroflorestais sustentáveis, podem ajudar a alcançar ações de mitigação e adaptações bem-sucedidas (MBOW et al., 2014; BATTISTI et al., 2018).

As pastagens correspondem uma parte vital dos ecossistemas do mundo e ocupam mais de 1/4 da área terrestre (LOVELAND et al., 2010). A atividade pecuária no Brasil representa 7% do PIB, sendo a maior parte desenvolvida a base de pasto (IBGE, 2012). Uma parte significativa da economia nacional depende diretamente das condições ambientais e do manejo adequado dos agroecossistemas (OLIVEIRA et al., 2016). As pastagens correspondem a 172 milhões de hectares, dos quais cerca de 50% estão em processo de degradação e 25% seria moderadamente degradado (DIAS-FILHO, 2014; CARVALHO et al., 2017). Todavia, 70% das áreas de pastagens apresentam estágios avançadas de degradação que, somada à instabilidade climática, comprometem o desenvolvimento forrageiro e a produção animal (PACHECO et al., 2016).

A degradação de pastagens é um processo evolutivo de perda de vigor, de produtividade e capacidade de recuperação natural das pastagens para sustentar os níveis de produção e qualidade exigida pelos animais. Este processo também tem impacto na capacidade do sistema de produção em superar os efeitos nocivos de pragas, doenças e invasoras, que culminam na degradação avançada dos recursos naturais, em razão de manejos inadequados. Com o avanço do processo de degradação, verifica-se perda de cobertura vegetal e redução no teor de matéria orgânica do solo, com resultante aumento de emissão de CO₂ para atmosfera (MAPA, 2012).

O setor pecuário requer uma quantidade significativa de recursos naturais e é responsável por cerca de 14,5% do total das emissões antrópicas de gases de efeito estufa, e em 2005 gerou em torno de 7,1 Gigatoneladas equivalentes de dióxido de carbono (GERBER et al., 2013). Estratégias de mitigação destinadas a reduzir as emissões desse setor são necessárias para limitar a carga ambiental da produção de alimentos, garantindo alimentos para uma crescente população mundial.

A degradação das pastagens compromete a rentabilidade da produção pecuária brasileira e a recuperação de pastagens é uma estratégia promissora para intensificação sustentável da agricultura. A recuperação aumenta o sequestro de carbono do solo e pode potencialmente evitar o desmatamento, reduzindo assim, a intensidade das emissões (OLIVEIRA et al., 2017). A adoção de práticas que reduzem esses efeitos é necessária, pois, além de promover a resiliência e a conservação dos recursos naturais, auxilia na recuperação dos agroecossistemas (ALTIERI, 2012). Dentre essas práticas, destacam-se o Pastoreio Racional Voisin – PRV (PINHEIRO-MACHADO, 2010). Este sistema atrelado com o Sistema Silvipastoril (SSPs), além de restaurar pastagens degradadas, buscam efeitos sinérgicos entre os componentes do agroecossistema, abrangendo a adequação ambiental e a viabilidade econômica (SÁVIO et al., 2010; SOLORIO et al., 2016). Os SSPs são caracterizados pelo manejo simultâneo dos animais, plantas forrageiras e árvores em uma mesma área (PERI et al., 2016, SARABIA et al., 2020). É também considerado um método sustentável de restaurar pastagens degradadas e aumenta os estoques de carbono e nitrogênio em solos tropicais (JUNIOR et al., 2020; LÓPEZ-SANTIAGO et al., 2018).

Quando comparada com práticas convencionais de monocultivo de gramíneas, sistemas de silvicultura de pastagem bem manejada, com altas densidades de árvores, têm maior potencial para produção de forragem de qualidade e mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono (FANG & PENG, 2001; VARSHA et al., 2019). O aumento da cobertura de árvores em pastagens degradadas e com baixa densidade de árvores pode contribuir não apenas para aprimorar o sequestro de carbono, mas, também, para restaurar áreas de pastagens degradadas nas paisagens rurais (CÁRDENAS et al., 2019).

O interesse de investigar o SSP, deriva do potencial das práticas agroflorestais em produzir ativos para os agricultores, combinado com oportunidades para mitigação das mudanças climáticas e potencial para promover uma produção sustentável que aprimora a diversidade e a resiliência do agroecossistema (MBOW et al., 2014).

Os benefícios ambientais do sistema silvipastoril em comparação com os sistemas de pastagens aberta são múltiplos e variam desde o armazenamento aprimorado de carbono até a biodiversidade enriquecida (UDAWATTA e JOSÉ, 2019).

O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos do Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnúcleos) na massa do dossel forrageiro (cobertura de pasto), e no estoque de carbono e nitrogênio quando implantado nas pastagens sem árvores (PSA) típicas do Bioma Mata Atlântica no Sul do Brasil. Assim foi testada a hipótese de que o SSPnúcleos não impactaria negativamente a massa do dossel, o estoque de carbono e nitrogênio por hectare independente

da área ocupada pelos núcleos. Também foi testada a hipótese de que a presença dos núcleos com leguminosas causaria um aumento da biomassa e carbono e nitrogênio estocado nas áreas entre os núcleos (AEN) do SSPnúcleos, mas não na área próxima aos núcleos (APN) devido à presença frequente dos animais (CRAESMEYER et al., 2016; DENIZ et al., 2019).

5.2 MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1 Localização da área de estudo

A área estudada é uma propriedade da agricultura familiar produtora de leite localizada no município de Santa Rosa de Lima em Santa Catarina, Sul do Brasil (28° 02' 27" Sul, 49° 07' 44" Oeste). Está inserido na zona climática Subtropical Úmida (Cfa) (IBGE, 2014) com precipitação anual de 1.400 a 1.600 mm (ALVARES et al., 2014). O município encontra-se inserido no bioma Mata Atlântica, sendo que, a vegetação original é composta pela Floresta Ombrófila Densa e alguns pontos de Floresta Ombrófila Mista (IBGE, 2016).

A área de pastagem pesquisada apresenta dominância das gramíneas *Axonopus catharinensis* Valls e *Hemarthria altissima* manejada sob Sistema Voisin desde 1999. Durante o período de inverno, a pastagem é sobressemeada com *Avena sativa*, *Lolium multifolium*, e *Trifolium repens*,

O Sistema Silvipastoril com Núcleos foi implantado em 2012 e o experimento conduzido durante as quatro estações de 2018 e 2019. Foram utilizados oito piquetes com área variando entre 1.550 e 2000 m², todos com a mesma inclinação (aproximadamente 12 a 15%) e submetidos ao mesmo manejo, seja dos animais ou pastagem, durante todo o período experimental. Quatro dos oito piquetes experimentais possuíam os SSPnúcleos e eram pareados com outros quatro com PSA. Os quatro piquetes do SSPnúcleos tinham 33 núcleos arbóreos agroflorestais de 25 m² (5 m x 5 m) protegidos com cerca eletrificada para impedir o acesso dos animais. Estes núcleos agroflorestais eram dispostos de forma equidistante totalizando 10% da área pastoril de cada piquete (SCHMITT FILHO et al., 2013; 2017; 2018; BATTISTI et al., 2018; SCHMITT FILHO e FARLEY, 2020). Os pontos de coleta do SSPnúcleos foram replicados nas áreas equivalentes da PSA como representado na Figura 5.

A massa do dossel forrageiro em um determinado momento, também denominada *pasture cover* (BRYANT 1990; MURPHY 2003, MATA et al., 2007), e o estoque de carbono e nitrogênio no dossel foram avaliados comparativamente nos quatro piquetes do SSPnúcleos e quatro piquetes da PSA. A avaliação do SSPnúcleos foi subdividida em duas áreas, área sombreada próxima dos núcleos (APN) e área constantemente ensolarada entre os núcleos (AEN). A APN compreendia a área média radial de 2,5 m a partir das cercas no entorno dos núcleos, totalizando 3.000 m² por hectare (30%). A AEN era a pastagem constantemente ensolarada entre os núcleos do SSPnúcleos. Esta área totalizou 6000 m² por hectare de

SSPnúcleos ($\sim 60\%$). Os 10% remanescentes de cada hectare de pastagem é a soma das áreas internas (25 m^2) dos 40 núcleos arbóreos devidamente cercados.

As avaliações das variáveis biomassa do dossel, estoque de carbono e nitrogênio foram divididas em quatro tratamentos. Duas destas áreas estavam localizadas dentro do SSPnúcleos, área de pastagem sombreada próxima dos núcleos (T2, APN), e área de pastagem constantemente ensolarada entre os núcleos (T3, AEN). A terceira área compreendia os piquetes sem árvores (T4, PSA). A participação proporcional das variáveis das áreas APN (30%) e AEN (60%) de cada piquete geraram as variáveis referentes à área pastoril total do SSPnúcleos ($T1, \text{SSPnúcleos} = \text{APN} \cdot 0,3 + \text{AEN} \cdot 0,6$).

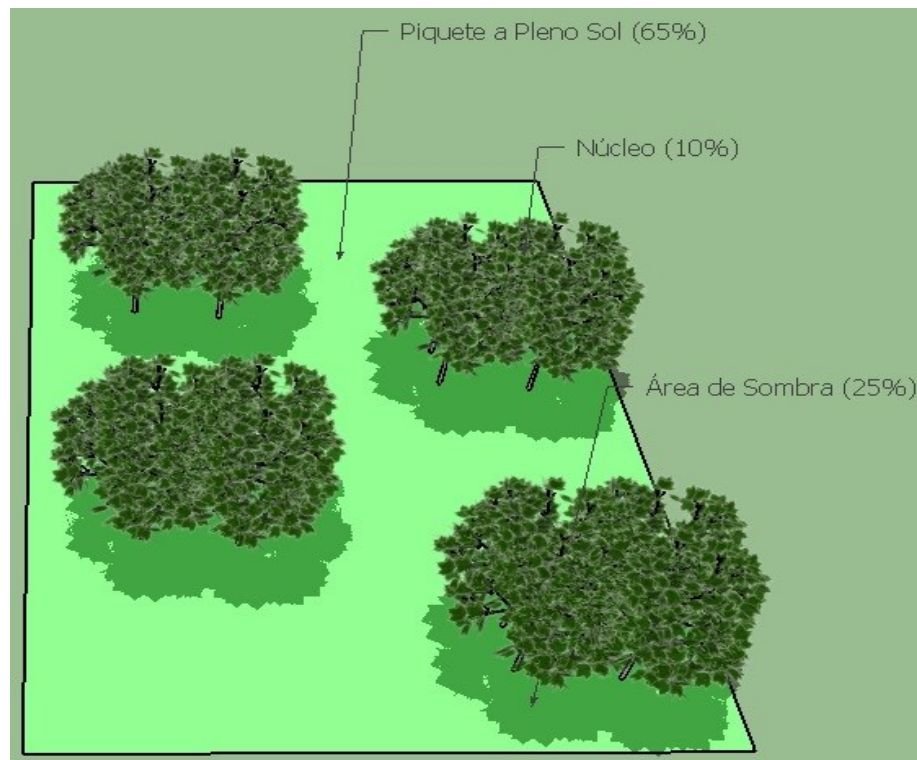


Figura 5: Representação esquemática da divisão dos tratamentos. Sistema Silvipastoril com Núcleos SSPnúcleos, área perto dos núcleos (APN, 25%), área entre os núcleos (AEN, 65%), núcleos arbóreos agroflorestais (N, 10%), e pastagem sem árvores (PSA) com pontos de coleta fictícios. Ilustração: Deniz et al. (2019).

5.2.2 Coleta de dados

Para a determinação da biomassa do dossel (cobertura de pasto ou *pasture cover*) em um dado momento (BRYANT, 1990; MURPHY, 2003; MATA, 2007) foi utilizado a metodologia de dupla amostragem (WILM et al., 1944), sendo realizadas 25 amostras visuais

(cinco pontos de coleta por núcleos distribuídos equidistantes do núcleo em cinco núcleos por piquetes) em cada piquete por tratamento (APN, AEN e PSA). Das amostras visuais, foram coletadas 15 amostras físicas por tratamento em cada um dos quatro piquetes por tratamento, 3 pontos de coleta por núcleo em cinco núcleos por piquete.

As amostras e as estimativas visuais foram feitas com auxílio de um quadrado de área conhecida (25 x 25 cm) posicionado sobre o ponto de coleta. Para as amostras físicas, a massa verde contida no quadrado foi cortada a 5 cm do solo, pesada, e posteriormente seca em estufa com ventilação de ar forçado a 65 °C por 72 horas. Após secas as amostras foram pesadas novamente para determinar a massa seca total (MS total) e, posteriormente foram moídas em moinho (1mm) de faca modelo Wiley (Thomas Scientific, Swdesboro, NJ).

A altura do dossel forrageiro (cm) foi mensurada utilizando uma régua de metal graduada (60 cm). As aferições foram feitas nos mesmos pontos das amostras visuais, exatamente no centro da área demarcada, totalizando 25 amostras em cada piquete por tratamento. Com avaliação da altura foi possível determinar a altura total do dossel da pastagem em um dado momento para todos os tratamentos.

5.2.3. Determinação dos teores de Carbono e Nitrogênio

Para esta etapa, procedeu-se de duas formas: uma parte das amostras foram avaliadas em CHNS e outra parte em espectroscopia de infravermelho próximo (NIR).

Para a quantificação dos teores de C e N da pastagem sob os diferentes tratamentos utilizou-se amostras compostas. A cada cinco pontos de coleta foi feito uma amostra composta por tratamento, área próximo núcleo (APN), área entre núcleo (AEN) e pastagem sem árvores (PSA), em cada núcleo (unidade amostral). Para análises em CHNS foram utilizadas 240 amostras referente ao ano de 2018, e para análises no NIR foram utilizadas 240 amostras referente ao ano 2019.

Para mensurar C e N foram construídas curvas de calibração e validação por espectroscopia de infravermelho próximo (NIR). Do total de 480 amostras a serem analisadas, 240 amostras coletadas em 2018, foram submetidas a determinação de C e N pelo método de referência de combustão a seco via analisador elementar a 900 °C (CHNS – 600 Carlo Erba EA – 1110, Itália), no Centro de Energia Nuclear e Agricultura (CENA), a Universidade de São Paulo (USP), em Piracicaba, SP (SKJEMSTAD et al., 2008). As 240 amostras referentes ao ano de 2019 foram analisadas por meio de espectroscopia de infravermelho próximo – NIR, e mais 16 amostras para validação dos dados obtidos através das análises.

5.2.4. Construção das curvas com modelos quimiométricos

Das amostras de pastagem analisadas pelo método de referência foram obtidos os espectros de reflectância difusa na região do infravermelho em um espectrômetro modelo FT-NIR MPA Bruker (Alemanha), em triplicata na região espectral de 3600 a 12500 cm^{-1} , com 64 varreduras para cada amostra sólida e resolução de 16 cm^{-1} . Em seguida, a cada espectro coletado foram adicionados seus valores de referência correspondentes de C e N.

Para a importação, pré-tratamento dos dados e construção dos modelos quimiométricos (curvas de calibração e validação) foi utilizado o *software* Opus Lab Bruker[®] (v.7.5). As calibrações foram realizadas a partir dos espectros originais. Foi utilizado o modelo de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) para se estabelecer uma relação matemática quantitativa entre os dados obtidos pelo método de referência e os obtidos pelo NIR.

Para avaliar a precisão da curva, foi calculado o coeficiente de correlação (r) e o erro padrão de calibração (RMSECV) entre os dados obtidos pelo método de referência (CHNS) e pelo NIR. As amostras classificadas como *outliers* no gráfico foram detectadas e excluídas dos modelos. Os espectros foram pré-processados empregando os métodos de 1ª derivada Savitzky-Golay para a curva de nitrogênio e para a curva de carbono.

5.2.5. Validação do método

Para validação da curva de calibração foram utilizadas 15 amostras analisadas pelo método de combustão a seco (CHNS) para determinação da porcentagem do teor de carbono e nitrogênio. Os espectros foram obtidos em triplicatas na região espectral de 3600 a 12500 cm^{-1} , com 64 varreduras para cada amostra sólida e resolução de 16 cm^{-1} .

Após a validação, a curva de calibração foi utilizada para determinar os teores de carbono e nitrogênio das amostras coletadas em 2019.

5.2.6. Análises estatísticas

Os resultados obtidos para massa do dossel (MS), carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) foram analisados quanto a normalidade por meio do teste Shapiro Wilk. Posteriormente, os resultados foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F. Foi utilizado o esquema de parcelas subdivididas, avaliando-se os fatores

tratamento (APN, PSA e AEN) e época de coleta (2018 e 2019). Quando a interação entre tratamentos e época foi significativa, procedeu-se o desdobramento da interação. Os valores médios foram comparados entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o software Sisvar 5.6.

As análises estatísticas foram executadas em duas etapas. Primeiramente, a avaliação comparativa das variáveis biofísicas entre piquetes com núcleos arbóreos (T1, SSPnúcleos) e piquetes desprovidos do componente arbóreo (T4, PSA). As variáveis massa do dossel ou cobertura de pasto (*pasture cover*), carbono e nitrogênio estocado para PSA foram determinadas a partir das coletas nos piquetes sem árvores. Para o tratamento SSPnúcleos as variáveis foram geradas a partir da equação $T1/SSPnúcleos = T2/APN*0,3 + T3/AEN*0,6$. Esta equação é uma função da participação proporcional das áreas APN (30%) e AEN (60%) em cada hectare de pastagem do SSPnúcleos. A área ocupada pelos núcleos soma 10% de cada hectare.

Posteriormente, foram comparadas as respectivas variáveis biofísicas das duas áreas dentro do SSPnúcleos, área perto dos núcleos (T2, APN), e área entre núcleos (T3, AEN), com a área de pastagem sem árvores (T4, PSA).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1. Massa do dossel forrageiro, Carbono e Nitrogênio no SSPnúcleos e nos PSA

Em relação a análise de variância, verifica-se que o SSPnúcleos não interferiu na massa do dossel, assim como nos teores de C, N e relação C/N da MS, com médias iguais para ambos os tratamentos. Quando se avaliou a época de coleta e a interação entre tratamento e época de coleta, verificou-se influência desses parâmetros na massa do dossel e teores de C e N da MS pelo teste F ($p < 0,05$) (Tabela 1).

Tabela 5. Análise de variância para massa do dossel (MS), carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) no SSPnúcleos e na pastagem sem árvores (PSA).

Variáveis	Fontes de variação			CV%
	Tratamento (A) SSPnúcleos x PSA	Ano (B) 2018 x 2019	Interação (A x B)	
MS	0,53 ^{NS}	8,82 ^{**}	3,13 [*]	27,21
C	0,09 ^{NS}	10,28 ^{**}	4,16 [*]	27,32
N	0,51 ^{NS}	9,58 ^{**}	3,20 [*]	28,87
C/N	0,10 ^{NS}	0,04 ^{NS}	0,26 ^{NS}	15,26

^{NS} Não significativo. * e **Significativo a 5 e 1% de probabilidade pelo teste F, respectivamente CV= Coeficiente de variação.

Também observou-se que os coeficientes de variação (CV%) foram considerados adequados para as variáveis analisadas (massa do dossel, C, N e C/N), indicando, desta forma, uma boa precisão experimental (GOMES, 2000).

Os valores médios da massa do dossel forrageiro foram semelhantes, sendo observado para SSPnúcleos valores de 3573,30 kg MS ha⁻¹ em 2018 e 3714,06 kg MS ha⁻¹ em 2019. Para PSA observou-se valores de 3256,76 kg MS ha⁻¹ em 2018 e 3737,80 kg MS ha⁻¹ em 2019 (Tabela 6). Em 2018, a massa do dossel forrageiro foi 317 kg MS ha⁻¹ superior para o SSPnúcleos em relação ao PSA, sendo uma diferença importante para a competitividade da produção a base de pasto em SSPnúcleos.

Tabela 6. Médias das variáveis (MS), carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono nitrogênio (C/N) para os dois tratamentos: (1) Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnúcleos) e pastagem sem árvores (PSA) em 2018 e 2019.

Ano	Tratamento	
	SSPnúcleos	PSA
	MS/kg/ha	
2018	3573,30 Aa	3256,76 Bb
2019	3714,06 Aa	3737,80 Aa
	C/kg/ha	
2018	1508,21 Aa	1379,88 Bb
2019	1567,15 Aa	1613,53 Aa
	N/Kg/ha	
2018	90,40 Aa	81,88 Bb
2019	94,53 Aa	95,90 Aa
	C/N	
2018	16,76 Aa	16,75 Aa
2019	16,05 Aa	16,98 Aa

Médias seguidas de letras iguais, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

A diferença entre as áreas SSPnúcleos e PSA para os tratamentos MS, C, N e C/N foram maiores para ano de 2019 devido maior índice pluviométrico. O SSPnúcleos não difere entre ano, e favorece a produção de biomassa C e N devido aos maiores benefícios, variação climática, microclima e o bosteio animal que melhora química do solo.

A amenização do microclima das pastagens a partir da implantação do SSPnúcleos citadas por Deniz et al. (2019), a melhorias dos atributos químicos do solo citadas por Battisti et al., (2018), e o incremento de biodiversidade citado por Simioni et al., (2019) podem explicar os valores iguais da massa do dossel por hectare (kg MS ha^{-1}) mesmo considerando a diminuição de 10% da área útil de pastagem ocupada pelos núcleos, e o sombreamento de 20 e 30% da área pastoril partir do limite externo dos núcleos.

Ao avaliarem três diferentes tipos de intensidade de sombreamento (30, 50 e 80% de radiação solar), Ehret et al. (2015) observaram que a produção anual total de forragem foi maior em pastagens não sombreadas no segundo e no terceiro ano após o estabelecimento das mesmas.

Em outro estudo realizado em sistema silvipastoril na Florida, as pastagens sem árvores produziram 22% e 36% a mais de matéria de seca (MS) em comparação com o SSP com linha dupla e desbastes de bosques, respectivamente. Porém, as forragens no sistema silvipastoril tiveram maior teor proteico do que as pastagens sem sombra (BAMBO et al., 2009) fato também observado neste estudo no ano de 2018. A participação das forrageiras nativas caiu com maior densidade de espécies arbóreas e aumento do período de sombreamento nos piquetes (AINALIS e TSIIOUVARAS, 1998).

Estudo feito em arranjos silvipastoris com *Leucaena leucocephala* de 9 a 14 meses de idade e *Panicum maximum* cv. Guiné comparado com a monocultura de *Bothriochloa pertusa* na Colômbia retrataram vantagens do sistema silvipastoril. A produção de matéria seca de *Panicum maximum* cv. Guiné em arranjos mais complexos, densos e sombreados foi superior a monocultura de *Bothriochloa pertusa* (FERNÁNDEZ, 2013).

Em um estudo realizado por Costa et al. (2016) em Pernambuco com os seguintes tratamentos: (i) capim-sinal/sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth.), (ii) capim-sinal/glicírcia [*Gliricidia sepium* (Jacq). Kunth ex. Walp.] e (iii) monocultura de capim-sinal. Os autores observaram que a massa do dossel de capim-braquiária na monocultura foi 1934 kg MS ha⁻¹ e no sistema silvipastoril foi de 2237 kg MS ha⁻¹.

Segundo Gomes et al., (2016) a produção forrageira pode ser afetada pelo dossel sombreado dos sistemas silvipastoris ao longo do ano, especialmente em climas subtropicais e temperados. Isso pode afetar as características das plantas forrageiras fazendo com que as pastagens sombreadas não sustentem a produtividades em níveis equivalentes às das pastagens sem sombra. Todavia, estudos realizados por Pang, et al. (2017) testando o efeito da sombra moderada (45% da luz solar) e densa (20% da luz solar) sobre a produção de forrageira, concluíram que a maioria das gramíneas e leguminosas forrageiras podem ter um desempenho igualmente bom na agrossilvicultura e em pastagens sem árvores, desde que a competição de raízes seja mínima.

Em sistemas silvipastoris, o sombreamento tem reduzido o estresse térmico melhorando o desempenho e a produtividade dos animais em pastejo mesmo quando a oferta de pastagem é inferior (PERI, et al., 2007; DOMICIANO et al., 2018; DENIZ et al., 2019).

Assim como observado para a massa do dossel, os teores de C e N não apresentaram diferenças entre o SSPnúcleos e PSA. Entretanto, quando avaliado os teores de carbono para cada ano observa-se que no SSPnúcleos houve maior estoque de C $1508,21 \text{ kg C ha}^{-1}$, em relação a PSA $1379,88 \text{ kg C ha}^{-1}$ durante o ano de 2018. A diferença de 129 kg C ha^{-1} para o SSPnúcleos favorece as qualidades do sistema em relação ao sequestro de carbono e mitigação das mudanças climáticas quando implantado em grandes áreas (Tabela 2).

Estudo realizado por Chaturvedi et al. (2016) na Índia para estimar os teores de carbono armazenado acima do solo nos SSP observaram valores de carbono entre $0,29$ a $15,21 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ano. Já no perfil do solo foram observados valores entre $0,0$ a $0,30 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ano, evidenciando que, o armazenamento de carbono nos sistemas arbóreos pode apresentar distinções entre os componentes e sistemas.

Atehortúa et al. (2019), ao realizarem um experimento na Colômbia, com Kikuyu, planta com alto potencial de integração de carbono, observou que as raízes, a 20 cm de profundidade, as hastes mortas e as folhas foram os compartimentos com os maiores estoques de carbono em sistemas silvipastoris, $4,52$, $3,58$ e $1,9 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente. Segundo os mesmos autores, a biomassa total de raízes finas e grossas, desempenha um papel relevante na redução de GGE, na conservação de solos tropicais, na ciclagem de nutrientes, e conseqüentemente na massa do dossel e carbono. Segundo Jose e Dollinger (2019), as estimativas dos estoques de carbono da forragem e das árvores de vários sistemas silvipastoris são de grande relevância para a idealização de alternativas de pecuária de baixo carbono.

As florestas manejadas armazenam anualmente uma média de $0,33 \text{ Mg C ha}^{-1}$, as agroflorestas tradicionais, uma média de $0,14 \text{ Mg C ha}^{-1}$ incluindo todos os estoques de C com base em vegetação e C no solo a 40 cm profundidade (KIRBY e POTVIN, 2007). Na Patagônia, o carbono total armazenado no sistema silvipastoril mostrou um valor intermediário de $0,15 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}$ (Peri et al., 2018). Acredita-se que os sistemas agroflorestais tenham maior potencial para sequestrar C do que pastagens ou campos naturais (KIRBY e POTVIN, 2007).

O armazenamento de C nos SSPs é uma importante estratégia de mitigação no contexto do rápido aumento do nível de CO_2 na atmosfera, e seu potencial efeito nas mudanças climáticas globais (PERI et al., 2018). Os dados da síntese de Conant et al. (2017) confirmam que o aprimoramento das práticas de manejo de pastagens e a conservação das mesmas melhoram os estoques de carbono na área de pastagens. O manejo das pastagens pode afetar significativamente o estoque de C do solo e da biomassa forrageira. Quanto mais eficiente o manejo níveis mais altos de C serão estocados (CHEN et al., 2015).

Para os teores de N na biomassa forrageira, os valores foram similares, sendo 90,40 kg N ha⁻¹ para SSPnúcleos e 81,88 kg N ha⁻¹ para PSA para o ano de 2018. Já para 2019 foram 94,53 kg N ha⁻¹ para SSPnúcleos e 95,90 kg N ha⁻¹ para PSA respectivamente (Tabela 6). O SSPnúcleos apresentou 8,52 kg N ha⁻¹ superior a PSA para ano 2018, sendo uma diferença importante para a massa dossel e carbono estocado.

Grande parte das leguminosas, sejam árvores, arbustos ou ervas melhoram o acúmulo de material orgânico rico em N no solo devido a sua capacidade de fixar grandes quantidades de nitrogênio atmosférico. A leguminosa forrageira *Leucaena leucephala* fixa até 550 kg N ha⁻¹ (MUNROE e ISAAC, 2014). Peri et al. (2018) em trabalho desenvolvido na Patagônia Argentina, observou valores médios para N de 6,9 kg N ha⁻¹ em SSPs. Também foi notado que maior concentração de C e N estava sob as copas das árvores representando 50-57% de C e N armazenados, devido intensificação da ciclagem de nutrientes, maior entrada de resíduos e atividade microbiana.

Nos sistemas silvipastoris, a altura do dossel e a existência de ambientes sombreados e parcialmente sombreados podem alterar o desenvolvimento das pastagens e a produção de matéria seca (GLAUCO et al., 2019). O consórcio de leguminosas arbóreas com gramíneas forrageiras em sistema silvipastoril, em geral tem aumentado o nitrogênio devido a simbiose entre rizóbiums e leguminosas. Este fato pode melhorar a qualidade da pastagem do sub-bosque e entorno das árvores aumentando o teor de N na massa do dossel e no solo (BARROS et al., 2018).

A relação entre o teor de carbono e nitrogênio (C/N) é um indicador importante da mineralização da matéria orgânica do solo, dando informação sobre o estado de humificação. Na decomposição da matéria orgânica do solo a relação C/N é importante para a determinação da decomposição entre nutrientes essenciais para a atividade dos microrganismos do solo (LUCHESE et al., 2002).

Na avaliação da relação C/N no SSPnúcleos e PSA não apresentaram diferenças entre os tratamentos e tão pouco entre os anos. A relação C/N para SSPnúcleos em 2018 foi de 16,76 e para PSA 16,75. Em 2019 a relação C/N em SSPnúcleos foi de 16,05 e para PSA 16,98. A incerteza quanto ao sequestro de C e N e sua dinâmica nos diferentes sistemas pecuários dificulta a compreensão precisa dos ciclos destes nutrientes e sua relação com a emissão dos gases de efeito estufa (ZHANG et al., 2020).

A relação C/N é bastante significativa ao se enfatizar a sustentabilidade a longo prazo do sequestro de C e N nos ecossistemas terrestres (LI et al., 2012; LUO et al., 2004). A

disponibilidade de N controla o sequestro de C nos solos florestados e forragem (LIANG et al., 2014), e até em solos agrícolas abandonados (KNOPS e TILMAN, 2000).

Estudo realizado na província de Shaanxi na China em áreas agrícolas abandonadas mostrou que a relação C/N variou entre 7 a 12. Esta relação aumenta com a idade da cobertura florestal do solo. Os resultados destacam a necessidade de levar em consideração a relação do C/N após a mudança no uso da terra para melhor entender os ciclos biogeoquímicos e os feedbacks subsequentes de acordo com o manejo do solo (ZHANG et al., 2020).

O entendimento das mudanças sazonais ou até entre anos na massa do dossel, na produção e sequestro de diferentes elementos é de fundamental importância para ao manejo pastagem e o impacto deste manejo no meio ambiente (OMER et al., 2006). Pastagens em áreas temperadas também apresentam alterações na quantidade e qualidade da forragem produzida, mudanças relacionadas ao estágio de crescimento, nutrição, frequência e intensidade do uso nos anos, e especialmente entre as estações (BEECHER et al., 2013).

5.3.2. Massa do dossel forrageiro, carbono e nitrogênio na APN, AEN e PSA

Em relação à análise de variância, verifica-se que houve variação entre APN, AEN e PSA na massa do dossel forrageiro, assim como nos teores de C, N e relação C/N. Quando avaliou-se a época de coleta e a interação entre tratamento e época de coleta, também observou-se influência desses parâmetros na massa do dossel e nos teores de C e N pelo teste F ($p < 0,05$) (Tabela 7).

Tabela 7. Análise de variância para massa do dossel (MS), carbono (C), nitrogênio (N) e relação carbono/nitrogênio (C/N) em uma pastagem sem árvores (PSA) e duas áreas distintas do SSPnúcleos, área próxima aos núcleos (APN) e área entre os núcleos (AEN).

Variáveis	Tratamento (A) APN x AEN x PSA	Ano (B) 2018 x 2019	Interação (A x B)	CV%
MS / ha	4,01*	2,25 ^{NS}	4,02*	24,92
C / ha	4,20*	4,04*	4,18*	25,39
N / ha	2,30 ^{NS}	4,35*	3,25*	28,38
C / N	2,85 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,70 ^{NS}	14,24

^{NS} Não significativo. Significativo a * $P < 0,05$ e ** $P < 0,01$, respectivamente.

Nas análises para os três tratamentos (APN, AEN e PSA) não foram observadas diferenças para massa do dossel (MS) entre as áreas APN e PSA, mas ambas foram inferiores a área AEN que apresentou um valor de 3798,22 kg MS ha⁻¹ para o ano de 2018 (Tabela 8). O melhor desempenho para AEN deve-se à formação de condições favoráveis principalmente para massa do dossel. Estudo realizado na mesma área demonstrou que o sombreamento parcial promovido pelos núcleos, influenciou positivamente na produção anual forrageira da área AEN com 4.309 kg MS ha⁻¹ com 40% de luminosidade (KRETZER et al., 2019; DENIZ et al., 2019).

Plevich et al. (2019) observou os efeitos negativos da alelopatia para a massa do dossel na área APN. A importância desses processos dependerá da interação entre as limitações abióticas do local e a plasticidade ecofisiológica das espécies cultivadas (CABALLÉ, 2013). Já em um estudo com SSP na Carolina do Norte EUA foi observado um grande potencial para o crescimento da forragem junto as linhas das árvores (CASTILLO et al., 2020).

As análises para C nos tratamentos avaliados apresentaram os seguintes resultados, para APN 1424,28 kg C ha⁻¹, para AEN 1591,46 kg C ha⁻¹ e PSA 1379,47 kg C ha⁻¹ (Tabela 8), tendo uma maior concentração de carbono na AEN proporcionado pelas condições favoráveis para biomassa forrageira (P>0,05).

A avaliação de C para tratamentos constituídos por pastagens de monocultura de gramíneas a pleno sol e em três distâncias de bosques, 7,5 m (avaliação ao norte) 15 m, e 7,5 m (avaliação ao sul), mostrou que em relação ao pleno sol as três áreas sofreram uma diminuição de 8%, 24% e 40% respectivamente (GOMES et al., 2020).

Após quatro anos do estabelecimento de monocultura de *Brachiaria decumbens*, *Brachiaria decumbens* com *Gliricidia sepium* em SSP e *Brachiaria decumbens* com *Mimosa caesalpiniaefolia* em SSP observou-se um franco potencial para o armazenamento de nitrogênio e carbono especialmente no SSPs. Em dois anos, os estoques de C na *Gliricidia sepium* e *Mimosa caesalpiniaefolia* aumentaram 45% e 35% em relação a monocultura de gramínea. Já o estoque de N do solo triplicou nas três distâncias (Junior et al., 2020).

Os estoques de N apresentaram diferença entre AEN com 96,15 kg ha⁻¹, e PSA 81,88 kg N ha⁻¹ (P>0,05; Tabela 4). A maior concentração de N na AEN deve-se as condições favoráveis devido a formação dos núcleos, possibilitando uma melhor qualidade da forragem, sendo eficaz na redução na emissão de GEE (SOLORIO et al., 2016). Estudo realizado na Espanha, foi observado que o N do solo aumentou 44,1% em condições abaixo do dossel e 11,6% fora do dossel em comparação com as parcelas não plantadas durante todo o período

do estudo (HERNÁNDEZ-ESTEBAN et al., 2018). Estudo realizado por Fornara et al. (2018), encontraram 80 kg N ha⁻¹ com um sequestro de 8 Mg de C ha⁻¹ durante uma década de implementação do sistema silvipastoril no semiárido do Brasil.

A análise da relação C/N nas áreas APN, AEN e PSA não apresentou diferenças, sendo para APN 16,50, AEN 16,75 e PSA 16,76 (Tabela 4). Estudo realizado na Espanha, onde a vegetação natural era composta principalmente por espécies anuais, ao realizar análise da fertilidade do solo, mostrou que os valores médios de C/N aumentaram significativamente com a idade, resultando em maior conteúdo de C/N acumulado em solos com idade de pastagens ricas em leguminosas (HERNÁNDEZ-ESTEBAN et al., 2018).

Tabela 8. Médias das variáveis massa do dossel (MS), carbono (C), nitrogênio (N) e relação nitrogênio (C/N) em uma pastagem sem árvores (PSA) e nas duas áreas distintas do SSPnúcleos, área próxima aos núcleos APN e área entre os núcleos AEN em 2018 e 2019.

Ano	Tratamento		
	PSA	APN	AEN
	MS/kg/ha		
2018	3256,76 Bb	3403,13 Ba	3798,22 Aa
2019	3737,80 Aa	3463,50 Aa	3664,43 Aa
	C/kg/ha		
2018	1379,47 Bb	1424,28 Ba	1591,46 Aa
2019	1613,53 Aa	1454,47 Ba	1562,43 AB
	N/Kg/ha		
2018	81,88 Bb	86,62 Aa	96,15 Aa
2019	95,90 Aa	91,46 Aa	93,75 Aa
	C/N		
2018	16,76 Aa	16,50 Aa	16,75 Aa
2019	17,05 Aa	16,10 Aa	16,98 Aa

Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Nas três áreas avaliadas, os valores massa do dossel e estoque carbono encontrados corroboram com a literatura, maior massa do dossel na AEN pela presença das leguminosas nos núcleos e intensa insolação devido à ausência de sombra. Na área próxima aos núcleos com sombra variável era esperado a redução da massa do dossel e carbono. A disponibilidade de N é um fator limitante para a produção pecuária, e o sistema silvipastoril proporciona maior disponibilidade de N devido à presença de leguminosas arbóreas (CARDONA et al., 2013; DALZELL, 2006). A produtividade das pastagens e qualidade das forragens oferecem oportunidade para aumentar o armazenamento de carbono atmosférico. Variar a relação entre a densidade dos componentes arbóreos e latitude/clima pode melhorar massa do dossel forrageiro e o sequestro de carbono no sistema, com maior potencial para mitigar as mudanças climáticas (VARSHA et al., 2019).

5.4. CONCLUSÕES

O Sistema Silvipastoril com Núcleos não comprometeu a massa do dossel forrageiro e o carbono estocado quando comparado com a PSA. Apesar da área de pastagem do SSPnúcleos ser 10% menor do que no PSA em função dos núcleos, a massa do dossel e o carbono estocado por hectare não diferiram. Nas áreas entre os núcleos (AEN) do SSPnúcleos os valores de massa do dossel forrageiro e estoque de carbono foram maiores do que na PSA.

Considerando que o SSPnúcleos manteve a massa do dossel forrageiro e o estoque de carbono por hectare igual aos piquetes sem árvores (PSA), mesmo com 90% da área efetiva de pasto, descortina-se no SSPnúcleos possibilidades de mitigar parcialmente a emissão dos GEE da pecuária convencional.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Sistema Silvipastoril com Núcleos produziu 17.804 kg ha⁻¹ de biomassa nos núcleos após seis anos de sua implantação. Isto equivale a uma absorção de carbono atmosférico na ordem de 4,204 kg ha⁻¹ somente na parte aérea dos componentes arbóreos dos núcleos. Considerando que o sistema é composto de 40 núcleos de 25 m² por hectare, a quantidade de carbono atmosférico sequestrado é equivalente a 0,1 ha de núcleos agroflorestais contíguos. Sendo assim, a implantação do SSPnúcleos pode ser considerada um importante sumidouro de carbono com potencial para mitigar o impacto da pecuária convencional nas mudanças climáticas.

A implantação dos núcleos agroflorestais em pastagens não naturais do Bioma Mata Atlântica proporcionou reabilitação ecológica dos agroecossistemas e restauração ecológica das paisagens rurais densamente antropizadas. Este sistema se constitui em um modelo de pecuária de baixo carbono com potencial para implantação através de programas de Pagamento por Serviços Ecossistêmicos. Assim, os resultados deste estudo e a natureza do SSPnúcleos indicam um significativo impacto na redução do passivo ambiental gerado pela produção de leite mesmo à base de pasto, especialmente se considerarmos que as pastagens degradadas são a cobertura do solo mais comum nas áreas desflorestadas do Bioma.

O estudo mostrou que o SSPnúcleos não afetou negativamente a produção de biomassa e o carbono estocado por hectare no dossel forrageiro, mesmo considerando que em 10% da área foram alocados para os núcleos arbóreos agroflorestais. Nas áreas entre os núcleos (SSPnúcleos) os valores de biomassa e estoque de carbono foram superiores a pastagem sem árvores (PSA). Considerando que o SSPnúcleos manteve a biomassa e o estoque de carbono por hectare do PSA mesmo em 90% da área, e que nos outros 10% foram implantados os núcleos arbóreos agroflorestais, descortina-se no SSPnúcleos possibilidades de mitigar a emissão dos GEE notadamente alta na pecuária convencional brasileira.

7. LIMITAÇÕES PARA A EXECUÇÃO DESSE TRABALHO

A realização de pesquisas em propriedades da agricultura familiar é de extrema relevância considerando a importância da pesquisa-ação participativa. Por outro lado, cabe ressaltar a necessidade de articulações eventualmente extenuantes quando da inserção de manejos e metodologias de coleta com rigor científico no cotidiano da agricultura familiar.

Cabe ressaltar que por mais interessados que estejam os pequenos produtores não apresentam “margem de manobra” para alteração das práticas de manejo sem a devida compensação pelas instituições de pesquisa. Por outro lado, em geral os órgãos financiadores não contemplam esta alocação de recursos.

8. ESTUDOS FUTUROS

Para estudos futuros recomenda-se que a partir dos dados obtidos no presente estudo para estoque de carbono e nitrogênio, sejam feitas avaliações dos estoques e emissão de GEE em diferentes cenários de utilização de SSPnúcleos nas extensas áreas de pastagens degradadas dos biomas brasileiros. Assim, através da modelagem poder-se-ia estimar a relação custo/benefício, *trade offs* e serviços ecossistêmicos.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo financiamento da pesquisa e viabilização da bolsa de Doutorado no âmbito do Laboratório de Sistemas Silvopastoris e Restauração Ecológica - LASSre/UFSC do Programa de Pós-graduação em Agroecossistemas da Universidade Federal de Santa Catarina – PPGA/UFSC.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRECHT, A.; KANDJI, S. T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 99, p. 15–27, 2003. doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00138-5
- ALTIERI, M. Agroecologia : bases científicas para uma agricultura sustentável Autor : Peso : **Expressão Popular**, p. 400 p, 2012.
- ALTIERI, M. A. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 74, n. 1–3, p. 19–31, jun. 1999.
- ALVARES, C. A.; STAPE, L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507
- ALVES-PINTO, H. N.; LATAWIEC, A.; STRASSBURG, B. B. N.; BARROS, F. S. M.; SANSEVERO, J. B. B.; IRIBARREM, A; CROUZEILLES, R.; LEMGRUBER, L.; RANGEL, M. C.; SILVA, A. C. P Reconciling rural development and ecological restoration: Strategies and policy recommendations for the Brazilian Atlantic Forest. **Land Use Policy**, 2016.
- ALVEZ, J. P.; SCHMITT-FILHO, A. L.; FARLEY, J. C.; ERICKSON, J. D.; MENDÉZ, E. Agroecology and Sustainable Food Systems Transition from Semi-Confinement to Pasture-Based Dairy in Brazil : Farmers ' View of Economic and Environmental Performances. **Agroecology and Sustainable Food Systems**, n. March 2015, p. 37–41, 2015.
- AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Bras. Ci. Solo**, n. 1, p. 189–197, 2001.
- ARYAL, D. R.; GO, R. R.; MORALES-RUIZ, D. E. Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas , Mexico. v. 0123456789, p. 213–227, 2019.
- ASHWORTH, A. J.; WEST, C. P.; ALLEN, F. L.; KEYSER, P. D.; WEISS, S. A.; TYLER, D. D.; TAYLOR, A. M.; WARWICK, K. L.; BEAMER, K. P. Biologically fixed nitrogen in legume intercropped systems: Comparison of nitrogen-difference and nitrogen-15 enrichment techniques. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2419–2430, 2015.
- ASSUNÇÃO, J. Climate change and agricultural productivity in Brazil : future perspectives. **Environmental and Development Economics**, v. 21, p. 581–602, 2016.
- BARCELLOS, A . O.; RAMOS A, K, B.; VILELA L.; JUNIOR G, B, M, J. Sustentabilidade da produção animal baseada em pastagens consorciadas e no emprego de leguminosas exclusivas, na forma de banco de proteína, nos trópicos brasileiros. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, p. 521–527, 2008.
- BATTISTI, L. F.Z.; SCHMITT-FILHO, A. L.; LOSS, A.; SINISGALLI, P. A. A. Soil

chemical attributes in a high biodiversity silvopastoral system Atributos químicos del suelo en un sistema silvopastoril de alta biodiversidad. v. 67, p. 486–493, 2018.

FERRAZ, J. B. S.; FELÍCIO, P. E. Production systems – An example from Brazil. **Meat Science**, v. 84, p. 238–243, 2010.

BERTOLIN, R. V.; ZWICK, E.; BOAS, A. A. V. A Pesquisa-ação na Construção Social da Ação: Uma Abordagem Emancipatória. **III Encontro de Ensino e Pesquisa em Administração e Contabilidade**, p. 1–14, 2011.

BIAVATTI, H. A. Z.; BERBER, G. C. M.; BERBER, R. C. A. Produção de Leite em Sistemas Integrados : Revisão Milk Production in Integrated Systems : Review. **Scientific Eletronic Archives**, v. 7, n. 7, p. 1–16, 2014.

BORBUREMA, J. B.; SOUZA, B. B.; CEZAR, M. F.; FILHO, J. M. P Influência de fatores ambientais sobre a produção e composição físico-química do leite. **Revista ACSA**, v. 9, p. 15–19, 2013.

BRANCALION, P. H. S.; LIMA, L. R.; RODRIGUES, R. R. Restauração ecológica como estratégia de resgate e conservação da biodiversidade em paisagens antrópicas tropicais. p. 565–587, 2009.

BRANCHER, T. Estoque e ciclagem de carbono de sistemas agroflorestais em Tomé-Açu, Amozônia Oriental. **Dissertação**, 2010.

BROW, I. F.; MARTINELLI, L. A.; THOMAS, W. W.; MOREIRA, M. Z.; CID-FERRERIA, C. A.; VICTORIA, R. A. Uncertainty in the biomass of Amazonian forests : An example from Rondônia , Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 75, n. 94, p. 175–189, 1995.

BROWN, S. Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests : a Primer . (FAO Forestry Paper - 134). **FAO**, p. 3–5, 1997.

BUSTAMANTE, M. M. C. Ecological restoration as a strategy for mitigating and adapting to climate change : lessons and challenges from Brazil. 2019.

CALLE, A.; MONTAGNINI, F.; ZULUAGA, A. F. Farmer’s perceptions of silvopastoral system promotion in Quindío, Colombia. **Bois et forêts des tropiques**, v. 300, n. 2, p. 79–94, 2009.

CALLE, Z.; MURGUEITIO, E.; CHARÁ, J.; MOLINA, C. H.; ZULUAGA, A. F.; CALLE, A. A Strategy for Scaling-Up Intensive Silvopastoral Systems in Colombia A Strategy for Scaling-Up Intensive Silvopastoral Systems in Colombia. v. 9811, 2013.

CARDINAEL, R.; UMULISA, V.; TOUDERT, A.; OLIVIER, A.; BOCKEL, L.; BERNOUX, M. Agriculture , Ecosystems and Environment Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. **“Agriculture, Ecosystems and Environment”**, v. 236, p. 243–255, 2017.

CARDONA, C. A. C.; RAMIREZ, J. F. N.; MORALES, A. M. T.; MURGUEITIO, R.; OROZCO, J. D. C.; VERA, J. K.; SÁNCHEZ, F. J. S.; ESTRADA, M. F.; SÁNCHEZ, B. S.;

ROSALES, R. B. Contribution of intensive silvopastoral systems to animal performance and to adaptation and mitigation of climate change. **Revista Colombiana de Ciências Pecuárias**, p. 76–94, 2013.

CARVALHO, W. T. V.; MINIGHIN, D. C.; GONÇALVES, L. C.; VILLANOVA, D. F. Q.; MAURICIO, R. M.; PEREIRA, R. V. G. Pastagens degradadas e técnicas de recuperação: Revisão. **Pubvet**, v. 11, n. 10, p. 1036–1045, 2017.

CASALS, P.; ROMERO, J.; RUSCH, G. M.; IBRAHIM, M. Soil organic C and nutrient contents under trees with different functional characteristics in seasonally dry tropical silvopastures. **Plant Soil**, p. 643–659, 2014.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. **Sci. Agric.**, v. 64, n. February, p. 83–99, 2007.

CHARÁ, J.; RIVERA, J.; BARAHOMA, R.; MURGUETIO, E.; DEBLITZ, C; REYES, E.; MAURICIO, R. M.; MOLINA, J. J.; FLORES, M.; ZULUAGA, A. Intensive Silvopastoral Systems: Economics and Contribution to Climate Change Mitigation and Public Policies. 2017.

CHATTERJEE, N.; NAIR, P. K. R.; CHAKRABOTY, S.; NAIR, V. D. Changes in soil carbon stocks across the Forest-Agroforest-Agriculture_Pasture continuum in various agroecological regions_ A meta-analysis. **Elsevier Enhanced Reader.pdf**, 2018.

CHAZDON, R. L. Beyond Deforestation: Restoring Degraded Lands. **Science**, v. 1458, n. 2008, 2008.

COHN, A. S.; MOSNIER, A.; HAVLIK, P.; VALIN, H.; HERRERO, M.; SCHMID, E.; O'HARE, M.; OBERSTEINER, M. Cattle ranching intensification in Brazil can reduce global greenhouse gas emissions by sparing land from deforestation. **PNAS**, v. 111, n. 20, p. 7236–7241, 2014.

AZEVEDO, T. R. et al. SEEG initiative estimates of Brazilian greenhouse gas emissions from 1970 to 2015. **Scientific Data**, v. 5, p. 1–43, 2018.

DENIZ, M.; SCHMITTI-FILHO, A. L.; FARLEY, J.; QUADROS, S. F.; HOTZEL, M. J. High biodiversity silvopastoral system as an alternative to improve the thermal environment in the dairy farms. **International of Biometeorology**, n. doi:10.1007/s00484-018-1638-8, p. 83–92, 2019.

DEVI, N. M.; KUKARSKIN, V. V.; GALIMOVA, A. A.; MAZEPA, V. S; GRIGORIEV, A. A. Climate change evidence in tree growth and stand productivity at the upper treeline ecotone in the Polar Ural Mountains. **Forest Systems**, 2020.

DIAS-FILHO, M. B. Sistemas silvipastoris na recuperação de pastagens tropicais degradadas. **Anais de Simpósios da 43 Reunião Anual da SBZ**, p. 442–456, 2006.

DIAS-FILHO, M. B. Sistemas Silvopastoris na Recuperação de Pastagens Degradadas. Belém: Documentos 258, Embrapa. 2006.

ELIAS, G. A.; SANTOS, R. Produtos florestais não madeiros e valor potencial de exploração sustentável da floresta atlântica no Sul de Santa Catarina, Brasil. **Ciência Florestal**, v. 26, p. 249–262, 2016.

EPAGRI-CEPA. Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina. **EPAGRI-CEPA**, v. 1, 2015.

EPAGRI-CEPA. Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina. **EPAGRI-CEPA**, v. 1, p. 206, 2018.

FAO. El Estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. Roma: [s.n.].

FURTADO, F. E. Sistemas Silvopastoris Fundamentos e Aplicabilidade Documentos 74 Sistemas Silvopastoris : Fundamentos e Aplicabilidade. **EMBRAPA**, v. 74, 2001.

GAITÁN, L.; LÄDERACH, P.; GRAEFE, S; RAO, I.; HOEK, R. Climate-Smart Livestock Systems : An Assessment of Carbon Stocks and GHG Emissions in Nicaragua. **PLOS one**, p. 1–19, 2016.

GERBER, P. J.; STEINFELD, H., HENDERSON, B., MOTTET, A., OPIO, C., DIJKMAN, J., FALCUCCI, A. & TEMPIO, G. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. **Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome**. [s.l: s.n.].

GLATZLE, A. Questioning key conclusions of FAO publications ‘ Livestock ’ s Long Shadow ’ (2006) appearing again in ‘ Tackling Climate Change Through Livestock ’ (2013). **Pastoralism A Springer Open Journal**, p. 4–9, 2014.

GUILLEMOT, J.; MUNISHAMAPPA, M. Agriculture , Ecosystems and Environment Native coffee agroforestry in the Western Ghats of India maintains higher carbon storage and tree diversity compared to exotic agroforestry. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 265, n. June, p. 461–469, 2018.

HEIKKINEN, R. K.; LEIKOLA, N.; AALTO, J.; AAPALA, K.; LUOTO, S. K. M.; VIRKKALA, R. Fine-grained climate velocities reveal vulnerability of protected areas to climate change. **Scientific Reports**, p. 1–11, 2020.

HIGA R, C; CARDOSO, D. J.; ANDRADE, G. C.; ZANATTA, J. A.; ROSSI, L. M. B.; PILROLNIK, K.; NICODEMO, M. L. F.; GARRASTAZU, M. C.; VASCONCELOS, M. S.; SALIS, S. M. Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal. **EMBRAPA**, 2014.

HUANG, H.; LAMPE, M.; TONGEREN, F. Climate change and trade in agriculture. **Food policy**, v. 36, p. 9–13, 2011.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Santa Rosa de Lima. Disponível em: <<http://santa-catarina/santa-rosa-de-lima>>. Acesso em: 22 de ago. 2018. p. 2018, 2015.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. v. 1, n. October, p. 27–31, 2014.

IPCC. Climate Change and Land. 2019.

JAISSWAL R K.; LOHANI, A.; TIWARI, H. L. Development of framework for assessment of impact of climate change in a command of water resource project. **Journal of Earth System Science**. v. 129, 2020. doi: 10.1007/s12040-019-1328-x

JUNIOR, A. M.; FRACETTO, F. J. C.; FERREIRA, J. S.; SILVA, M. B.; FRACETTO, G. G. M. Legume-based silvopastoral systems drive C and N soil stocks in a subhumid tropical environment. **Catena**, v. 189, n. February, 2020.

KERR, R. A. How Hot Will The Greenhouse World Be. **Special Section**, v. 309, 2005.

KRETZER S. Influência do sistema silvipastoril com núcleos de alta biodiversidade na dinâmica e microclima forrageiro. **Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC**. p. 80, 2019.

LACERDA, J. S.; POLIZEL, J. L. Estimativa da Biomassa e Carbono em Áreas Restauradas com Plantio de Essências Nativas. **USP/ESALQ**, 2009.

LAL, R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. **Environmental Pollution**, v. 116, n. 2002, p. 353–362, 2002.

LAL, R. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. **Land degradation & development**, v. 209, n. August 2005, p. 197–209, 2006.

LATAWIEC, A. E.; STRASSBURG, B. B. N.; RODRIGUES, E. M.; NIJBROEK, R.; SILOS, M. Land Use Policy Suriname: Reconciling agricultural development and conservation of unique natural wealth &. **Land Use Policy**, v. 38, p. 627–636, 2014.

LEE, J.; LEE, S.; HAN, S. H.; KIM, S.; ROH, Y.; SALIM, K. A.; PIETSCH, S. A.; SON, Y. Estimating Carbon Dynamics in an Intact Lowland Mixed Dipterocarp Forest Using a Forest Carbon Model. **Forests**, p. 1–10, 2017.

LÓPEZ-SANTIAGO, J. G.; CASANOVA-LUGO, F.; VILLANOVA-LÓPEZ, G.; DÍAZ-ECHEVERRÍA, V. F.; SOLORIO-SÁNCHEZ, F. J.; MARTÍNEZ-ZURIMENDI, P.; ARYAL, R.; CHAY-CANUL, A. J. Carbon storage in a silvopastoral system compared ' n , Mexico to that in a deciduous dry forest in Michoaca. **Agroforestry Systems**, 2018.

LORENZ, K.; LAL, R. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems . A review. **Agron. Sustain. Dev.**, v. 34, p. 443–454, 2014.

LYBBERT, T. J.; SUMNER, D. A. Agricultural technologies for climate change in developing countries : Policy options for innovation and technology diffusion. **Food policy**, v. 37, p. 114–123, 2012.

MANUAL, D.; ZOMER, R. J. Global Tree Cover and Biomass Carbon on Agricultural Land Database (2000-2010). **World Agroforestry Centre**, p. 1–12, 2016.

MARONE, D.; POIRIER, V.; COYEA, M.; OLIVIER, A.; MUNSON, A. Carbon storage in agroforestry systems in the semi-arid zone of Niayes , Senegal. **Agricultural Systems**, v. 91, p. 941–954, 2017.

MATOS, F. P.; PESSOA, S. V. A modernização da agricultura no Brasil e os novos usos do território. **Geo UERJ**, v. 22, p. 290–322, 2011.

METZGER, J. Como restaurar a conectividade de paisagens fragmentadas. **Restauração ecológica de ecossistemas naturais**. v. 18, n. 1, p. 1–27, 2003.

MIDDENDORP, R. S.; VANACKER, V.; LAMBIN, E. F. Impacts of shaded agroforestry management on carbon sequestration , biodiversity and farmers income in cocoa production landscapes. **Landscape Ecology**, v. 0, 2018.

MINASNY, B.; et al. Geoderma Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, v. 292, p. 59–86, 2017.

MORA. Pago de servicios ambientales a sistemas agroforestales en Costa Rica. 2006.

MOTTET, A.; HAAN, C.; FALCUCCI, A.; TEMPIO, G.; OPIO, C. Livestock : On our plates or eating at our table ? A new analysis of the feed / food debate. **Global Food Security**, v. 14, n. January, p. 1–8, 2017.

MURADIAN, R.; CORBERA, E.; PASCUAL, U.; KOSOY, N.; MAY, P. H. Reconciling theory and practice: An alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services. **Ecological Economics**, v. 69, n. 6, p. 1202–1208. 2010.

MURGUEITIO, E.; JULIÁN, C.; ROLANDO, B.; JULIÁN, E. R. Development of sustainable cattle rearing in silvopastoral systems in Avances en Ganadería Sostenible con Sistemas silvopastoriles en. **Cuban Journal of Agricultural Science**, v. 53, n. 1, p. 65–71, 2019.

MURGUEITIO, E.; CALLE, Z.; URIBE, F.; CALLE, F. SOLORIO, B. Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. **Forest Ecology and Management**, v. 261, p. 1654–1663, 2011.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J.. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. February, p. 853–858, 2000.

OLIVO, C. J.; MEINERZ, G. R.; AGNOLIN, C. A.; STEINWANDTER, E.; ZIECH, M. F.; SKONIESKI, F. R. Produção de forragem e carga animal de pastagens de Coastercross sobressemeadas com forrageiras de inverno. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, p. 68–73, 2010.

PARRA, A. S.; FIGUEIREDO, E. B.; BORDONAL, R. O.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. B.; LA SCALA, N. J. Greenhouse gas emissions in conversion from extensive pasture to other agricultural systems in the Andean region of Colombia. **Environmental and Development Sustainable**, 2017.

PEÑA-LÉVANO, L. M.; TAHERIPOUR, F.; TYNER, W. E. Climate Change Interactions

with Agriculture , Forestry Sequestration , and Food Security. *Environmental and Resource Economics*. 2019. doi.org/10.1007/s10640-019-00339-6

PICASSO, V. D.; CASLER, M. D.; UNDERSANDER, D. Resilience , Stability , and Productivity of Alfalfa Cultivars in Rainfed Regions of North America. *Crop science*. v. 59, 2019.

PORFÍRIO, V. Sistemas silvipastoris em Mato Gross do Sul - Para Que Adotá-los? **EMBRAPA FLORETAS**, n. 41, p. 1–13, 2003.

PRASAD, R.; KUMAR, S.; YADAV, A. K.; KUMAR, S.; KUMAR, M.; SINGH, R. Impacts of Climate Change on Agriculture: Adaptation, Mitigation, and Environmental Policy. **Plant Adaptation Strategies in Changing Environment**, p. 329–345, 2017.

REIS, A.; BECHARA, F. C.; TRES, D. R. Nucleation in tropical ecological restoration. *Scientia Agricola*, v. 67, n. 2, p. 244–250, 2010.

REPPIN, S.; KUYAH, S.; NEERGAARD, A.; OELOFSE, M. Contribution of agroforestry to climate change mitigation and livelihoods in Western Kenya. **Agroforestry Systems**, v. 7, p. 203–220, 2019.

ROZENDAAL, D, M. A.; CHAZDON, R. L. Demographic drives of tree biomass change during secondary succession in northeatern. **Ecological Society of America**, 2015.

RSTUDIO. RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>. v. 6, n. 2015, p. 4–5, 2015.

SAKADEVAN, K.; NGUYEN, M. L. Livestock Production and Its Impact on Nutrient Pollution and Greenhouse Gas Emissions. **Advances in Agronomy**, v. 141, p. 147–184, 2017.

PACIULLO, D. S. C.; CASTRO, C. R. T.; GOMIDE, C. A. M.; FERNANDES, P. B.; ROCHA, W. S. D.; MULLER, M. D.; ROSSIELLO, R. O. P. SÁVIO, D. Soil bulk density and biomass partitioning of *Brachiaria decumbens* in a silvopastoral system. *Scientia Agricola*, v. 67, p. 598–603, 2010.

SCHMITT, A.; FARLEY, J.; ALVEZ, J.; ALARCON, G.; REBOLLAR, P. M. Integrating Agroecology with Payments for Ecosystem Services in Santa Catarinas Atlantic Forest. **Livro**, p. 333–355, 2013.

SCHMITT, F. A.; MURPHY, W.; FARLEY, J. Grass based agroecologic dairying to revitalize small family farms throughout student technical support : The development of a participative methodology responsible for 622 family farm projects. Mixed grazing systems to improve production gains at pasture. **Advances in Animal Biosciences**, p. 517–518, 2010.

SHI, L.; FENG, W.; XU, J.; KUZYAKOV. Agroforestry systems : Meta - analysis of soil carbon stocks , sequestration processes , and future potentials. **Land degradation & development**, n. November 2017, p. 3886–3897, 2018.

SHIMAMOTO, C. Y. Estimativa do crescimento e acúmulo de biomassa em espécies

arbóreas, como subsidio a projetos de restauração da Mata Atlântica. **TESE DOUTORADO**, 2012.

SILVA, A. A.; SCHMITT-FILHO, A. L.; FANTINI, A. C.; ZAMBIAZI, D. C.; SINISGALLI, P. A. Estimativas de biomassa e carbono em sistema silvipastoril com núcleos arbóreos (PRVnúcleos). **Cadernos de agroecologia**. v. 13, 2018.

SIMIONI, F. S.; SCHMITT-FILHO, A. L.; JONER, F.; FANTINI, A. C.; FALEY, J.; MOREIRA, A. P. T. Visualização de Variação da assembleia de aves em áreas pastoris e remanescentes florestais adjacentes. **Revista de Ciências agrárias**. 42(4) p. 884-895. 2019.

SOLORIO, S. F. J.; WRIGHT, J.; FRANCO, M. J. A.; BASU, S. K.; SARABIA, S. L.; RAMÍREZ, AYALA, B. A.; AGUILAR, P. C.; KU, V. J. C. Silvopastoral Systems : Best Agroecological Practice for Resilient Production Systems Under Dryland and Drought Conditions. **Ciência da Terra e do Ambiente**, p. 233–250, 2016.

STEFANO, A.; JACOBSON, M. G. Soil carbon sequestration in agroforestry systems : a meta-analysis. **Agroforestry Systems**, v. 92, p. 285–299, 2018.

STEFFEN, W.; PERSSON, A.; DEUTSCH, L.; ZALASIEWIEZ, J.; WILLIAMS, M.; RICHARDSON, K.; CRUMLEY, C.; CRUTZEN, P.; FOLKE, C.; GORDON, L.; MOLINA, M.; RAMANATHAN, V.; ROCKSTROM, J.; SCHEFFER, M.; SCHELLNHUBER, J.; SVEDIN, U. The anthropocene: From global change to planetary stewardship. **Ambio**, v. 40, n. 7, p. 739–761, 2011.

STEIN, M.; ANZANELLO, M. J.; KAHMANN, A. Sistemática para identificação das variáveis preditivas mais relevantes em um processo do setor metal-mecânico. **Revista Gestão Industrial**, p. 120–135, 2014.

TILMAN, D.; BALZER, C.; HILL, J.; BEFORT, B. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **PNAS**, v. 108, n. 50, 2011.

TIMMINS, C. Endogenous Land Use and the Ricardian Valuation of Climate Change. **Environmental & Resource Economics**, v. 33, p. 119–142, 2006.

UDAWATTA, R. P.; SHIBU, J. Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Practices in Temperate North America. **Agroforestry Systems**, n. C, 2011.

VILELA, E. F.; CALLEGARO, G. M.; FERNANDES, G. W. **Biomass e agricultura: oportunidades e desafios**. organizadores: Evaldo Ferreira Vilela, Geraldo Magela Callegaro, Geraldo Wilson Fernandes. – Rio de Janeiro : Vertente edições, p. 304, 2019.

WICKHAM, H. ggplot2: Elegant GRaphics for Data Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 35, n. July, p. 1–3, 2010.

YADAV, A.; GENDLEY, M. K.; SAHU, J. PATEL, P. K.; CHANDRAKER, K., DUBEY, A.. Silvopastoral system : A prototype of livestock agroforestry. **The Pharma Innovation**, v. 8, n. 2, p. 76–82, 2019.

YASIN, G.; NAWAZ, M. F.; NIAZI, N. K. Biomass, carbon stocks and CO₂ sequestration in three diferent aged irrigated populus deltoides bartr. ex marsh. bund planting agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 16, n. 5, p. 6239–6252, 2018.

YAZAKI, T.; HIRANO, T.; SANO, T. Biomass Accumulation and Net Primary Production during the Early Stage of Secondary Succession after a Severe Forest Disturbance in Northern Japan. **Forests**, p. 1–16, 2016.

YOUNG, C. E. Desmatamento e desemprego rural na Mata Atlântica. **Floresta e Ambiente**, v. 13, n. 2, p. 75–88, 2006.

ZHANG, Y.; LIAO, X.; WANG, Z.; WEI, X.; JIA, X.; SHAO, M. Synchronous sequestration of organic carbon and nitrogen in mineral soils after conversion agricultural land to forest. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 295, n. December 2019, 2020.