

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO – PPGCS

JADIEL ANDOGNINI

**MODIFICAÇÕES NOS ATRIBUTOS DE UM NITOSSOLO DEVIDO A
TRANSIÇÃO DE FLORESTA DE PINUS PARA PASTAGEM**

LAGES

2023

JADIEL ANDOGNINI

**MODIFICAÇÕES NOS ATRIBUTOS DE UM NITOSSOLO DEVIDO A
TRANSIÇÃO DE FLORESTA DE PINUS PARA PASTAGEM**

Tese apresentado ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jackson Adriano Albuquerque

Coorientador: Prof. Dr. Álvaro Luiz Mafra

Lages, SC

2023

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Universitária Udesc,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Andognini, Jadiel

Modificações nos atributos de um Nitossolo devido a transição
de floresta de pinus para pastagem / Jadiel Andognini. -- 2023.
111 p.

Orientador: Jackson Adriano Albuquerque

Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina,
Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação ,
Lages, 2023.

1. Nitossolo Bruno. 2. Colheita florestal. 3. Resistência à
penetração. 4. Condutividade hidráulica. 5. Estoque de carbono. I.
Albuquerque, Jackson Adriano. II. Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação . III. Título.

JADIEL ANDOGNINI

**MODIFICAÇÕES NOS ATRIBUTOS DE UM NITOSSOLO DEVIDO A
TRANSIÇÃO DE FLORESTA DE PINUS PARA PASTAGEM**

Tese apresentado ao programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jackson Adriano Albuquerque

Coorientador: Prof. Dr. Álvaro Luiz Mafra

BANCA EXAMINADORA

Orientador:

Prof. Dr. Jackson Adriano Albuquerque
Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc

Membros:

Prof. Dr. Jean Alberto Sampietro
Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc

Dr. Tássio Dresch Rech
Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – Epagri

Prof. Dr. André da Costa
Instituto Federal Catarinense – IFC

Prof. Dr. Diego Fernando Roters
Serviço Nacional de Aprendizagem Rural - Senar

Lages, 27 de outubro de 2023

As pessoas mais preciosas da minha vida,
meus pais Valmor e Neiva, à minha
esposa Camila, aos meus irmãos Aderli e
Fábio, à minha irmã Graci e aos meus
sobrinhos Bruno, Miguel, Mariah e Malu.

Dedico.

A GRADECIMENTOS

A vida é feita de fases, cada fase gera momentos únicos de dificuldades e superação. Somente os que se submetem e imergem saberão o real significado de cada momento. A todo o tempo somos testados: fisicamente, intelectualmente e emocionalmente, é um trabalho duro, árduo, de pouco reconhecimento, mas muito gratificante. Somente quem chega ao final de um curso de doutorado sabe o que isso significa, e pode se considerar um grande vencedor.

Apesar de muitas vezes o trabalho de pesquisa ser solitário, um desafio como esse, com certeza, não é um trabalho individual. Nenhuma pesquisa se faz sozinha, é um ofício coletivo, há os que auxiliam com atividades braçais, os que ajudam com ideias e intelecto, e os que dão apoio emocional. Fato é que sem a ajuda de muitas pessoas isso jamais seria realizado.

Começo os agradecimentos resgatando memórias. A fase inicial é difícil de descrever, nosso cérebro muitas vezes falha ao tentar acessar arquivos antigos, mas o primeiro dia de aula é inesquecível para a maioria. Meu primeiro e mais importante agradecimento é para meus pais Valmor Andognini e Neiva Finger Andognini, as pessoas que nunca mediram esforços para colocar o filho na escola, e que estavam lá para me levar ao primeiro dia de aula em 1996 na escola Melvin Jones do bairro Santa Cruz, onde todos meus 3 irmãos estudaram e onde meus sobrinhos atualmente frequentam.

Falando em irmãos, agradeço a eles, Ade, Fabio e Graci por todos os ensinamentos dados ao irmão mais novo, das broncas aos conselhos, pela proteção e por entenderem que um sonho de estudar, ter um título e ser um especialista em algo valeria a pena, e valeu. Nesse momento também agradeço aos meus sobrinhos Bruno, Miguel, Mariah e Malu, os quais chegaram ao longo da minha jornada, e mesmo inconscientemente fizeram meus dias melhores. Espero que entendam que o tio é um tanto quanto ausente por um motivo nobre, e que mesmo longe não os esquece, sente muita falta e os ama incondicionalmente.

Gostaria de agradecer aos meus amigos do tempo de escola, lá do ensino fundamental e médio, meus irmãos que desde aquela época até hoje inspiram minha trajetória. Difícil escolher uma ordem para os nomes, então vamos por ordem alfabética: Bárbara, Camila M., Camila da C., Gisele, Leonardo, Marcel, Otávio e Richeli. Obrigado por tudo, sempre, pelas risadas, festas e conversas produtivas!

Ao longo dos anos muitas outras pessoas passaram pela minha vida, obrigado a todos que de alguma forma fizeram parte dessa trajetória.

Agradeço ao mestre e amigo professor Jackson Adriano Albuquerque, o qual conheci no início da graduação em agronomia na Udesc através de uma bolsa de trabalho. Fui parar no laboratório de solos, muito inexperiente ainda não sabia ao certo do que se tratava, mas com o apoio e compreensão do professor acabei pegando gosto e aí permaneci por longos anos, 10 para ser mais preciso.

Durante esse tempo de laboratório muitas pessoas chegaram e saíram, sinceramente não vou lembrar de todos, mas agradeço quem de alguma forma auxiliou no meu crescimento pessoal e profissional. Alguns desses não posso deixar passar, o pessoal que estava no dia a dia sempre pronto para o que der e vier, seja para os lanches, para a faxina, para as coletas, para as análises... Agradeço, portanto, aos colegas que se tornaram grandes amigos Diego Roters, Maria Tereza, Gustavo Ferreira, Cleiton Lazzari, Brayan Favarin, Daniel Iochims, Andrei Silva, Jéssica Stringari, Juliano Teles e em especial a minha amiga/irmã Maria Izabel Warmling, obrigado Bel!

Nos últimos anos uma grata surpresa se fez presente em minha vida, uma amiga que no final de 2020 passou a ser mais presente, e algum tempo depois veio a se tornar minha namorada, e hoje com orgulho minha esposa Camila Nadal. Contigo a reta final da fase acadêmica foi muito mais leve. Obrigado por estar junto comigo, relevar minhas manias e complementar minha vida com muito amor e carinho. Seu incentivo fez toda a diferença para que essa fase fosse completada com sucesso, te amo!

Agradecimento especial ao amigo Arturo Letti, um grande agrônomo e empreendedor, que gentilmente me recebeu na sua fazenda para implementar essa pesquisa. Além de tudo, deu muita força na etapa inicial desse processo, quando a pandemia veio à tona e passamos a ter pouca estrutura e mão de obra para as coletas. E por fim, agradeço ao apoio financeiro da Fapesc, CNPq e Capes, ao apoio e suporte estrutural e financeiro da Udesc, universidade pública de Santa Catarina a qual me orgulho de ter frequentado durante graduação, mestrado e doutorado.

“Você não pode esperar construir um mundo melhor sem melhorar os indivíduos. Para esse fim, cada um de nós deve trabalhar para o seu próprio aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, compartilhar uma responsabilidade geral por toda a humanidade.” (Marie Curie)

RESUMO

As operações de colheita florestal que utilizam máquinas pesadas aumentam o risco de degradação física do solo, pois alteram a porosidade, a densidade, os processos hídricos e os atributos químicos, o que reduz a produtividade e a lucratividade dos cultivos subsequentes. O uso do solo com pastagem bem manejada após a colheita florestal tem potencial para recuperar os atributos químicos e o estoque de carbono, no entanto pode compactar o solo devido à pressão do pisoteio do gado. Este estudo teve como objetivo avaliar as mudanças nos atributos físicos e químicos em áreas de Nitossolo Bruno cultivado com *Pinus taeda* L. e após a transição de floresta de pinus para pastagem anual. Cinco áreas com similaridade (relevo, solo e posição geográfica) foram selecionadas em uma fazenda no município de Campo Belo do Sul – SC, correspondentes a: floresta de Pinus (FP), colheita florestal recente (COL), pastagem com um (P1), três (P3) e cinco (P5) anos de implantação em áreas anteriormente ocupadas por pinus, e mata nativa (MN). Amostras de solo com estrutura preservada (0-10, 10-20 e 20-40 cm) e alterada (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm) foram coletadas nos anos de 2020 (MN, FP e COL) e 2021 (P1, P3 e P5) com cinco repetições em cada área para determinar os atributos químicos (pH, Al, Ca, Mg, K, P e C) e físicos do solo (granulometria, grau de floculação, estabilidade de agregados, densidade de partículas, volume total de poros, macroporosidade, microporosidade, porosidade de aeração, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível, resistência a penetração, condutividade hidráulica e densidade do solo). Foram analisadas a normalidade, a homogeneidade das variâncias, a análise da variância e a comparação de médias. Análise de componentes principais foi utilizada para avaliar a correlação entre os atributos analisados e a associação desses com os diferentes sistemas de uso. Comparado à mata nativa o sistema com cultivo do pinus teve menores teores de Ca, Mg e K e maiores de Al (na camada superficial) e de P (10-40 cm). Ao comparar o solo antes (FP) e após a colheita do pinus (COL) observou-se redução na estabilidade dos agregados (0-20 cm) mas sem afetar a qualidade estrutural. Além disso verificou-se aumento no volume de água disponível (0-10 cm). Comparando com a área de colheita, as pastagens de um, três e cinco (P1, P3 e P5) apresentam maior teor de nutrientes (P, Ca, Mg, K) e pH_{H2O}, bem como menor teor de Al. Essa observação é mais acentuada nos primeiros 10 centímetros das pastagens. Nas pastagens, os atributos físicos foram prejudicados, apresentando maior resistência à penetração e menor condutividade hidráulica saturada (0-10 cm), indicando um processo

de compactação. O estoque de carbono do Nitossolo Bruno reduz durante os cinco primeiros anos de manejo com pastagem implantada após a colheita florestal, sendo mais acentuado na camada superficial (0-5 cm). O uso do solo para cultivos reduz o estoque de carbono, visto que a mata nativa possui o maior estoque entre os sistemas avaliados. O Nitossolo Bruno é um solo de estrutura estável e a colheita mecanizada de pinus não afeta seus atributos físicos, no entanto, o uso para pastejo intensifica o processo de compactação da camada superficial. O solo é quimicamente pobre e o uso com floresta plantada piora essa característica, obrigando o produtor a corrigir nutrientes (adubação) e o pH (calagem) antes da implantação de outras culturas. O uso desse solo com cultivos, seja floresta ou pastagem, reduz o estoque de carbono da camada superficial, fazendo-se necessário mais estudos sobre práticas de manejo nesse ambiente que mantenham um balanço nulo ou positivo de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e manutenção da qualidade geral do solo.

Palavras-chave: Nitossolo Bruno, colheita florestal, resistência a penetração, condutividade hidráulica, estoque de carbono.

ABSTRACT

Forest harvesting operations with heavy and large machines, increase the risk of soil degradation, since it modifies porosity, bulk density, hydraulic processes and chemical attributes, which reduces the yield and profitability of next crops. Soil use under well-managed pasture after forest harvest has potential to recover chemical attributes and carbon stock, however it could result in soil compaction due to pressure from cattle trampling. The objective of this study was to evaluate changes in the chemical and physical attributes of a Nitossolo Bruno cultivated with *Pinus taeda* L., and after the transition from pine forest to annual pasture. In a farm at Campo Belo do Sul – SC, five areas were selected with similarity to each other (relief, soil type and geographical position), corresponding to the native forest (MN), pine forest (FP), recent forest harvesting (COL), pasture with one (P1), three (P3) and five (P5) years of use established in an area where there was pine. Preserved (0–10, 10–20 and 20–40 cm) and disturbed structure (0–5, 5–10, 10–20, and 20–40 cm) soil samples were collected in these areas at 2020 (MN, FP and COL) and 2021 (P1, P3 and P5), each area with five replicates. Through these samples, soil chemical analysis (pH, Al, Ca, Mg, K, P and C) and physical (granulometry, particle soil flocculation, aggregate stability, particle density, total/macro/micro porosity, air-filled porosity, field capacity, permanent wilting point, available water, penetration resistance, hydraulic conductivity and bulk density) were carried out. Normality and homogeneity of the variances were analyzed before carried out the analysis of variance (ANOVA) and the means comparison. Principal component analysis was used to assess the correlation between the analyzed attributes and their association with different land use systems. Compared to native forest, the pine system had lower levels of Ca, Mg and K and higher levels of Al (superficial layer) and P (10 to 40 cm). Comparing the soil before (FP) and after the pine harvest (COL) a reduction in the geometric mean diameter of soil aggregates (0 - 20 cm) was observed, however not a very expressive value, without affecting soil structural quality, in addition, in COL there was an increase in available water volume (0–10 cm). Comparing to the pine harvest area, pastures of 1, 3 and 5 years (P1, P3 and P5) showed an increase in nutrient content (P, Ca, Mg, K) and $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, as well as a reduction in Al content. This observation is highlighted on 10 first centimeters of the pastures. Also in pastures, physical attributes were damaged due to penetration resistance increased and saturated hydraulic conductivity reduced (0–10 cm), which characterizes a soil compaction process. The

Nitossolo Bruno carbon stock decreased during the first five years of pasture management implanted after forest harvest and it is clearer at superficial layer (0–5 cm). Soil use for crops reduces the carbon stock, since native forest has the largest stock among the evaluated systems. Overall, we can conclude that Nitossolo Bruno is a stable soil, and the mechanized pine harvest does not affect its physical attributes, however, its use with grazing enhances superficial layer compaction process. The soil is chemically poor and the use with pine forest worsens this characteristic, thus, there must be intervention (fertilization and pH correction) before crops implantation. Finally, the use of this soil with crops, whether forest or pasture, reduces the carbon stock in the surface layer, being necessary the progress of studies on management practices in this environment to maintain a zero or positive carbon balance, that contributes to mitigating climate change and maintenance of general soil quality.

Keywords: Nitossolo Bruno, forest harvest, penetration resistance, hydraulic conductivity, carbon stock.

LISTA DE IMAGENS

Imagen 1 – Perfil de solo representativo da área de estudo no município de Campo Belo do Sul – SC. Localização: 27°54'41,76"S, 50°42'44,16"O.....	37
Imagen 2 - Queima de resíduos de colheita florestal de pinus na área experimental no município de Campo Belo do Sul - SC.....	40
Imagen 3 - Aspecto visual individual (A) e na paisagem (B) dos tocos remanescentes de colheita do pinus perfurados com broca após a colheita florestal e queima dos restos de colheita.	40
Imagen 4 - Remanescentes de colheita do pinus amontoados em leiras/monturos numa área de pastagem já implantada sobre Nitossolo Bruno em fazenda no município de Campo Belo do Sul - SC.....	41
Imagen 5 - Aspecto de uma área de Nitossolo Bruno recém brotada após semeadura da pastagem hibernal "em linha", com mínima movimentação de solo no município de Campo Belo do Sul - SC.....	42
Imagen 6 – Sistema de pastejo rotacionado em pastagem de aveia (<i>Avena sativa L.</i>) e Azevém (<i>Lolium multiflorum L.</i>) sobre um Nitossolo Bruno no município de Campo Belo do Sul – SC. A frente da imagem, machos reprodutores, ao fundo, bezerros para engorda.....	43
Imagen 7 - Localização das áreas de coleta de amostras para avaliar o efeito da mudança de uso da terra e manejo nas características de um Nitossolo Bruno no município de Campo Belo do Sul - SC.....	44
Imagen 8 - Resíduos de pinus removidos da superfície na abertura da trincheira para coleta do Nitossolo Bruno.....	46
Imagen 9 – Coleta das amostras com estrutura preservada do Nitossolo Bruno em área de mata nativa no município de Campo Belo do Sul – SC.....	46
Imagen 10 – Amostra de estrutura preservada do Nitossolo Bruno em cilindro volumétrico com um tecido permeável preso à base da amostra com borracha elástica.....	48
Imagen 11 – Amostra de solo com estrutura alterada secando para obtenção da terra fina seca ao ar (direita) e amostra peneirada para teste de estabilidade de agregados em água (esquerda). ..	49
Imagen 12 – Amostra do Nitossolo Bruno em repouso com água dentro de proveta de 1L para determinação da granulometria do solo e grau de floculação das partículas. .	51
Imagen 13 – Mesa de tensão de areia (A) e câmaras de Richards (B) do laboratório de física e manejo do solo da Universidade do Estado de Santa Catarina, campus Lages.	53
Imagen 14 – Permeâmetro de carga decrescente acompanhado do programa “Ksat” para realização do teste de condutividade hidráulica em solo saturado.....	54

Imagen 15 – Penetrômetro de bancada Marconi MA933 do laboratório de física e manejo do solo da Udesc Lages – SC para avaliação da resistência do solo à penetração..	55
Imagen 16 – Agitador tipo Yoder para análise de estabilidade de agregados em água e separação das classes de agregados do solo do laboratório de física e manejo do solo da Udesc Lages – SC.....	57
Imagen 17 – Classes de agregados de um Nitossolo Bruno separadas no conjunto de peneiras após agitação em água no aparelho tipo Yoder e secagem em estufa.	57
Imagen 18 – Analisador elementar C/N via combustão seca do departamento de solos e recursos naturais da Udesc Lages – SC.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema utilizado para demarcação dos pontos de coleta de Nitossolo Bruno em fazenda no município de Campo Belo do Sul - SC.....	45
Figura 2 - Esquema demonstrando a formação de uma repetição verdadeira com a coleta de três subamostras de solo com estrutura preservada em cada camada das cinco repetições.....	47
Figura 3 – Esquema demonstrativo da coleta de amostras de solo com estrutura alterada em cada repetição e camada, e a divisão em subamostras para análise de laboratório e formação de uma repetição verdadeira.....	48
Figura 4 – Fluxograma metodológico das coletas e respectivas análises físicas e químicas desenvolvidas no projeto.....	49
Figura 5 – Triângulo textural utilizado para a classificação da textura do Nitossolo Bruno descrito na área do experimento no município de Campo Belo do Sul - SC.....	62
Figura 6 – Densidade de partículas no Nitossolo Bruno do município de Campo Belo do Sul – SC, em áreas com diferentes usos na camada de 0-40 cm.....	63
Figura 7 – Diâmetro médio geométrico (DMG) de diferentes camadas do Nitossolo Bruno sob diferentes usos	64
Figura 8 – Grau de floculação do solo sob diferentes usos em diferentes camadas de um Nitossolo Bruno no município de Campo Belo do Sul – SC.	66
Figura 9 - Correlações de atributos químicos e físicos em três camadas do Nitossolo Bruno sob diferentes sistemas de uso no município de Campo Belo do Sul – SC.	67
Figura 10 – Comparação de atributos químicos em diferentes camadas de um Nitossolo Bruno sob mata nativa (MN) e floresta de pinus (FP) em Campo Belo do Sul – SC.	71
Figura 11 - Porosidade, água disponível (AD), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de aeração (CA) do Nitossolo Bruno sob floresta de pinus e área de pós-colheita florestal no município de Campo Belo do Sul – SC.....	74
Figura 12 – Atributos físicos de um Nitossolo Bruno sob floresta de pinus e em área de pós-colheita florestal	76
Figura 13 – pH e teores de Al, Ca, Mg, K e P no Nitossolo Bruno sob pastagem implantada após colheita florestal com diferentes anos de condução em comparação a área pós-colheita florestal em Campo Belo do Sul - SC.	79
Figura 14 – Resistência a penetração (RP) e condutividade hidráulica saturada (Ksat) de um Nitossolo Bruno sob pastagem implantada após colheita de pinus com um (P1), três (P3) e cinco (P5) anos de condução comparadas à área de pós-colheita florestal (COL).	83

Figura 15 – Atributos físicos de um Nitossolo Bruno sob pastagem implantada após colheita de pinus com um (P1), três (P3) e cinco (P5) anos de condução comparadas à área de manejo pós-colheita florestal (COL).	85
Figura 16 – Curva de retenção de água de um Nitossolo Bruno do município de Campo Belo do Sul sob diferentes usos.	87
Figura 17 – Estoque de Carbono de um Nitossolo Bruno onde houve mudança de uso de pinus para pastagem, utilizado por um, três e cinco anos com pastejo em comparação à área de colheita florestal no município de Campo Belo do Sul–SC.	89
Figura 18 – Estoque de Carbono de um Nitossolo Bruno utilizado por um, três e cinco anos com pastagem implantada após colheita florestal de pinus em comparação à área de mata nativa no município de Campo Belo do Sul – SC.....	90
Figura 19 – Análise de componentes principais de atributos do Nitossolo Bruno sob diferentes sistemas de uso em três camadas no município de Campo Belo do Sul – SC.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características das máquinas utilizadas na colheita florestal mecanizada "cut-to-length" na área do experimento no município de Campo Belo do Sul - SC.....	39
Tabela 2 - Áreas com diferentes usos e respectivas representações em dois anos de coleta (2020 e 2021) de amostras do Nitossolo Bruno.	44
Tabela 3 – Porcentagem de classes de agregados e diâmetro médio geométrico de diferentes camadas do Nitossolo Bruno sob diferentes usos no município de Campo Belo do Sul – SC.....	65

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 – Aspecto da paisagem de relevo suave ondulado a ondulado e predomínio de Nitossolos na área da realização do experimento no município de Campo Belo do Sul – SC.....	97
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 OBJETIVOS	23
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	24
3.1 ATIVIDADE ECONÔMICA NO PLANALTO SUL CATARINENSE	24
3.2 A COLHEITA FLORESTAL.....	25
3.3 EFEITO DO MANEJO FLORESTAL NOS ATRIBUTOS DO SOLO	26
3.3.1 Atributos físicos	26
3.3.2 Atributos químicos	30
3.4 MANEJO DE PASTAGEM E A INTERFERÊNCIA NO SOLO	32
3.5 MATÉRIA ORGÂNICA E CARBONO EM DIFERENTES SISTEMAS	33
4 HIPÓTESES DE TRABALHO	36
5 MATERIAL E MÉTODOS	37
5.1 ÁREA DE ESTUDO	37
5.2 MANEJO DO PINUS	38
5.2.1 Colheita e pós-colheita florestal	39
5.3 IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DA PASTAGEM.....	41
5.4 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO E SISTEMAS DE USO	43
5.5 COLETA DAS AMOSTRAS	46
5.6 PREPARO DAS AMOSTRAS.....	48
5.7 ANÁLISES FÍSICAS	50
5.7.1 Granulometria e grau de floculação	50
5.7.2 Densidade de partículas	52
5.7.3 Densidade, porosidade e curva de retenção de água	52
5.7.4 Condutividade hidráulica saturada	54
5.7.5 Resistência do solo à penetração	55
5.7.6 Estabilidade de agregados em água.....	56
5.8 ANÁLISES QUÍMICAS	57
5.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA	59
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
6.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO	61
6.1.1 Granulometria	61
6.1.2 Densidade de partículas	62

6.1.3 Estabilidade de agregados	64
6.2 COMPARAÇÃO NO TEOR DE NUTRIENTES EM ÁREA DE PINUS E MATA NATIVA	68
6.3 EFEITO DA COLHEITA DO PINUS EM ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO .	73
6.4 MUDANÇAS EM ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO APÓS IMPLANTAÇÃO DE PASTAGEM EM ÁREA DE COLHEITA FLORESTAL.....	78
6.5 AVALIAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO SOB PASTAGEM E COLHEITA DE FLORESTA DE PINUS	88
6.6 AGRUPAMENTO DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO SOB DIFERENTES USOS	91
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95
ANEXOS	97
REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

A região dos Campos de Lages ou Serra Catarinense é composta por 18 municípios e tem histórico de economia baseada na agricultura, pecuária e silvicultura. Desde o início da história do povoamento no local, nos anos 1700, até os anos 1940, a pecuária dominou os campos naturais da região, quando então a produção de origem florestal se tornou a principal atividade econômica, inicialmente com a extração de araucárias (*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze) e outras espécies nativas (FLORIANI; FERT NETO, 2011). Na década de 1950 e 60, no auge do ciclo da madeira, a região era a principal economia do estado de Santa Catarina (SC) (AMURES, 2011).

O declínio desse ciclo fez com que a região enfrentasse uma queda de arrecadação e perdas econômicas (SILVEIRA, 2005), mas intensificou a atividade de reflorestamento com espécies exóticas, em especial o pinus (FLORIANI; FERT NETO, 2011).

Até hoje, o estado de SC, principalmente a região serrana, é destaque nacional na produção madeireira com *Pinus* spp. A indústria de celulose consome parte desta produção. Segundo o censo agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2017 (IBGE, 2019), o estado catarinense tinha 918 mil ha de área reflorestada, superior à registrada no censo de 2006 (621.512 ha). Já um estudo mais recente, tendo como base o ano de 2021 (ACR, 2022), mostra que a área de plantio comercial em SC aumentou aproximadamente 12%, para 1,03 mi ha de área reflorestada. Desse total, 713 mil ha (69%) são de pinus.

Segundo relatos de produtores, na região serrana a redução da área cultivada tem uma explicação: diversos proprietários de terras que utilizaram suas áreas com reflorestamento há anos, estão vendendo sua produção e mudando para a produção de grãos e/ou pastagens devido à valorização e maior fluxo econômico de culturas como milho, soja (SPELTZ; ALMEIDA, 2021), feijão e carne bovina, e a falta de incentivo e recursos financeiros para seguir na atividade florestal.

A colheita florestal utiliza diversas máquinas e implementos pesados, como as máquinas de corte (Harvester e Feller) e de extração (Skidder e Forwarder), além do intenso tráfego de caminhões para o transporte da madeira. Diversos estudos indicam que esse manejo degrada os solos (COSTA, 2013; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007; SZYMCZAK et al., 2014) e como a colheita florestal ocorre em quaisquer condições de tempo e umidade esse efeito é potencializado. O deslocamento de máquinas em solo com

umidade (consistência plástica) que favorece a compactação é um grave problema no manejo de colheita (BEUTLER et al., 2008; RADFORD et al., 2000).

Dessa maneira, a avaliação da estrutura física e hídrica do solo é importante no manejo de áreas cultivadas, principalmente onde há utilização de máquinas pesadas. Este fator altera a micromorfologia do solo, eleva a quantidade de microporos e reduz os macroporos (SAMPIETRO; LOPES; REICHERT, 2015), enquanto na questão hídrica, reduz a infiltração, retenção e disponibilidade de água às plantas (HOLTHUSEN et al., 2018; MCGEARY et al., 2022).

Prejuízos nos atributos químicos e físicos afetam capacidade produtiva do solo e o desenvolvimento das espécies cultivadas após a colheita do pinus. Conhecer o comportamento do solo após a colheita é importante para os agricultores que estão mudando o sistema de uso de suas áreas, os quais poderão saber se o manejo adotado é suficiente para o cultivo ser viável nos primeiros anos após a colheita florestal.

As modificações que ocorrem no carbono (C) e na matéria orgânica do solo (MOS) é outra preocupação após a remoção de floresta (natural ou exótica) e transição para um cultivo anual ou para pastagens. O C dos solos de floresta é um importante componente do ciclo global do C, para manter a sustentabilidade do sistema florestal. A reciclagem dos nutrientes depende de organismos heterotróficos presentes no solo, e esses organismos dependem do C como principal fonte de energia (VANCE, 2000). O C também é o principal componente da MOS, a qual confere importantes propriedades químicas, físicas e biológicas (REICHERT et al., 2022; SIX et al., 2004; WANDER, 2004).

Quando há remoção de florestas para implantação de culturas de menor porte, especialmente as de ciclo anual (grãos ou pastagens), o solo normalmente tem seu pH e teor de nutrientes corrigido, o que acelera a ação de microrganismos, e é manejado mecanicamente, havendo a exposição de partículas que antes estavam aprisionadas no subsolo às intempéries ambientais e a ação microbiana.

Apesar do conhecimento já divulgado sobre o comportamento de solos em sistemas florestais, agrícolas e pecuários, esses estudos são na sua quase totalidade realizados de maneira singular, sem haver uma sequência, de modo que não é possível compreender a evolução dos atributos do solo em uma cronossequência ou sucessão de uso do solo. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar atributos físicos e químicos de um Nitossolo Bruno reflorestado com *Pinus taeda* L., após manejo de colheita do pinus,

com pastagem implantada após a colheita florestal com diferentes idades (1, 3 e 5 anos de implantação) e uma área de mata nativa, considerada controle.

2 OBJETIVOS

Avaliar o impacto da atividade silvícola e da mudança de uso do solo nas características físicas e químicas do solo.

Verificar se há modificação no estoque de carbono orgânico total na sequência de Floresta de Pinus > Colheita Florestal > pastagem de 1, 3 e 5 anos e comparar esse estoque de carbono do solo manejado com o de mata nativa.

Compreender as mudanças que ocorrem nos atributos químicos do solo no sistema de uso com floresta de pinus, dias após a colheita do pinus, e em área de diferentes idades, onde foi implantada de pastagem anual após colheita florestal. Todas essas modificações químicas comparar em relação ao solo de uma mata nativa, considerada controle.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ATIVIDADE ECONÔMICA NO PLANALTO SUL CATARINENSE

Segundo a obra de Costa (1982), a atividade econômica da região sempre esteve ligada a produção agrícola, pecuária e comércio dos produtos oriundos dessas atividades. Já no início do século XVIII a região passou a ser explorada com maior intensidade, visto a abertura de caminho na região para a passagem de tropeiros que transitavam de Viamão – RS para Sorocaba – SP. A região era um ponto de parada estratégico, isso pelo fato de existirem extensos campos que permitiam a alimentação dos animais utilizados para o transporte das mercadorias. Inicialmente eram feitas algumas trocas comerciais utilizando feijão, milho, erva-mate, animais e produtos derivados da produção do gado (charque e couro).

Devido a importância que a região demonstrou, e para proteger da ocupação espanhola, fundou-se em 1766 a vila Nossa Senhora dos Prazeres das Lajens. Na época, os fazendeiros da região foram orientados a manter uma moradia fixa na vila para que ocorresse a expansão urbana.

Durante anos a atividade econômica regional foi baseada na produção agrícola e pecuária, até os anos 1940, quando iniciou o “ciclo da madeira”. No auge deste ciclo (1950-1960), a região era uma das, senão a principal economia de SC (GEISER, 2006).

Em alguns anos, a Araucária praticamente desapareceu dos campos, restando da cobertura original 4 a 6% por volta de 1980 (HILDEBRANDO, 2017). Vendo o esgotamento dos recursos nativos, o final do ciclo da madeira a partir de 1960 coincide com o início de um novo: a exploração de espécies exóticas, especialmente o *Pinus spp.*, impulsionado em 1968 pela aprovação de programa de incentivos fiscais para a atividade (HOFF; SIMONI; BRAND, 2006) e fornecimento de mudas para reflorestar as áreas desmatadas, no entanto, os principais responsáveis pelo reflorestamento comercial já nos anos 1980 eram as empresas de papel e celulose, que passaram a ter a maioria dos estoques da região (GEISER, 2006).

Atualmente a área plantada de *Pinus* em SC é de mais de 700 mil hectares, e corresponde a 35% do total nacional (ACR, 2022). No entanto, essa área ainda pertence, em sua maioria a empresas florestais principalmente de papel e celulose.

Segundo relato de produtores, pessoas que possuem áreas pequenas não estão mais competindo e o reflorestamento nos últimos anos não tem gerado o retorno esperado, e

por isso há migração para outras atividades de maior rentabilidade com retorno financeiro constante, como agricultura (cultivo de soja, milho e feijão) ou pecuária (produção de gado de corte).

Na última década a pecuária retornou com muita força nos “campos de Lages”, basicamente em sistema de pastagens anuais cultivadas ou em sistema de rotação de culturas. Nesse sistema, com pastejo rotacionado, o produtor utiliza uma lotação alta que lhe garante maior retorno financeiro (LAGES, 2021).

3.2 A COLHEITA FLORESTAL

O setor florestal está em constante evolução para atender as exigências do mercado. Para ter o melhor aproveitamento dos recursos e do tempo, a mecanização da colheita está cada vez mais moderna (SANTOS et al., 2013). É necessário um planejamento minucioso da atividade, selecionando os equipamentos e métodos adequados que garantam um manejo com menor impacto laboral, financeiro e ambiental.

A primeira etapa do processo é o corte, e compreende as operações de derrubada, desgalhamento, descascamento, toragem, destopamento e empilhamento. Para essa operação, o método mecanizado, ou seja, com máquinas e implementos modernos e pesados é predominante nos dias de hoje, e representa elevado investimento e necessidade de estrutura e pessoal capacitado (SANT’ANNA, 2014). Os equipamentos mais comuns nessa fase são: Feller; Feller-buncher; e Harvester.

A segunda etapa da colheita é a extração, ou movimentação da madeira do local de corte até a estrada florestal ou pátio. A extração por arraste é a mais danosa, pois a movimentação das toras é feita com ela toda ou parcialmente apoiada sobre o solo (RODRIGUES, 2018). Nessa etapa, as máquinas mais comuns são o skidder, forwarder ou trator agrícola com implemento de carregamento ou arraste.

A terceira e última etapa consiste no carregamento da madeira no veículo de transporte, que ocorre no pátio ou na beira da estrada florestal. Trabalhos demonstram que essa operação degrada o solo, pois concentra as passadas de implemento e veículos numa área restrita (CAMBI et al., 2017; COSTA et al., 2016). Para esse serviço, são utilizados tratores agrícolas com implemento de “pinças”, forwarder ou caminhões autocarregáveis.

Todas essas fases demandam muita mão-de-obra, desgaste do trabalhador e elevado risco de acidentes, até por isso, a colheita representa os maiores custos nesse

setor. Segundo Machado et al. (2014) pode representar mais da metade do custo final do produto.

Além disso, tem-se os riscos ambientais, principalmente relacionados às condições do solo no pós-colheita, objeto deste estudo.

3.3 EFEITO DO MANEJO FLORESTAL NOS ATRIBUTOS DO SOLO

A expansão do setor demandou a modernização da colheita com máquinas pesadas, as quais circulam no povoamento florestal principalmente no momento do corte raso e isto tem causado problemas, sobretudo de ordem ambiental, relacionado à degradação do solo por compactação, alteração de atributos químicos e biológicos (CAMBI et al., 2017; SAMPIETRO; LOPES, 2011).

A intensa movimentação que há no solo decorrente das operações de colheita e preparo do solo para implantação de culturas no pós-colheita da floresta causa a compressão dos agregados, que aumenta a densidade do solo, modifica o sistema poroso, a retenção de água no solo (HOLTHUSEN et al., 2018) e a resistência mecânica à penetração (ANDOGNINI et al., 2020). Com isso, os fluxos de água, gases (oxigênio e dióxido de carbono) e nutrientes podem limitar o desenvolvimento das plantas (FOLONI; LIMA; BÜLL, 2006; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

3.3.1 Atributos físicos

A partir da década de 90, principalmente, o setor florestal utilizou máquinas importadas com grande capacidade operacional. Um dos principais efeitos do tráfego de máquinas pesadas (maior massa) é a compactação ou o rearranjo das partículas de solo (REICHERT; REINERT; SUZUKI, 2010).

A compactação é o resultado da aplicação de uma carga que pressiona o solo, aumenta a densidade, a resistência a penetração e o volume de microporos, e reduz a porosidade total, a macroporosidade, a infiltração, a condutividade hidráulica e as trocas gasosas (BLAINSKI et al., 2008; KELLER et al., 2019; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007). A compactação pode ocorrer naturalmente devido a dispersão das argilas, ao crescimento de raízes de plantas, a energia cinética das gotas da chuva, aos ciclos de congelamento e descongelamento e de umedecimento e secagem do solo

(HILLEL, 1998), mas atinge níveis mais elevados quando induzido por atividades humanas.

A intensidade da compactação varia com a granulometria do solo, a densidade inicial, o teor de matéria orgânica, a cobertura de resíduos, a umidade no momento do manejo, ao tipo de máquina e a intensidade de rodagem (ANDRADE et al., 2017; JAMSHIDI et al., 2008; WARKOTSCH, 1994).

Solos argilosos são os mais procurados na agricultura pela sua conhecida qualidade. Geralmente ocorrem em regiões de relevo não accidentado, são mais profundos e têm interferência direta na retenção e na disponibilidade de água (REICHERT et al., 2009) e na capacidade de troca de cátions (CIOTTA et al., 2003). Apesar disso, são mais suscetíveis à compactação, pois o tamanho das partículas favorece a reorganização dessas e o aumento da densidade (BAVER; GARDNER; GARDNER, 1972). Portanto, deve-se ter cuidado com as operações nesse tipo de solo, principalmente se tratando da umidade do solo, evitando trânsito quando o solo está com umidade ideal de compactação (FAUSTINO; MARCIANO, 2021; PASSOS et al., 2017), ou seja, quando está com consistência plástica. O conhecimento sobre a relação da umidade com a suscetibilidade dos solos à compactação é construído há longos anos (PROCTOR, 1933; HOGENTOGLEB, 1936) e se fortalece até hoje com o estudo em diferentes tipos de solo.

A avaliação da densidade do solo em si não permite concluir se um solo está compactado (REINERT et al., 2008), pois é um atributo que varia com o teor de matéria orgânica e a granulometria do solo. Desse modo, é importante conhecer outros atributos que forneçam informações suficiente para que possamos afirmar que um solo esteja compactado (NAWAZ; BOURRIÉ; TROLARD, 2013).

Segundo estudos realizados por Szymczak et al. (2014) em um Latossolo Vermelho, as operações de colheita compactam a camada superficial (até 10 cm), principalmente nas linhas de tráfego, e a maior biomassa residual é importante para minimizar este efeito. Já em um Cambissolo Húmico, Costa et al. (2016) verificaram compactação até uma profundidade de 60 cm em pontos de alta perturbação, ou seja, a intensidade dependeu do tipo e intensidade do tráfego aplicado. Nesse mesmo estudo foi verificado que a porosidade, a capacidade de aeração, a estabilidade de agregados e a condutividade hidráulica foram os atributos mais prejudicados, e ressalta a hipótese da degradação de atributos hídricos através da modificação da porosidade, constatação também descrita por Reichert; Suzuki; Reinert (2007).

Cambi et al. (2017) verificaram aumento de 27% na densidade e 46% na resistência a penetração do solo quando aplicadas 25 passadas de trator em comparação a 10 passadas, além da redução da porosidade em 11%. Concluíram que houve compactação do solo e essa afetou o desenvolvimento das raízes da cultura cultivadas após à colheita. Na literatura, há registros que o limite de 2,5 MPa é restritivo para muitas árvores (GREACEN; SANDS, 1980; WHALLEY; DUMITRU; DEXTER, 1995), enquanto para culturas anuais a literatura cita limite crítico de 2 MPa (CAVALCANTI et al., 2019; LIMA et al., 2012; SILVA et al., 2008; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

Avaliando um Latossolo Vermelho com penetrômetro de bancada, Moraes et al. (2014) concluíram que o limite de 2 MPa citado como limitante é inadequado para esse solo e sugere ampliar para 3,0 ou 3,5 MPa no sistema plantio direto. Já em estudo também com solos argilosos e muito argilosos do sul do Brasil Andognini et al. (2020) não verificaram redução na massa seca nem na taxa de crescimento de parte aérea de aveia preta quando cultivada no solo compactado com RP próxima a 10 MPa, também verificado em penetrômetro de bancada. Ambos os estudos verificaram a RP nas amostras com umidade equilibrada a 10 kPa.

A redução dos poros no processo de compactação altera a composição da atmosfera do solo (GOUTAL; RENAULT; RANGER, 2013). Magagnotti et al. (2012) verificaram que numa plantação de *Pinus* em solo franco argiloso, a concentração de dióxido de carbono (CO₂) dobrou no ponto de rodado das máquinas, Gaertig et al. (2002) verificaram essa concentração três vezes maior num povoamento de Carvalho, o que reduziu a densidade de raízes nesses locais. A limitação de oxigênio (O₂) no solo prejudica a respiração e crescimento de raízes (SHAHEB; VENKATESH; SHEARER, 2021) e desenvolvimento de microrganismos do solo (BUSMAN et al., 2021).

A infiltração e movimentação de água no solo pode tanto ser afetada pela redução da macroporosidade quanto pelo selamento do solo. A queima dos resíduos florestais pode modificar algumas características do solo pois há remoção do material orgânico da superfície e modificações na fauna do solo. Partículas de cinza podem se aprofundar e entupir poros, reduzir a porosidade e consequentemente a infiltração e a condutividade hidráulica.

Com o intuito de avaliar esse efeito, (PLAZA-ÁLVAREZ et al. (2019) estudaram em florestas de pinus no mediterrâneo o efeito da queima na condutividade hidráulica do solo, e verificaram que não houve diferença entre tratamento com e sem queima. Por outro lado, a queima pode aumentar a hidrofobicidade da camada superficial, e desse

modo reduzir a infiltração de água nos primeiros centímetros do solo (LUCAS-BORJA et al., 2022).

Quando se refere ao efeito da movimentação de máquinas na estrutura do solo em diferentes profundidades, a literatura nos mostra que o prejuízo na estrutura é menos intenso quanto maior for a profundidade (COSTA et al., 2016; SZYMCZAK et al., 2014). Num Andossolo nos EUA, em profundidade próxima dos 25 cm, por exemplo, as modificações de densidade do solo após tráfego com implementos florestais praticamente não foram mais visíveis (HAN et al., 2009). Em um solo de textura média, Mcnabb et al. (2001) verificaram resultados semelhantes, enquanto Williamson e Neilsen (2000) em solos argilosos e arenosos em profundidade abaixo dos 30 cm não mais verificaram alterações. Por outro lado, estudando um solo de textura franco-siltosa no Irã, Jourgholami et al. (2014) não verificaram alterações na densidade, na resistência a penetração e na porosidade do solo da superfície comparadas com as da camada de 20 cm. Portanto, não se pode estabelecer uma regra onde a influência do manejo de colheita florestal influencia os atributos do solo com maior intensidade na superfície, pois essas modificações dependem de fatores edáficos, do maquinário e da intensidade do manejo.

Outro manejo que tem potencial de alterar atributos físicos do solo é a queima, o que é comum nas áreas de colheita de pinus do Planalto Sul Catarinense. Entretanto, as informações a respeito de características físicas influenciados pelo fogo são escassas se comparado a o mesmo efeito na química e biologia do solo (FONTÚRBEL et al., 2021).

A queima controlada dos resíduos é definida como o uso do fogo de maneira planejada e definida numa área delimitada (IBAMA, 2017), mas se aplicado de maneira indiscriminada e indevida causa danos ao ambiente (CARDOSO et al., 2003).

O capítulo IX, art. 38 I da Lei nº12.651 de 25 de maio de 2012 (Novo Código Florestal Brasileiro) (BRASIL, 2012), diz que:

“É proibido o uso de fogo na vegetação, exceto nas seguintes situações: em locais ou regiões cujas peculiaridades justifiquem o emprego do fogo em práticas agropastoris ou florestais, mediante prévia aprovação do órgão estadual ambiental competente do Sisnama, para cada imóvel rural ou de forma regionalizada, que estabelecerá os critérios de monitoramento e controle”.

Um dos primeiros problemas que ocorre com a queima de resíduos sobre o solo é o aquecimento da camada superficial, e com isso maior evaporação da água superficial (HERINGER et al., 2002) e formação de uma camada seca, coesa de maneira que dificulta a entrada de água no perfil (REDIN et al., 2011).

A queima de resíduos e a mineralização da matéria orgânica altera a estrutura do solo, e faz com que partículas pequenas de solo e cinzas adentrem o perfil ocupando vazios (FREITAS; SANT'ANNA, 2004), ou seja, há diminuição do volume de macroporos, aumento dos micros, e por consequência redução na taxa de infiltração, aumento da densidade e resistência a penetração do solo (ANDOGNINI et al., 2020; COSTA et al., 2016).

Em estudo avaliando efeito da queima de canavial nas características de um Argissolo Amarelo, Ceddia *et al.* (1999) verificaram que houve redução do diâmetro médio ponderado dos agregados e aumento da densidade do solo na camada superficial (0-5 cm). Abaixo da camada superficial, os autores não verificaram alterações. Estudos demonstram que o efeito da queima na densidade do solo varia de acordo com a intensidade e a frequência do fogo, quanto maior, maior será a densidade, resposta atribuída a repetida oxidação da matéria orgânica (BOYER; MILLER, 1994; GODWIN; KOBZIAR; ROBERTSON, 2017).

3.3.2 Atributos químicos

O crescimento e desenvolvimento de um povoamento florestal de pinus na região serrana catarinense permite produtividade de 30 a 45 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (LAMBERT, 2018) o que demanda grande quantidade de nutrientes.

Fatores biofísicos e biológicos ligados ao solo e que interagem são responsáveis pela ciclagem de nutrientes, e, portanto, responsável por parte do estado nutricional do pinus. Nesse sentido, a nutrição das florestas ocorre através da adubação e da decomposição da matéria orgânica do solo e da serapilheira. Essa decomposição é dependente dos organismos – macro, meso e microfauna – e intervenções no solo podem afetar suas atividades. Em um estudo avaliando diferentes métodos de manejo de um povoamento florestal de *Pinus radiata* no incremento do diâmetro das árvores, Garrett *et al.* (2021) verificaram que os resíduos da floresta e a MOS são importantes no desenvolvimento das árvores a longo prazo em áreas de baixa fertilidade.

O revolvimento excessivo do solo e o impacto do trânsito de máquinas com potencial compactação causada por esse manejo interfere, portanto, nos atributos químicos do solo, pois modifica a retenção e o movimento de água, que impacta diretamente na composição, multiplicação e atividade microbiana no solo.

A intensa movimentação decorrente das operações de colheita e preparo do solo para implantação de pastagens causa a compressão dos agregados. Isso aumenta a densidade do solo, modifica o sistema poroso, a retenção de água (HOLTHUSEN et al., 2018) e a resistência mecânica do solo à penetração (ANDOGNINI et al., 2020) . Com isso menor fluxo da água, de gases (O_2 e CO_2) e de nutrientes podem limitar o desenvolvimento das plantas (FOLONI; LIMA; BÜLL, 2006; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

Em um povoamento de *Pinus taeda* L. a deposição anual de serapilheira chega a 7 Mg ha⁻¹ (PIOVESAN et al., 2012), e sua ciclagem é a principal responsável pelo estado nutricional da floresta. No entanto, após o corte raso duas situações podem ocorrer: (i) interferência na comunidade de fungos do solo prejudicando espécies promotoras de crescimento vegetal; e (ii) favorecimento de espécies decompositoras da serapilheira estimulado pelo fluxo de material da parte aérea e raízes derivados do corte raso. Essa dinâmica que ocorre no solo afeta o fornecimento de nutrientes para as plantas. O estado nutricional do solo é sensível à remoção da biomassa durante a colheita, sendo o sistema de colheita que remove apenas o caule menos prejudicial do que o sistema que remove caule e copa do pinus (ACHAT et al., 2015).

O manejo de queima controlada também afeta a fertilidade no período pós-colheita florestal. Na região serrana catarinense, esse é um manejo tradicional em pastagens e florestas. Rheinheimer et al. (2003) observaram que nessa região a queima do campo nativo de um Cambissolo Húmico aumentou o teor de potássio, cálcio, magnésio e o pH, e reduziu o alumínio trocável, devido a formação das cinzas, mas essa mudança persiste por pouco tempo. O argumento para essa maior disponibilidade de nutrientes é de que a combustão do material orgânico mineraliza os nutrientes que ficam prontamente disponíveis para as plantas.

Em contrapartida, a ação frequente e com alta intensidade do fogo numa área provoca perda de nutrientes (JHARIYA; SINGH, 2021) nas partículas de fumaça, na volatilização do N, nas cinzas carreadas com o vento, nas perdas decorrentes da erosão do solo e na lixiviação de partículas pequenas (HINOJOSA et al., 2021; PELLEGRINI et al., 2018). A mesma conclusão sobre a queima recorrente foi obtida por Heringer et al. (2002) e Dick et al. (2008) em Latossolo Vermelho na região dos Campos de Cima da Serra no Rio Grande do Sul.

Nos solos com floresta a quantidade de biomassa geralmente é mais expressiva, e esse material seria mineralizado gradativamente no tempo, mas com a queima o processo

é imediato e os nutrientes ficam disponíveis para serem absorvidos pelas plantas e até mesmo serem perdidos pela erosão hídrica. Como a absorção é gradativa as perdas podem ser significativas (FREITAS; SANT'ANNA, 2004).

No contexto geral, a ação do fogo desencadeia modificações físicas, químicas e biológicas que de maneira direta ou indireta interferem na fertilidade do solo. Inicialmente há um enriquecimento do solo em nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, etc), favorável ao crescimento das culturas, mas os efeitos indiretos como remoção da cobertura do solo e exposição da camada superficial promove a erosão, a mineralização dos nutrientes, a lixiviação, a mineralização da matéria orgânica e a volatilização do N, o que reduz o teor de nutrientes.

Análises químicas do solo após a colheita florestal é de extrema importância para conhecer as necessidades do solo e planejar corretamente a adubação e calagem para a cultura sequente. De acordo com os resultados de pesquisa, logo após a prática de queima os nutrientes ficam mais disponíveis, mas as perdas que ocorrem são mais intensas que no ambiente sem queima. Não há muitas informações sobre esse assunto, e por isso é importante analisar os nutrientes nesses sistemas de manejo das culturas e do solo.

3.4 MANEJO DE PASTAGEM E A INTERFERÊNCIA NO SOLO

A produção pecuária é uma das mais importantes atividades agrícolas em todo o mundo, e a alimentação em pastagens é a maneira mais comum de produzir animais, por isso é considerado o setor de maior uso da terra no planeta (LAI; KUMAR, 2020).

Em função da relevância do setor é importante minimizar os riscos ambientais, como a degradação do solo (NORDBORG; ROOS, 2016). Os fatores que mais afetam o solo nesse sistema são intensidade do pastejo, ou seja, a proporção da forragem total presente numa área que é removida por ocasião do pastejo, e o manejo mecânico em pastagens anuais. Os impactos causados incluem principalmente a compactação do solo devido à pressão exercida pelos cascos e trânsito de máquinas e implementos (BOTTA et al., 2020; VALANI et al., 2022). No sistema de pastejo rotacionado o pisoteio do gado é considerado o principal fator de compactação.

Isolando outros fatores, solos com partículas de tamanho menor tendem a ser mais suscetíveis a compactação, pois facilita o rearranjo e preenchimento de vazios, pelo aumento da coesão e adensamento (BAVER; GARDNER; GARDNER, 1972), que por consequência reduz a aeração e infiltração de água e eleva a resistência à penetração das

raízes (BOENI et al., 1997; VALANI et al., 2022; WAGGER; DENTON, 1989). Em solos argilosos, por exemplo, a umidade ideal (capacidade de campo) é importante para evitar a degradação, mas com a permanência do gado há pressão nas mais variadas faixas de umidade (BUENO; VILAR, 1998).

O pisoteio tende a compactar a superfície do solo (ALBUQUERQUE; SANGOI; ENDER, 2001) com prejuízos na infiltração de água e ar, nas trocas gasosas e no crescimento das plantas. Testando áreas com pastagem cultivada em solos distintos (arenoso bem drenado e argiloso mal drenado) no Reino Unido e com incremento do pisoteio e peso de máquinas, Hargreaves *et al.* (2019) verificaram compactação nos dois solos e redução do rendimento de matéria seca da forragem em três anos de avaliações.

Avaliando o comportamento de aveia cultivada em quatro solos com diferentes graus de compactação, Andognini *et al.* (2020) concluíram que há redução do crescimento e produção de massa seca da pastagem nos maiores níveis de compactação, com aumento da resistência a penetração das raízes e redução da macroporosidade e da condutividade hidráulica.

Em contrapartida, num estudo na região centro-sul da Pensilvânia, o pastejo rotacionado, monitorado para manter 50% de biomassa para cobertura e proteção do solo, preserva as propriedades biológicas e fisico-hídricas do solo, além de dar mais rentabilidade à atividade (PANT *et al.*, 2022).

3.5 MATÉRIA ORGÂNICA E CARBONO EM DIFERENTES SISTEMAS

A matéria orgânica do solo tem papel importante em todos os tipos de solo, é fonte de nutrientes, complexa elementos tóxicos, dá estabilidade à estrutura, auxilia nos processos hídricos (infiltração e retenção de água), é fonte de energia para a biota do solo etc.

Em diferentes sistemas o componente orgânico é afetado, visto que há mudanças no manejo que afetam a umidade e temperatura do solo, tipo material vegetal incorporado, alteração na estrutura que afeta a proteção física, mudanças nas populações de microrganismos, entre outros fatores que favorecem o acúmulo ou a decomposição do material orgânico.

O solo sob vegetação natural tem milhares de anos de evolução e passou por diversos processos físicos, químicos e biológicos. As propriedades mais importantes que

fazem com que esse solo natural seja estável e sustente tanta vida é o material orgânico que se acumula no perfil, em especial na superfície.

Nos solos brasileiros, de clima tropical e subtropical, a matéria orgânica (MO) representa uma pequena proporção dos constituintes sólidos, no entanto tem função essencial nas propriedades físicas, na disponibilidade de nutrientes, na manutenção da biota e consequentemente na capacidade produtiva e sustentabilidade (MIELNICZUK, 2008).

Carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio são os principais constituintes da MO, sendo o C proporcionalmente mais presente. Na fração húmica (mais velha, reativa e recalcitrante) a concentração varia entre 40 e 50%.

O solo é o maior sumidouro de C do mundo, armazena o triplo que a atmosfera e a vegetação (SCHARLEMANN et al., 2014), e isso é importante para diminuir o efeito nocivo do excesso de gás carbônico (CO₂) e metano (CH₄) na atmosfera.

Num ambiente natural o balanço de C é positivo, ou seja, há mais entradas que saídas. A partir do momento que o ambiente é perturbado e o solo é exposto às intempéries a degradação da matéria orgânica é acelerada e ocorre perda de C para a atmosfera.

Práticas de manejo florestal, principalmente a colheita, afetam a quantidade e a qualidade da MOS, bem como a composição da comunidade microbiana (HASSETT; ZAK, 2005). Analisando mais de 400 amostras em todo o mundo através de metanálise, Nave *et al.* (2010) relataram que há impacto da colheita florestal com redução do teor de C do solo, e estas perdas variam de acordo com a espécie cultivada e tipo de solo. Em outra metanálise, James; Harrison (2016) relataram redução média de 11% no teor de C do solo causada por práticas de colheita florestal, principalmente por perdas nas camadas superficiais.

Em consequência da redução do teor de MOS decorrente da mudança de uso da terra na transição de floresta para área agricultável, há decréscimo dos níveis de fertilidade do solo (SAMANI et al., 2018), principalmente na camada superficial, onde, proporcionalmente, há mais MOS. Entretanto, essa constatação pode ser mascarada pelo fato da adição de fertilizantes minerais pelos agricultores, incrementando teores de N, P, K, Ca e Mg, por exemplo.

Entretanto, poucos estudos relatam mudanças na matéria orgânica quando ocorre transição de uma área reflorestada para pastagem ou lavoura. Há relatos que a mudança de uso de floresta plantada ou nativa para pastagem incrementa o teor de C e N total do solo (SANTOS et al., 2019; SPARLING et al., 2014), mas depende da espécie utilizada

e de um manejo adequado após a colheita. Nesse caso faz-se necessário destacar a importância da profundidade do perfil avaliado: na maioria dos casos, amostras de superfície (até 10 cm) não são suficientes para obter respostas em pastagens, sendo necessário amostras até 40 cm em média. Outros estudos relatam que a mudança de uso da terra de floresta nativa para pastagem reduz o estoque de carbono (eCOT) (DALAL et al., 2021). Nesse caso faz-se necessário destacar a importância da profundidade do perfil avaliado: na maioria dos casos, amostras superficiais (até 10 cm) não são suficientes para obter respostas em pastagens, sendo necessário amostras até 40 cm em média (ALVES et al., 2008).

O que se sabe é que práticas insustentáveis de uso da terra, particularmente desmatamento para produção agrícola e intensificação da agricultura sem uso de práticas conservacionistas, reduz teor de MOS, C, e consequentemente o eCOT (EZE et al., 2023).

O eCOT é bastante utilizado junto com outros indicadores para indicar degradação ou recuperação dos solos, isso porque tem correlação com a estrutura do solo, o teor de matéria orgânica, o teor e a ciclagem de nutrientes, a atividade biológica etc.

Sistemas naturais normalmente possuem solos com alto eCOT e uma estrutura estável, enquanto solos de sistemas de produção intensiva em sua maioria tem estrutura mais frágil e eCOT menor que os naturais (SANTOS et al., 2019), ou seja, é altamente dependente do aporte intensivo de recursos externos (energia, equipamentos, água e nutrientes). Segundo Vicente *et al.* (2019) o eCOT é dependente do sistema de uso e do sistema de manejo, pois a maioria do C está protegido fisicamente pelos agregados do solo, e um sistema que causa degradação também promove a perda de C.

Há necessidade de se conhecer as mudanças que ocorrem na MO, C e eCOT do solo em diferentes sistemas e na mudança de uso das terras, visto a importância dessas características para a produção de plantas e equilíbrio do ecossistema. Além disso, sabe-se dos efeitos destrutivos dos gases de C na atmosfera, tal como efeito estufa e aquecimento global. Considerando a imensa diversidade de solos, de clima, de vegetação e da biota ao redor do mundo, as informações devem ser obtidas *in loco* para evitar conclusões equivocadas sobre o manejo de sistemas produtivos e vegetação natural.

4 HIPÓTESES DE TRABALHO

O cultivo de *Pinus* spp. em relação a mata nativa diminui os teores de nutrientes e o pH do solo, o que caracteriza déficit nutricional para as culturas sequentes.

A colheita mecanizada do *Pinus taeda* L. reduz a qualidade física do solo devido a compactação causada pelo tráfego das máquinas.

A implantação de pastagem em área onde foi realizada a colheita florestal pode recuperar, no curto prazo, a qualidade química, física e hídrica do solo, pois é realizada correção da fertilidade e da acidez periodicamente, bem como é mantida uma cobertura verde permanente.

A implantação de pastagem após colheita de pinus eleva o estoque de carbono orgânico total do solo para valores próximos da mata nativa.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no município de Campo Belo do Sul, em uma fazenda representativa das áreas de cultivo e das práticas de manejo adotada por produtores rurais da região do Planalto Sul Catarinense. O clima da região é mesotérmico húmido com verões amenos, se enquadra como Cfb de acordo com a classificação de Köppen. As chuvas são bem distribuídas ao longo do ano, com média anual da precipitação de 1.650 mm, e temperatura média de 16° C (ÁVILA et al., 2022; PANDOLFO et al., 2022).

O relevo é suave ondulado a ondulado, com altitude média de 900 m, a vegetação predominante é a floresta de araucárias e o material de origem é o basalto (Anexo 1). Um perfil de solo (Imagem 1) foi aberto e dividido em horizontes pedogenéticos de acordo com a estrutura, a granulometria, a consistência, a drenagem e a coloração. Em cada horizonte foram coletadas amostras com estrutura alterada para analisar granulometria, grau de floculação, densidade de partículas, cor seca e úmida, pH em água e em cloreto de potássio (KCl), teor de cátions básicos e ácidos e de matéria orgânica. Com estes dados, o solo foi classificado como “Nitossolo Bruno distrófico típico” (SANTOS et al., 2018).

Imagen 1 – Perfil de solo representativo da área de estudo no município de Campo Belo do Sul – SC. Localização: 27°54'41,76"S, 50°42'44,16"O.



Fonte: foto do próprio autor, 2021.

Na área existe floresta plantada (*Pinus taeda* L.) de diversas idades, áreas de colheita florestal, de pastagem melhorada para criação de gado de corte, de lavoura de grãos e de floresta nativa. Diversas atividades ocorrem simultaneamente na fazenda, e a atividade principal, que era a silvicultura, tem sido gradualmente alterada para bovinocultura de corte com engorda no pasto.

5.2 MANEJO DO PINUS

Antes da implantação da floresta de pinus, as áreas estudadas eram compostas de mata nativa. Na época da implantação do Pinus, a área foi preparada, corrigida e adubada para receber as mudas florestais. A quantidade de adubo colocada foi calculada para atingir os teores de 10 mg kg^{-1} de P, 100 mg kg^{-1} de K e uma média de 10 ton ha^{-1} de calcário para atingir $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} 6,0$. A informação sobre a quantidade de adubo utilizado não foi divulgada.

O plantio das árvores foi realizado em áreas/talhões de acordo com um planejamento, para que houvesse uma sazonalidade nas práticas de manejo e corte raso, ou seja, para não haver períodos ociosos na propriedade, de modo a otimizar mão-de-obra e estrutura geral.

Durante o período de condução da floresta, houve podas e desbastes em diferentes idades. Os resíduos florestais permaneceram sobre o solo por não ser viável economicamente sua comercialização, tanto restos de poda como muitas das árvores desbastadas.

Após o tempo de crescimento necessário para atingir altura e diâmetro requeridos para o mercado consumidor, a floresta passa pelo processo de corte raso para abastecer o mercado de madeira serrada, onde a floresta leva em torno de 20 anos para ser colhida.

O corte raso, como citado anteriormente, ocorre durante o ano todo na propriedade. Quando uma área atinge as medidas desejadas e a colheita florestal inicia, ocorre ininterruptamente até finalizar a parcela, independente de condições edafoclimáticas serem favoráveis ou não para essa atividade. Por esse motivo não é raro visualizar áreas com sinais de degradação do solo.

5.2.1 Colheita e pós-colheita florestal

A colheita florestal é uma operação complexa, com utilização de implementos para corte raso, derrubada, desgalhamento e fracionamento das toras, empilhamento e transporte das toras, além disso ainda há veículo para transporte externo.

O sistema de colheita é de toras longas (*tree-length*). O corte raso ocorre com um equipamento denominado “*feller buncher*”, o qual consiste em uma máquina de grande dimensão equipada com uma grua e cabeçote, o qual abraça, derruba e empilha as árvores. Após a derrubada e agrupamento das árvores, o “*skidder*” arrasta as toras à margem da estrada principal. As toras longas nos estaleiros à margem da estrada foram processadas e carregadas nos caminhões de transporte e destinadas ao cliente. Para facilitar a locomoção das máquinas e veículos no interior da floresta, um trator de esteira foi utilizado para abertura de estradas provisórias.

As características e especificações das máquinas podem ser visualizadas resumidamente na Tabela 1.

Tabela 1 - Características das máquinas utilizadas na colheita florestal mecanizada " *tree-length* " na área do experimento no município de Campo Belo do Sul - SC.

Equipamento	Descrição	Função
“Feller Buncher”	John Deere 903K, massa própria de 25.000 kg e locomoção por esteiras	Derrubada e empilhamento
“Skidder”	John Deere 984L, massa de 22.400 kg	Arraste
Escavadeira	John Deere 210G, massa de 22.000 kg	Destoca
Trator de esteira	John Deere 750J, massa de 18.000 kg	Abertura de estradas secundárias e amontoa
Trator	Valtra BM180, massa de 7.500 kg.	Outras funções

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

Após a remoção das árvores e toras da área faz-se a queima controlada dos resíduos remanescentes (Imagen 2).

Sequencialmente à queima inicia-se a remoção dos tocos das árvores. Uma broca perfuratriz acoplada a grua de uma escavadeira hidráulica realiza essa atividade. O toco do pinus é perfurado e o material lenhoso é “triturado”, ficando exposto à superfície do solo (Imagen 3). Este procedimento agiliza a atividade e tritura o material deixando-o

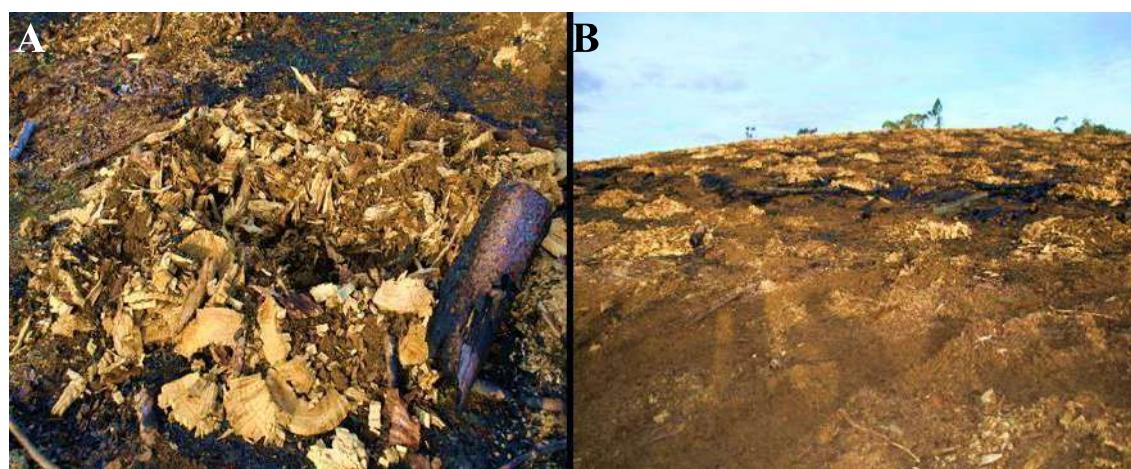
exposto ao sol e microrganismos com uma superfície de contato maior o que acelera a sua decomposição. No mês de junho de 2020, época da colheita do pinus (Imagem 3), a precipitação média registrada em pluviômetro da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de SC (Epagri) instalado na região de Campo Belo do Sul, foi de 136 mm, precipitação próximo da média da série histórica (EPAGRI, 2020).

Imagen 2 - Queima de resíduos de colheita florestal de pinus na área experimental no município de Campo Belo do Sul - SC.



Fonte: foto do próprio autor, 2020.

Imagen 3 - Aspecto visual individual (A) e na paisagem (B) dos tocos remanescentes de colheita do pinus perfurados com broca após a colheita florestal e queima dos restos de colheita.



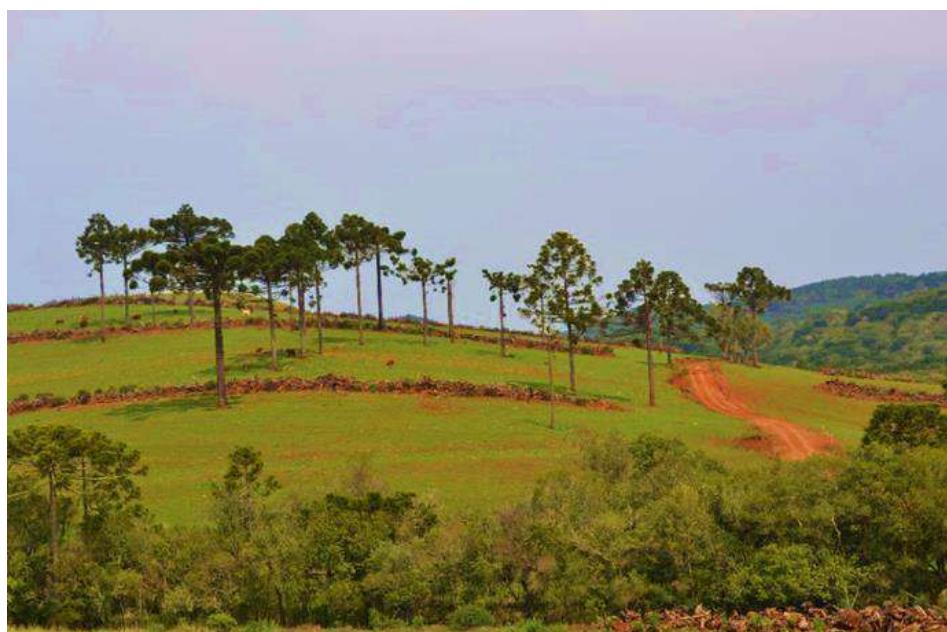
Fonte: foto do próprio autor, 2020.

Para finalizar o processo é feito o amontoamento dos resíduos em leiras ou monturos (Imagen 4) com o trator de esteira descrito na Tabela 1. Os resíduos que permanecem sobre o solo são arrastados formando leiras as quais são queimadas para

acelerar o processo de decomposição e liberação da área para o cultivo sequente. Em média, as leiras ocupam 10% da área produtiva.

O amontoamento dos resíduos também remove uma camada superficial do solo, que é levada para junto dos resíduos na leira, como pode ser observado na Imagem 5.

Imagen 4 - Remanescentes de colheita do pinus amontoados em leiras/monturos numa área de pastagem já implantada sobre Nitossolo Bruno em fazenda no município de Campo Belo do Sul - SC.



Fonte: foto do próprio autor, 2020.

5.3 IMPLANTAÇÃO E CONDUÇÃO DA PASTAGEM

Após o processo de colheita e manejo pós-colheita (queima, destoca e enleiramento), o solo foi preparado para a implantação da pastagem.

Inicialmente foi realizada a análise físico-química do solo para determinar o pH SMP e teor de nutrientes para a correção da acidez e dos teores de fósforo (P) e potássio (K). Foi utilizado calcário dolomítico e a adubação de correção e manutenção dos teores de P e K com superfosfato simples (SFS) e cloreto de potássio (KCl). Depois de aplicados eles foram incorporados com grade aradora na profundidade de 20 cm. Na implantação da pastagem a semeadura foi realizada “a lanço” e depois incorporada com grade leve. Do segundo plantio em diante a semeadura é realizada “em linha” (Imagen 5), onde a movimentação do solo é mínima.

A lavoura durante o ano intercala espécies estivais e hibernais, em cada estação são utilizadas variedades adaptadas às condições climáticas da região. Na primavera/verão normalmente espécies do gênero *Brachiaria*. No outono/inverno é cultivado o consórcio aveia (*Avena sativa L.*) + azevém (*Lolium multiflorum L.*).

Imagen 5 - Aspecto de uma área de Nitossolo Bruno recém brotada após semeadura da pastagem hibernal "em linha", com mínima movimentação de solo no município de Campo Belo do Sul - SC.



Fonte: foto do próprio autor, julho de 2021.

O método de pastejo utilizado é rotacionado, com a pastagem subdividida em piquetes (Imagen 6). O gado entra em cada piquete quando a pastagem atinge uma altura pré-determinada, e é direcionado a outro piquete quando rebaixa a pastagem até a altura de saída. A altura de entrada e saída na pastagem de inverno é de aproximadamente 30 e 15cm, já na *Brachiaria* o manejo é feito com alturas de 40 e 20cm. A lotação utilizada é de aproximadamente três unidades animais por hectare (3,0 UA/ha).

Imagen 6 – Sistema de pastejo rotacionado em pastagem de aveia (*Avena sativa* L.) e Azevém (*Lolium multiflorum* L.) sobre um Nitossolo Bruno no município de Campo Belo do Sul – SC. A frente da imagem, machos reprodutores, ao fundo, bezerros para engorda.



Fonte: foto do próprio autor, junho de 2020.

5.4 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO E SISTEMAS DE USO

Para avaliar o efeito da mudança de uso nas características de um Nitossolo Bruno, foram selecionadas cinco áreas: (i) área de floresta plantada (*Pinus taeda* L.) com idade entre 16 e 17 anos; (ii) área de colheita florestal; (iii) área com pastagem conduzida a três anos implantada após colheita florestal; (iv) área com pastagem conduzida a cinco anos implantada após colheita florestal; e (v) área de floresta natural não antropizada (reserva legal – RL).

No mês de junho de 2020 a primeira coleta de solo foi realizada nas áreas i, ii, e v. Após um ano (julho de 2021) foi realizada a coleta nas áreas ii, iii e iv. Em 2020, após as coletas, na área de colheita florestal (ii) houve a mudança de uso, portanto representou em 2021 a pastagem com um ano de condução (Tabela 2).

As áreas foram selecionadas seguindo critérios de similaridade como o tipo de solo, altitude, relevo e proximidade geográfica. Todas as áreas pertencem ao território da formação geológica “Serra Geral”, onde predomina o Basalto. O relevo local caracteriza-se por ser suave ondulado (3 a 8% de declividade) a ondulado (8 a 20% de declividade). As áreas estudadas têm declividade em torno de 8 a 10%.

O processo de intemperismo intenso das rochas nesse ambiente formou Nitossolos e Latossolos. Nas áreas onde o estudo foi realizado o solo foi descrito como Nitossolo Bruno alumínico típico. A área de pinus fica distante em aproximadamente 700m da área

de colheita/pastagem 1 ano, a qual está a aproximadamente 300m da pastagem de 3 anos que por sua vez distancia-se em aproximadamente 500m da pastagem mais velha. A mata nativa encontra-se ao lado da pastagem de cinco anos. A localização das áreas onde as coletas foram realizadas estão na Imagem 7.

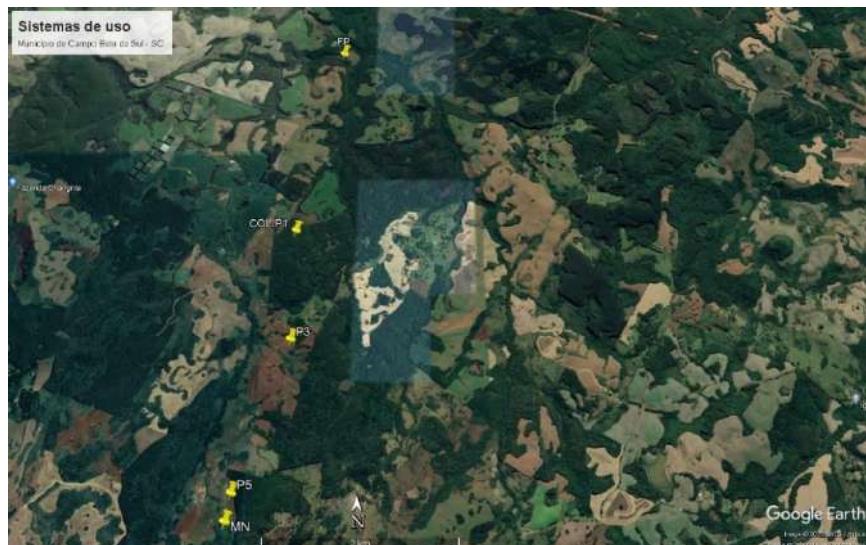
Tabela 2 - Áreas com diferentes usos e respectivas representações em dois anos de coleta (2020 e 2021) de amostras do Nitossolo Bruno.

Área	2020	2021
i*	Floresta <i>Pinus taeda</i> L.	-
ii	Colheita florestal	Pastagem 1 ano
iii		Pastagem 3 anos
iv		Pastagem 5 anos
v	Mata nativa	-

*i: área com floresta de *Pinus taeda* L. nos anos de 2020 e 2021; ii: área de colheita florestal em 2020 e conduzida com pastagem a um ano em 2021; iii: área utilizada com pastagem a três anos em 2021; iv: área utilizada com pastagem a cinco anos em 2021; v: área de RL com mata nativa em 2020 e 2021.

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

Imagen 7 - Localização das áreas de coleta de amostras para avaliar o efeito da mudança de uso da terra e manejo nas características de um Nitossolo Bruno no município de Campo Belo do Sul - SC.



Fonte: imagem do Google Earth®, 2023.

Ao fim das coletas, em todas as áreas nos dois anos, as análises físicas e químicas do solo foram realizados nos seguintes sistemas: mata nativa (MN); floresta de pinus (FP); colheita florestal (COL); pastagem implantada após colheita florestal cultivada a um ano após transição de uso (P1); pastagem implantada após colheita florestal cultivada há três

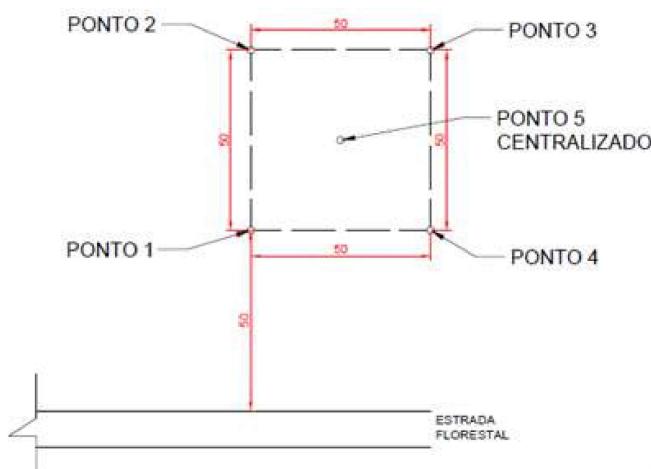
anos (P3); e pastagem implantada após colheita florestal cultivada há cinco anos (P5) após a transição de uso e manejo do solo.

A área FP demonstra a situação do solo antes da colheita, enquanto a área COL representa o efeito que o solo sofre com as operações de manejo na colheita e pós-colheita florestal. As áreas com pastagem foram avaliadas para monitorar as mudanças que ocorrerem no solo ao longo dos anos após a transição de uso. Por fim, a área MN foi usada como parâmetro de qualidade física do solo, de indicador natural da composição química e nutricional e de quantidade de carbono total.

Para demarcar os pontos de coleta, foi feito um caminhamento a partir de um ponto selecionado aleatoriamente em cada área. Cinco pontos para coletas foram demarcados em cada área. Na estrada interna da fazenda a beira de cada área iniciou-se um caminhamento em linha reta para o interior do talhão, percorrendo 50 metros e então foi marcado o ponto de coleta “01”. A partir desse foi percorrido mais 50 m para o interior do talhão e demarcado o ponto “02”. O ponto “03” foi demarcado percorrendo 50 m a direita do último. Partindo do ponto “03” em direção à estrada caminhou-se mais 50 m para marcar o ponto “04”, tomando cuidado para fazer um caminhamento paralelo àquele entre os pontos 01 ao 02. Por fim, o ponto “05” foi demarcado ao centro do quadrado imaginário que os demais formaram. Todo o caminhamento foi feito com auxílio de um aparelho GPS Garmin eTrex HS, salvando as coordenadas para que as coletas ocorressem no mesmo local nos dois anos.

Em cada um desses cinco pontos foram feitas coletas de amostras de solo e serviram como repetições para o andamento do projeto.

Figura 1 - Esquema utilizado para demarcação dos pontos de coleta de Nitossolo Bruno em fazenda no município de Campo Belo do Sul - SC.



Fonte: produção do próprio autor, 2020.

5.5 COLETA DAS AMOSTRAS

Nos pontos de coleta de cada sistema a serapilheira da superfície foi removida (Imagem 8) e uma trincheira com profundidade de 0,5 m foi aberta com auxílio de pá de corte para a coleta das amostras com estrutura preservada (Imagem 9) e não preservada.

Imagen 8 - Resíduos de pinus removidos da superfície na abertura da trincheira para coleta do Nitossolo Bruno.



Fonte: foto do próprio autor, 2020.

Imagen 9 – Coleta das amostras com estrutura preservada do Nitossolo Bruno em área de mata nativa no município de Campo Belo do Sul – SC.

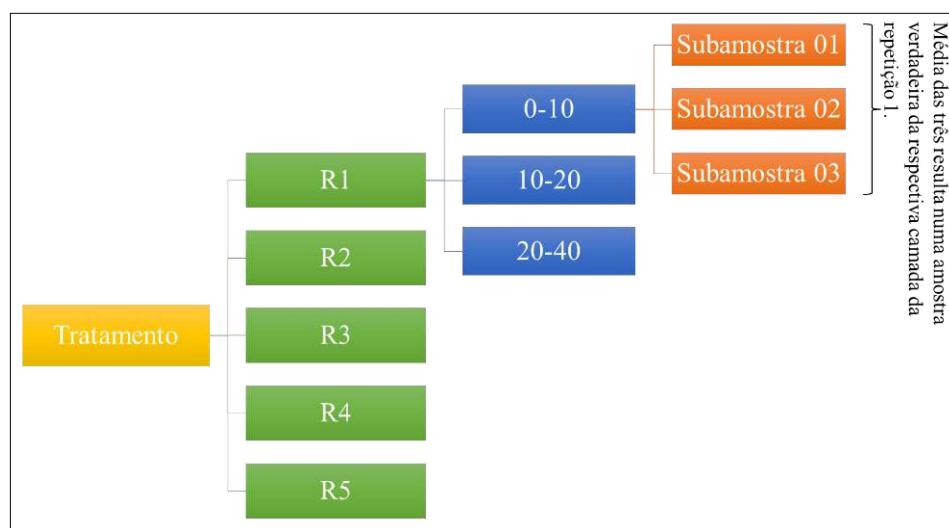


Fonte: foto do próprio autor, 2020.

A coleta de amostras com estrutura preservada ocorreu nas camadas de 0–10, 10–20 e 20–40 cm. Em cada uma dessas foram usados três cilindros volumétricos metálicos

de 141 cm³ (5,0 cm de altura x 6,0 cm de diâmetro) como subamostras para dar mais confiabilidade aos dados de laboratório. Deste modo, cada sistema teve 45 amostras de solo sendo cinco pontos, três camadas e três repetições por camada. A coleta foi feita de modo que houvesse excedente de solo nas extremidades do cilindro, as amostras foram envoltas em papel alumínio e sacos plásticos para manter a umidade do solo no momento da coleta e levadas ao laboratório de física e manejo do solo da Udesc no município de Lages. Para o tratamento estatístico, foram utilizados valores médios das análises em cada camada (Figura 2).

Figura 2 - Esquema demonstrando a formação de uma repetição verdadeira com a coleta de três subamostras de solo com estrutura preservada em cada camada das cinco repetições.



Fonte: produção do próprio autor, 2023.

A coleta de amostras com estrutura alterada foi feita aproveitando a mesma trincheira, nas camadas de 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm. Aproximadamente 1 kg de solo foi coletado de cada camada na forma de blocos com auxílio de pá de corte, acondicionado em saco plástico e transportado até o mesmo laboratório. A coleta em blocos é usada para obter amostra para avaliar a estrutura do solo. Deste modo, cada sistema teve 25 amostras com estrutura alterada: cinco repetições, cinco camadas. Em laboratório as amostras foram subdivididas para as posteriores análises (Figura 3).

Figura 3 – Esquema demonstrativo da coleta de amostras de solo com estrutura alterada em cada repetição e camada, e a divisão em subamostras para análise de laboratório e formação de uma repetição verdadeira.



Fonte: produção do próprio autor, 2023.

5.6 PREPARO DAS AMOSTRAS

No laboratório de física do solo da Udesc as amostras com estrutura preservada foram retiradas dos sacos plásticos e do papel-alumínio, e o excesso de solo das extremidades do cilindro foi removido de modo que o volume de solo correspondesse exatamente ao volume do cilindro. Após isso, um tecido permeável foi preso à base do cilindro com uma borracha elástica, evitando assim a perda de solo (Imagen 10). Esse preparo permitiu o manuseio das amostras para as análises que vieram a seguir.

Imagen 10 – Amostra de estrutura preservada do Nitossolo Bruno em cilindro volumétrico com um tecido permeável preso à base da amostra com borracha elástica.



Fonte: foto do próprio autor, 2021.

Uma porção das amostras com estrutura alterada foi peneirada em conjunto de peneiras de 8,0 e 4,75 mm, e a fração que passou da primeira e ficou retida na segunda peneira foi separada em potes para análise de estabilidade de agregados (Imagen 11). Outra porção da amostra foi seca ao ar, moída e tamisada em peneira de malha 2 mm para

obter a terra fina seca ao ar (TFSA). A TFSA serviu para realizar algumas análises físicas e químicas do solo. Uma parte da TFSA foi moída em gral de porcelana e tamisada em peneira de malha 0,53 mm para a determinação do carbono total.

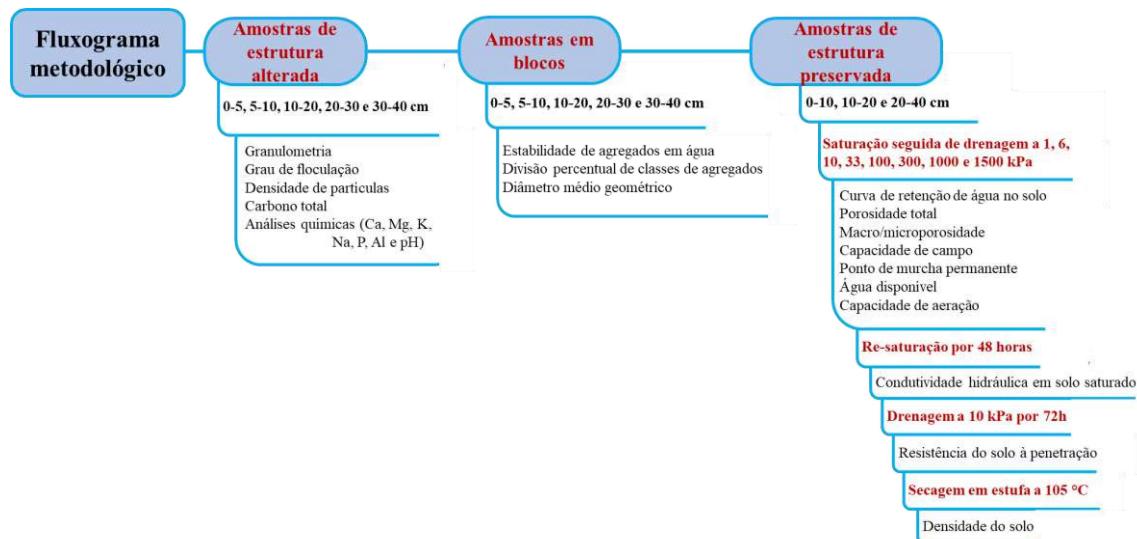
Imagen 11 – Amostra de solo com estrutura alterada secando para obtenção da terra fina seca ao ar (direita) e amostra peneirada para teste de estabilidade de agregados em água (esquerda).



Fonte: foto do próprio autor, 2020.

Para melhor esclarecer a metodologia de coleta, as amostras e as análises realizadas com cada tipo de amostra, a Figura 4 traz o fluxograma metodológico para detalhar a amostragem e as determinações realizadas em cada tipo de amostra.

Figura 4 – Fluxograma metodológico das coletas e respectivas análises físicas e químicas desenvolvidas no projeto.



Fonte: próprio autor, 2022.

5.7 ANÁLISES FÍSICAS

5.7.1 Granulometria e grau de floculação

Nesse experimento, a análise granulométrica foi realizada pelo “método da pipeta” conforme descrito por (GEE; BAUDER, 1986) e adaptado por Suzuki *et al.* (2015). Com ~50 g de TFSA é feita a determinação da umidade inicial da amostra (Equação 1) para encontrar então o fator de correção (Equação 2) de ajuste da massa de solo (Equação 3). Após isso ~30 g de TFSA de cada repetição foi colocada em snap-cap com 70 ml de água e 10 ml de solução NaOH 1N, agitado em agitador horizontal a 120 RPM por 4 h sem repouso (SUZUKI *et al.*, 2015).

Finda a agitação fez-se a separação das frações através da lavagem do solo sobre uma peneira de malha 0,053 mm e proveta de 1 L. O material retido nessa peneira foi levado à estufa para secagem a 105±2 °C por 48 h e pesado em balança de precisão para calcular a areia total (AT) (Equação 4). O que passou da peneira foi retido na proveta, a qual teve o volume completado com água até 1 L (Imagem 12). O conteúdo da proveta foi agitado para dispersão dos coloides e, segundo a lei de Stokes, permaneceu em sedimentação por tempo específico de acordo com a temperatura da suspensão. Após a sedimentação, foi retirada uma alíquota de 50 ml com pipeta volumétrica e colocada em um Becker para secar em estufa a 105±2 °C por 48h. Após seco e pesado em balança, a massa de argila pipetada foi utilizada para calcular o teor de argila (Equação 5). Uma amostra adicional foi feita sem adição de solo (somente água e NaOH) e serviu como prova em branco para correção das impurezas (Equação 6). O teor de silte foi calculado por diferença (Equação 7).

O procedimento para quantificar o teor de argila dispersa em água e calcular o grau de floculação das argilas foi o mesmo que para argila total, no entanto sem o uso do dispersante NaOH (Equação 8).

$$Ug = \frac{m_{SU} - m_{SS}}{m_{SS}} \quad \text{Equação 1}$$

$$fc = \frac{\text{massa solo úmido}}{\text{massa solo seco}} \quad \text{Equação 2}$$

$$AmCorr = \frac{m_{Amos}}{fc} \quad \text{Equação 3}$$

$$AT (g \text{ kg}^{-1}) = \frac{(mAreia+pl)-pl}{AmCorr} \quad \text{Equação 4}$$

$$Argila (g \text{ kg}^{-1}) = \frac{[(mArgila + mBecker)-mBecker-pb]}{AmCorr} * 20 * 100 \quad \text{Equação 5}$$

$$pb = (mBecker + sNaOH)-mBecker \quad \text{Equação 6}$$

$$Silte (g \text{ kg}^{-1}) = 100-(Argila+AT) \quad \text{Equação 7}$$

$$GF (\%) = \frac{(Argila \text{ total}-Argila \text{ natural})}{Argila \text{ total}} \quad \text{Equação 8}$$

sendo, Ug = umidade gravimétrica; mSU = massa de solo úmido (g); mSS = massa de solo seco em estufa (g); fc = fator de correção; $AmCorr$ = massa de solo da amostra com desconto de umidade; $mAmos$ = massa de amostra pesada para agitação; AT = areia total; $mAreia$ = massa de areia; pl = peso da lata onde a areia foi secada na estufa; $mArgila$ = massa de argila após secagem; pb = prova em branco; $mBecker$ = massa do Becker usado para secagem; GF = grau de floculação das argilas; $Argila \text{ total}$ = argila calculada com dispersante químico (NaOH); $Argila \text{ natural}$ = argila calculada sem NaOH.

Imagen 12 – Amostra do Nitossolo Bruno em repouso com água dentro de proveta de 1L para determinação da granulometria do solo e grau de floculação das partículas.



Fonte: foto do próprio autor, 2020.

5.7.2 Densidade de partículas

A determinação da densidade de partículas (Dp) deu-se pelo método do balão volumétrico (TEIXEIRA et al., 2017). No balão volumétrico de 50 ml foi colocado 20 g de TFSE – terra fina seca em estufa. Com uma bureta, foi lentamente adicionado álcool etílico até completar o volume de 50 ml do balão. Enquanto adicionava-se o álcool o recipiente foi agitado delicadamente para remover bolhas de ar. O volume de álcool utilizado para completar o volume do balão foi anotado e utilizado para o cálculo da Dp (Equação 9).

$$Dp \text{ (g cm}^{-3}\text{)} = \frac{mSs}{(50 - vAlc)} \quad \text{Equação 9}$$

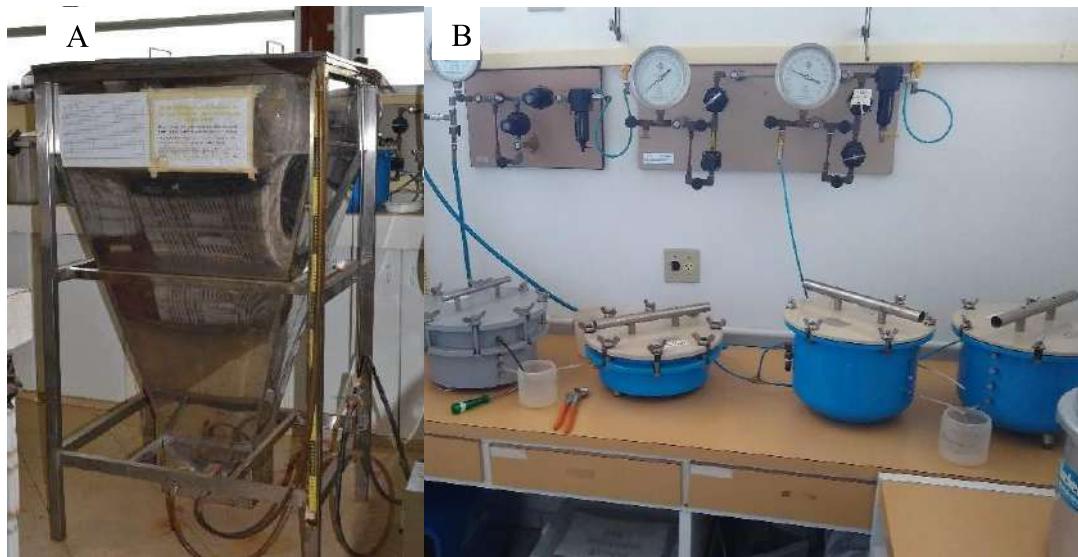
sendo, Dp = densidade de partícula; mSs = massa de solo seco em estufa (g); vAlc = volume de álcool gasto para preencher o balão (ml).

5.7.3 Densidade, porosidade e curva de retenção de água

Após o preparo das amostras com estrutura preservada, os cilindros volumétricos com solo foram postos em bandejas plásticas e saturados com água através da aplicação gradual de lâmina d’água. Após a saturação, as amostras passaram por mesa de tensão com coluna de areia e por câmaras de Richards (Imagem 13) para calcular umidade nas tensões de 1, 6 e 10 kPa (GUBIANI et al., 2009) e nas tensões de 33, 100, 300, 500, 1000 e 1500 kPa (LIBARDI, 2005), respectivamente. A primeira pesagem aconteceu quando as amostras foram preparadas após chegarem do campo, para calcular a umidade do solo a campo, a seguinte após saturação, e depois disso em cada tensão que a amostra foi submetida. Ao final do ciclo as amostras foram secas em estufa de circulação de ar por 48 horas numa temperatura de 105 ± 2 °C. Ao fim das 48 horas houve nova pesagem. Tomou-se o cuidado de manusear as amostras com o máximo cuidado para não perder solo durante as pesagens, além de utilizar a mesma balança de precisão para melhorar a qualidade dos dados.

Os dados coletados com as pesagens das amostras foram utilizados para o cálculo da densidade do solo (Ds) (BLAKE; HARTGE, 1986 a), volume de poros totais (PT), microporos (micro), macroporos (macro) (DANIELSON; SUTHERLAND, 1986), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), capacidade de aeração do solo (CA) e água disponível (AD) (TEIXEIRA et al., 2017).

Imagen 13 – Mesa de tensão de areia (A) e câmaras de Richards (B) do laboratório de física e manejo do solo da Universidade do Estado de Santa Catarina, campus Lages.



Fonte: foto do próprio autor, 2021.

Os cálculos de Ds, PT, micro, macro, CC, PMP, CA, e AD são dados respectivamente nas equações 10 a 17.

$$Ds_{(g\ cm^{-3})} = \frac{mSs}{V} \quad \text{Equação 10}$$

$$PT_{(cm^3\ cm^{-3})} = \frac{mSsat - mSs}{V} \quad \text{Equação 11}$$

$$Microporos_{(cm^3\ cm^{-3})} = \frac{(mS6\ kPa - mSs)}{V} \quad \text{Equação 12}$$

$$Macroporos_{(cm^3\ cm^{-3})} = PT - Microporos \quad \text{Equação 13}$$

$$CC_{(cm^3\ cm^{-3})} = \frac{(mS10\ kPa - mSs)}{V} \quad \text{Equação 14}$$

$$PMP_{(cm^3\ cm^{-3})} = \frac{(mS1500\ kPa - mSs)}{V} \quad \text{Equação 15}$$

$$CA_{(cm^3\ cm^{-3})} = PT - CC \quad \text{Equação 16}$$

$$AD_{(cm^3\ cm^{-3})} = CC - PMP \quad \text{Equação 17}$$

sendo, mSs = massa de solo seco; V = volume da amostra; mSsat = massa de solo saturado; mS1 kPa = massa de solo na tensão de 1kPa em mesa de tensão; mS6 kPa = massa de solo na tensão de 6kPa em mesa de tensão; mS10 kPa = massa de solo na tensão de 10kPa em mesa de tensão; mS1500 kPa = massa de solo na tensão de 1500kPa em câmara de Richards.

A curva de retenção de água (CRA) foi ajustada plotando cada tensão aplicada e a respectiva umidade volumétrica (Equação 18), seguindo modelo proposto por Van Genuchten (1980).

$$U_V = \frac{(mS_x - mS_s)}{V} \quad \text{Equação 18}$$

sendo, mS_x = massa de solo em cada tensão aplicada; mS_s = massa de solo seco; e V = volume da amostra.

5.7.4 Condutividade hidráulica saturada

As amostras de estrutura indeformada, após sair das Câmaras de Richards foram novamente saturadas com água para determinar a condutividade hidráulica em solo saturado (K_{sat}). Para isso, utilizou-se um permeâmetro de carga decrescente (COSTA et al., 2011) associado a um programa computacional para calcular a K_{sat} (GUBIANI et al., 2010) (Imagem 14).

Imagen 14 – Permeâmetro de carga decrescente acompanhado do programa “ K_{sat} ” para realização do teste de condutividade hidráulica em solo saturado.



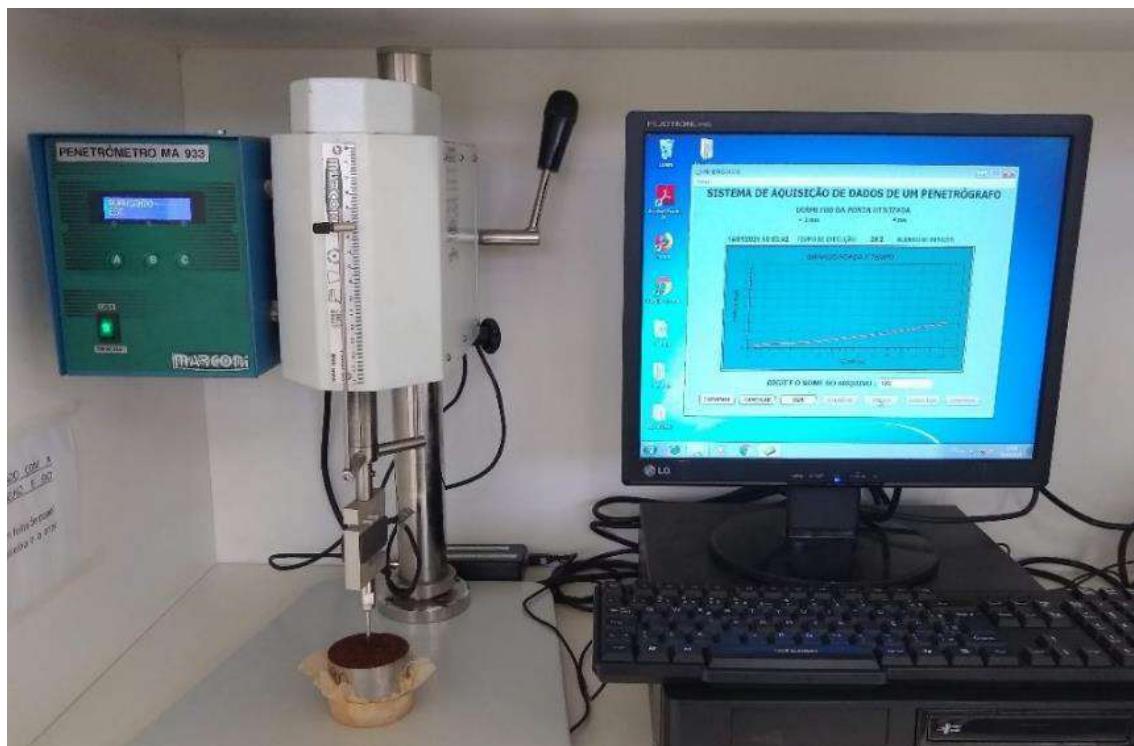
Fonte: foto do próprio autor, 2020.

5.7.5 Resistência do solo à penetração

Terminada a análise de K_{sat} as amostras tiveram sua umidade padronizada, equilibrando-a na tensão de 10 kPa na mesa de tensão de areia por 72 h para realizar o teste de resistência do solo à penetração. Para a realização do teste, utilizou-se um penetrômetro de bancada marca “Marconi modelo MA 933” (Imagem 15), equipado com come de 3,0 mm de diâmetro, o qual foi introduzido nas amostras até uma profundidade de 5,0 cm em velocidade constante de 30 mm min⁻¹, mantendo leituras de 1 em 1 segundo.

É importante destacar que para realizar essa análise o cilindro volumétrico oferece uma desvantagem: o solo da extremidade superior pode esboroar e o da inferior ficar mais adensado. Para reduzir esse efeito foi calculada a RP média da camada de 1 a 4 cm, descartando-se as leituras das extremidades do cilindro de solo. Em cada cilindro volumétrico foram realizadas duas medições.

Imagem 15 – Penetrômetro de bancada Marconi MA933 do laboratório de física e manejo do solo da Udesc Lages – SC para avaliação da resistência do solo à penetração.



Fonte: foto do próprio autor, 2021.

5.7.6 Estabilidade de agregados em água

As amostras de solo com estrutura alterada foram coletadas em leivas para manter intacto os agregados e avaliar a estabilidade dos agregados em água. Esse teste foi realizado logo que as amostras chegaram do campo para que a ação do tempo e dos organismos não mascarassem o resultado. Primeiramente é feita a quebra manual dos blocos de solo em unidades menores, utilizando os pontos de fragilidade do solo, sem pressionar a amostra com os dedos. Após essa primeira fase, o solo é peneirado em um conjunto de peneiras de 8,0 e 4,75 mm conforme preconizado por Kemper e Chepil (1965).

A análise consiste na utilização de 50 g de solo (amostra que passou pela peneira de 8,0 e ficou retido na peneira de 4,75 mm), onde 25 gramas foi utilizada para determinar a umidade do solo (Equação 1) para correção da massa seca inicial (Equação 19) e a outra metade foi destinada ao peneiramento em um conjunto de peneiras de malha 4,75; 2,0; 1,0; e 0,25 mm. No equipamento o solo é colocado por 10 minutos submerso em água, e outros 10 minutos em agitação (46 oscilações por minuto) sobre o conjunto de peneiras no aparelho tipo Yoder com oscilação vertical (Imagen 16). Do maior ao menor diâmetro, o conjunto de peneiras representam respectivamente as classes de agregados 1, 2, 3 e 4 (Imagen 17). Após a agitação a amostra que ficou retida nas peneiras foi seca em estufa a 105 ± 2 °C por 48 h. Com o peso da amostra seca foi realizado o cálculo da porcentagem de agregados por classe (Equação 20) e o diâmetro médio dos agregados. A separação em classes permitiu realizar o cálculo do diâmetro médio geométrico (DMG) (Equação 21) segundo procedimento descrito em Albuquerque *et al.* (2017).

$$MSi = \frac{\text{massa amostra}}{1+Ug} \quad \text{Equação 19}$$

$$\%Agri = \frac{mAgri}{MSi} * 100 \quad \text{Equação 20}$$

$$DMG (\text{mm}) = EXP \sum \left[\frac{mAgri * Ln.ci}{MSi} \right] \quad \text{Equação 21}$$

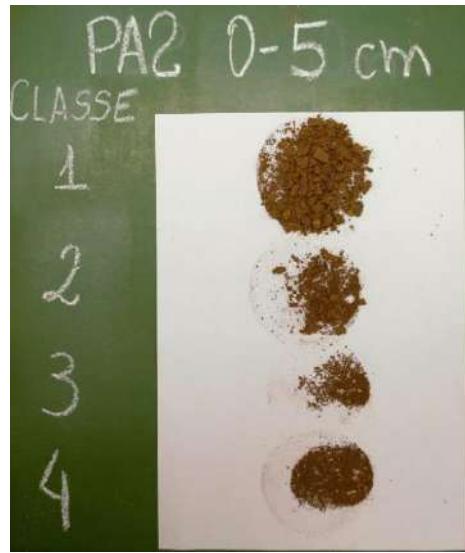
sendo, MSi = massa de solo inicial corrigida (g); Ug = umidade gravimétrica; %Agri = % de agregados retida na classe i ; mAgri = massa de agregado na classe (g); ci = diâmetro médio da classe de agregados.

Imagen 16 – Agitador tipo Yoder para análise de estabilidade de agregados em água e separação das classes de agregados do solo do laboratório de física e manejo do solo da Udesc Lages – SC.



Fonte: foto do próprio autor, 2021.

Imagen 17 – Classes de agregados de um Nitossolo Bruno separadas no conjunto de peneiras após agitação em água no aparelho tipo Yoder e secagem em estufa.



Fonte: foto do próprio autor, 2020.

5.8 ANÁLISES QUÍMICAS

A TFSA foi usada para os procedimentos de análises dos atributos químicos do solo: pH em água, P extraível (extração por Melich-1; leitura em espectrofotômetro de absorção molecular na região visível em 882 nm), teores de Na e K trocável (extração por Melich-1; leitura em espectrofotômetro de emissão atômica em chama), Ca e Mg trocável (extração por KCl 1 mol L⁻¹; leitura em espectrofotômetro de absorção atômica em

chama) e Al trocável (extração por KCl 1 mol L⁻¹; leitura por titulometria) (TEDESCO et al., 1995).

Outra amostra de TFSA foi moída em almofariz de porcelana e tamisada em peneira de malha 0,053 mm para análise do carbono total do solo (COT). Para essa determinação, uma porção de 10 a 15 mg desse solo foi utilizada num aparelho analisador elementar por combustão seca a 800°C (Imagen 18). A partir do teor de carbono total foi calculado o estoque de carbono (eCOT) em cada camada avaliada.

O estoque de carbono orgânico no solo será calculado em camadas pelo método de camada equivalente (GUARESCHI; PEREIRA; PERIN, 2012; VELDKAMP, 1994), conforme a equação 22:

$$eCOT = \frac{CO \times Ds \times e}{10} \quad \text{Equação 22}$$

sendo, eCOT: estoque de C (Mg ha⁻¹); CO: teor de carbono total (g kg⁻¹); Ds: densidade do solo (kg dm⁻³); e: espessura da camada considerada (cm).

Imagen 18 – Analisador elementar C/N via combustão seca do departamento de solos e recursos naturais da Udesc Lages – SC.



Fonte: foto do próprio autor, 2022.

Para fins de comparação com uma área referência foi feita a correção do eCOT por equivalência de massa baseado em (SISTI et al., 2004).

5.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O estudo de caso comparou cinco sistemas agrícolas e um sistema natural:

- MN: mata nativa;
- FP: floresta de *Pinus* sp.;
- COL: colheita florestal e manejo pós-colheita;
- P1: pastagem de um ano implantada após colheita-florestal;
- P3: pastagem de três anos implantada após colheita-florestal;
- P5: pastagem de cinco anos implantada após colheita-florestal;

Como as camadas ocorrem sequencialmente no perfil de solo foram analisadas individualmente.

Para facilitar o entendimento, esclarecer o problema e fortalecer as conclusões, as quatro hipóteses foram testadas separadamente.

A primeira hipótese testa se o teor de nutrientes e o pH do solo foram afetados no cultivo de *Pinus* em relação a mata nativa. Para isso foram comparados os sistemas MN x FP.

A segunda hipótese analisa se a colheita florestal modifica os atributos do solo. Para isso foram comparados os sistemas FP x COL.

A terceira hipótese analisa se a qualidade química, física e hídrica do solo é afetada pela implantação de pastagem em área de colheita de pinus. Para isso foram comparados entre si os três sistemas de pastagem, e o sistema de colheita contra as pastagens COL x [PA1+PA3+PA5].

A quarta hipótese analisa se o estoque de carbono do solo é afetado após a implantação de pastagem em área de colheita florestal, e se o eCOT atinge valores próximos da MN. Para isso, duas comparações foram analisadas: COL x [PA1+PA3+PA5] e MN x [PA1+PA3+PA5].

Após obtenção dos resultados foi verificada a homogeneidade e a normalidade dos dados através dos testes de Levene e Kolmogorov-Smirnov, respectivamente, ao nível de 5% de significância. Nas variáveis onde não foi verificada a distribuição normal, a transformação de boxcox foi realizada através da transformação $\log(y)$ ou y^λ . Após as transformações necessárias, foi calculada a ANOVA pelo teste F a 5% de probabilidade de erro (por camada). Em seguida, quando comparado um sistema contra outro foi utilizados teste T de Student, também a 5% de significância.

Para analisar o comportamento dos atributos testados em conjunto e observar as correlações entre esses e os sistemas de uso do solo, bem como a formação de grupos entre sistemas, foi realizada a análise multivariada através de componentes principais (PCA) com as médias de todos os atributos avaliados e sistemas divididos em três camadas (0–10, 10–20 e 20–40 cm).

O ambiente “R” foi usado para o teste das pressuposições, análise de variância, teste de comparação de médias de T e análise de componentes principais. O software SigmaPlot foi utilizado na elaboração das imagens gráficas apresentadas.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

6.1.1 Granulometria

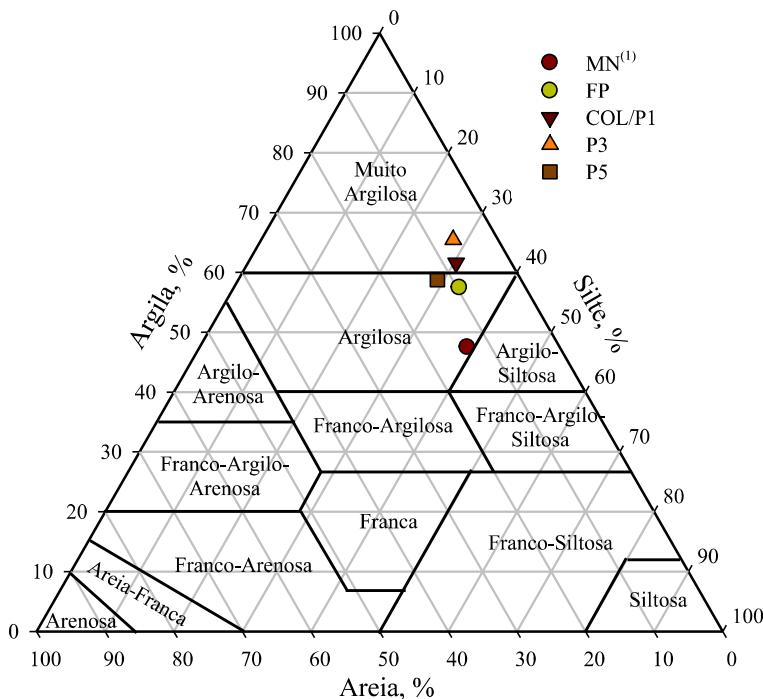
A análise granulométrica foi utilizada como um atributo de caracterização do solo, a fim de demonstrar que as áreas mantinham uma similaridade. Isso porque essa característica não é sujeita a mudanças por sistemas de uso e manejo do solo em tempos curtos, tanto que é considerada uma característica básica do solo.

Os resultados na camada de 0-40 cm demonstraram as seguintes variação das frações granulométricas: argila entre 475 a 654 g kg⁻¹; silte entre 279 a 390 g kg⁻¹; e areia entre 66 e 135 g kg⁻¹. O solo das áreas correspondentes aos sistemas P3 e COL/P1 foi classificado como muito argiloso, enquanto das demais áreas foi enquadrado como argiloso (Figura 5), segundo a classificação textural da Embrapa (SANTOS et al., 2005). Menor teor de argila na MN pode ocorrer em função da maior floculação da argila pelo maior teor de matéria orgânica nesse sistema de uso (130 g kg⁻¹ 0-20 cm e 50 g kg⁻¹ 20-40 cm). Ou seja, solo com maior teor de matéria orgânica tem maior floculação durante a análise da granulometria, o que reduz o teor de argila do mesmo (COSTA et al., 2000).

A análise granulométrica também é importante para o entendimento do comportamento e do manejo do solo. Anualmente o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) divulga as portarias de zoneamento agrícola de risco climático (ZARC) com vigência para o ano-safra indicado. Nessa portaria está indicado o tipo de solo apto ao plantio, dividido em três categorias de água disponível (AD) a depender de sua granulometria e classificação textural: Tipo 1 – arenoso; Tipo 2 – média; Tipo 3 – argiloso. Para a safra 2022/2023, a classificação do solo em função da AD no ZARC veio com mais detalhamento, abrangendo mais classes de solo, e para isso é necessária a composição granulométrica do solo medida de 0 a 40 cm, como preconiza a instrução normativa nº 1 de 21 de junho de 2022 (BRASIL, 2022). Essa nova metodologia está em atualização, de modo que para algumas culturas a metodologia segue na classificação antiga.

Interpretando a granulometria do solo conforme a classificação atual, o solo está enquadrado como tipo 3 – argiloso. Nas portarias divulgadas para a safra 2022/23 para o estado de SC, o tipo de solo é apto a todas as culturas, o que restringe algumas espécies são outros fatores como a temperatura média da região.

Figura 5 – Triângulo textural utilizado para a classificação da textura do Nitossolo Bruno descrito na área do experimento no município de Campo Belo do Sul - SC.



Nota: (1)MN: mata nativa; FP: floresta de pinus; COL/P1: área de pós-colheita de pinus (2020)/pastagem implantada após colheita florestal com um ano de condução (2021); P3: pastagem com três anos de condução (2021); P5: pastagem implantada após colheita florestal com cinco anos de condução(2021).

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

Geralmente, solos argilosos possuem estrutura estável e são menos suscetíveis a degradação por processos como erosão e compactação. Dessa forma, o solo com estrutura preservada - não degradado - tem maior capacidade de reter e disponibilizar água. Além disso, a possibilidade de mecanização é uma condição que permite a exploração agrícola.

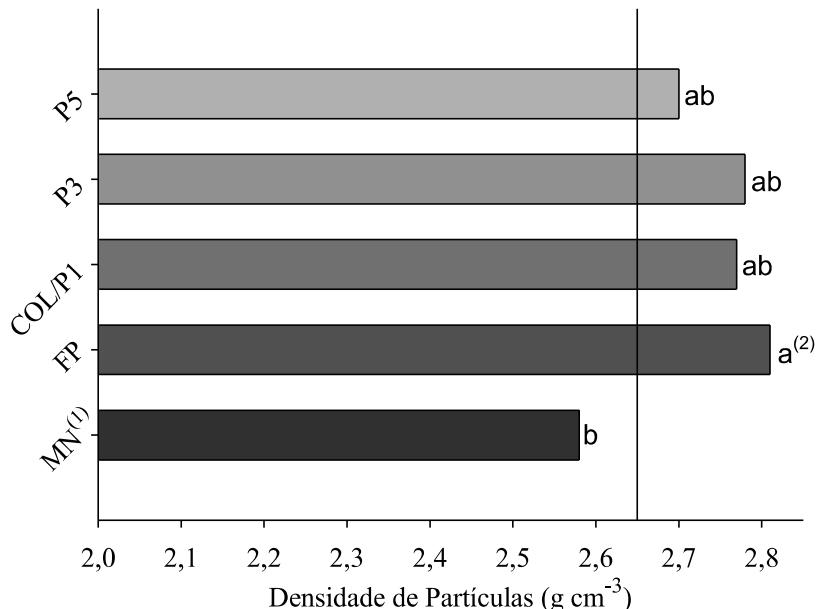
6.1.2 Densidade de partículas

No solo do estudo há predominância de quartzo, caulinita e filossilicatos de camadas 2:1 (ALMEIDA et al., 2018; TESTONI, 2015; TESTONI et al., 2017), com isso a Dp tende a variar entre 2,60 e 2,70 g cm⁻³. Na área analisada, na camada de 0–40 cm, teve uma variação de 2,60 a 2,80 g cm⁻³. Na MN foi próximo de 2,60 g cm⁻³, relacionado ao maior teor de MO, no P5 foi próximo de 2,70 g cm⁻³, e nos sistemas FP, COL/P1 e P3 foi próximo de 2,80 g cm⁻³ (Figura 6).

É uma propriedade pouco variável nos solos, pois depende do intemperismo que modifica a composição mineralógica do solo. Na maioria dos solos minerais de regiões tropicais e subtropicais, como no solo do estudo, varia de 2,60 a 2,75 g cm⁻³. Entre os

minerais, é aproximadamente $2,65 \text{ g cm}^{-3}$ para o quartzo e a caulinita, $4,4 \text{ g cm}^{-3}$ na goethita e $4,9$ a $5,3 \text{ g cm}^{-3}$ na hematita (BLAKE; HARTGE, 1986 b). A matéria orgânica – menos densa que os minerais – reduz a Dp quando presente em grande quantidade, como exemplo tem-se os solos orgânicos que em média apresentam Dp entre 1,0 e 2,0 g cm^{-3} (RUEHLMANN; KÖRSCHENS, 2020).

Figura 6 – Densidade de partículas no Nitossolo Bruno do município de Campo Belo do Sul – SC, em áreas com diferentes usos na camada de 0-40 cm.



Nota: ⁽¹⁾ MN: mata nativa; FP: Floresta de pinus; COL/P1: área de pós-colheita de pinus (2020) e pastagem implantada após colheita florestal com um ano de condução (2021); P3: pastagem com três anos de condução (2021); P5: pastagem com cinco anos de condução (2021). ⁽²⁾Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey $p=5\%$.

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

Com a mesma mineralogia nas áreas, o motivo principal dessa variação é atribuído ao material orgânico presente no solo, o que indica que sua presença é maior na área sob MN e na pastagem com maior tempo de implantação – P5. Após um distúrbio (manejo de colheita florestal) a tendência é que, ano após ano, as espécies forrageiras recuperem gradativamente o teor de MO que foi perdida (SANTOS et al., 2019), pois as forrageiras apresentam densa massa de raízes principalmente na camada superficial (GUENNI; MARÍN; BARUCH, 2002).

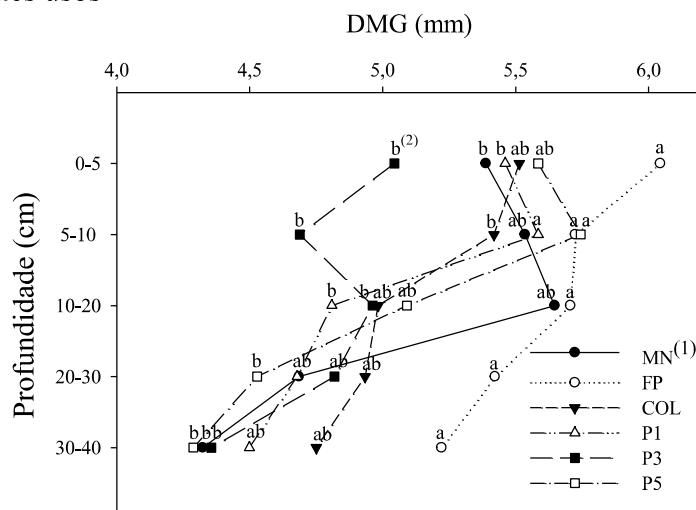
Um manejo adequado, com cobertura verde em boa quantidade e de qualidade, pouca ou nenhuma movimentação do solo e incremento de material orgânico pode, ao longo do tempo, reduzir a Dp e modificar outros atributos como densidade, porosidade, área superficial específica (ASE), propriedades térmicas entre outras (BLANCO-CANQUI, 2017).

6.1.3 Estabilidade de agregados

Quanto a estruturação física do solo com os diferentes usos, houve destaque à elevada estabilidade dos agregados (EA) em todos os sistemas analisados, visto que, na grande maioria dos casos, mais de 90% dos agregados ficaram retidos nas duas primeiras classes (8,0-4,75 e 4,75-2,0 mm) (Tabela 3) o que demonstra que são resistentes as forças desagregadoras.

Nos sistemas onde não houve mobilização do solo (MN e FP) os agregados mantiveram-se estáveis nas primeiras camadas, devido à preservação de MO, do sistema radicular das plantas e da fauna do solo, que atuam na formação e estabilização dos agregados maiores (BRAIDA et al., 2011; COSTA; RAAIJMAKERS; KURAMAE, 2018; HANKE; DICK, 2017; KRAUSE et al., 2019; RABBI et al., 2020; TISDALL; OADES, 1982). No entanto é importante destacar que, mesmo com a grande intensidade de manejo durante e após a colheita florestal, a área COL demonstrou alta EA até 40 cm.

Figura 7 – Diâmetro médio geométrico (DMG) de diferentes camadas do Nitossolo Bruno sob diferentes usos



Nota: ⁽¹⁾ MN: Mata nativa; FP: floresta de pinus; COL: área de pós-colheita de pinus; P1: pastagem implantada após colheita florestal com um ano de condução; P3: pastagem com três anos de condução; e P5: pastagem com cinco anos de condução. ⁽²⁾Médias seguidas da mesma letra, em cada camada, não diferem pelo teste de Tukey $p=5\%$.

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

Analizando a Figura 7 pode-se observar que todos os sistemas apresentaram diâmetro médio geométrico (DMG) acima do diâmetro médio dos agregados acima de 4,2mm. Quanto maior o DMG maior é a resistência dos agregados contra as forças desagregadoras e, portanto, menor a perda de solo, água e nutrientes com a erosão hídrica.

Tabela 3 – Porcentagem de classes de agregados e diâmetro médio geométrico de diferentes camadas do Nitossolo Bruno sob diferentes usos no município de Campo Belo do Sul – SC.

Área/Sistema	Camada (cm)	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	DMG (mm)
				%			
MN ⁽¹⁾	0–5	86,8	10,4	0,1	0,2	2,5	5,4
	5–10	92,0	4,9	0,1	0,2	2,7	5,5
	10–20	90,3	7,1	0,5	0,8	1,3	5,6
	20–30	75,8	13,8	3,2	4,5	2,7	4,7
	30–40	69,1	16,7	5,3	6,8	2,1	4,3
FP	0–5	93,9	5,4	0,1	0,3	0,3	6,0
	5–10	92,2	5,3	0,3	0,7	1,4	5,7
	10–20	92,1	5,0	0,7	0,9	1,3	5,7
	20–30	87,3	7,5	1,8	2,0	1,3	5,4
	30–40	83,1	9,2	2,6	2,6	1,8	5,2
COL	0–5	87,1	10,1	0,5	0,9	1,4	5,5
	5–10	85,4	10,9	1,1	1,2	1,3	5,4
	10–20	76,1	17,0	3,3	2,7	0,8	5,0
	20–30	76,3	15,9	4,0	2,7	1,1	4,9
	30–40	75,1	16,0	4,1	3,2	1,6	4,8
P1	0–5	87,0	8,7	0,9	2,7	0,7	5,5
	5–10	86,0	10,7	1,4	1,6	0,2	5,6
	10–20	77,1	14,1	3,4	3,2	2,2	4,8
	20–30	72,7	17,3	4,7	4,4	0,9	4,7
	30–40	71,2	15,8	6,5	5,5	1,0	4,5
P3	0–5	78,1	15,7	2,4	3,0	0,8	5,0
	5–10	73,5	15,3	4,9	5,3	0,9	4,7
	10–20	79,7	13,3	2,5	2,2	2,4	5,0
	20–30	74,9	16,9	3,9	3,1	1,2	4,8
	30–40	67,0	20,5	5,8	5,4	1,2	4,3
P5	0–5	89,0	7,3	1,3	1,6	0,9	5,6
	5–10	89,8	7,9	0,8	1,1	0,5	5,7
	10–20	79,5	13,2	3,8	2,5	1,0	5,1
	20–30	73,3	15,2	5,0	4,3	2,2	4,5
	30–40	65,6	20,1	7,5	5,8	1,0	4,3

Nota: ⁽¹⁾MN: mata nativa; FP: Floresta de Pinus; COL: área de pós-colheita de pinus; P1:pastagem implantada após colheita florestal com um ano de condução; P3: pastagem com três anos de condução; e P5: pastagem com cinco anos de condução.

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

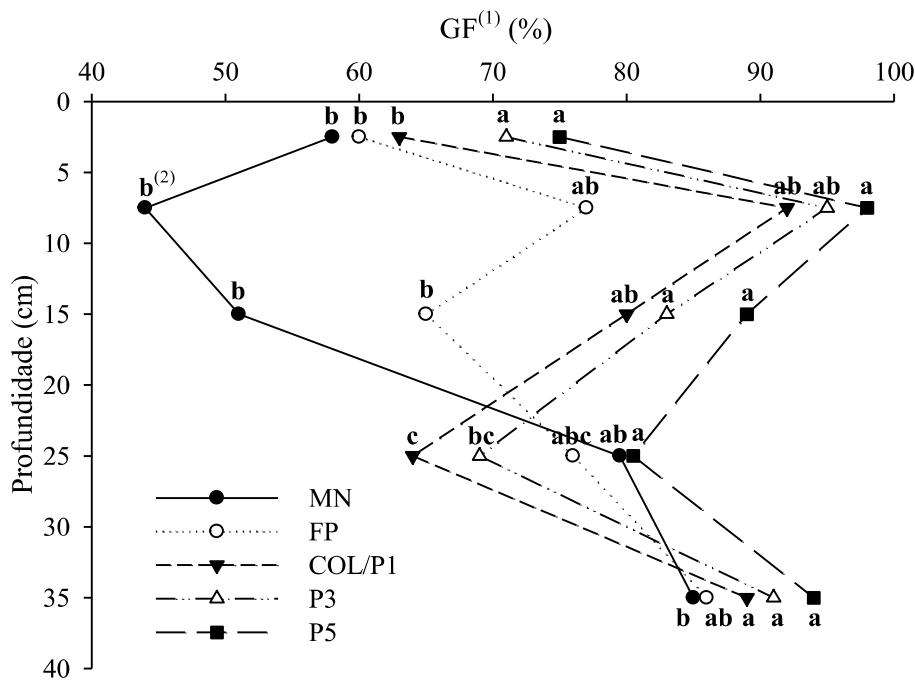
Em relação a floculação da argila, as áreas sob pastagem tiveram maior floculação. Em superfície (0-5 cm) tiveram mais de 70% de floculação das argilas, e nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, juntamente com a área de colheita florestal, tiveram GF acima de 90% e 80% (Figura 8). Quanto maior o GF e a estabilidade de agregados menores são as perdas pela desagregação e transporte das partículas, bem como sua migração para camadas mais profundas do solo na forma de partículas dispersas.

É importante considerar que maior GF, assim como EA, pode se dar pela aproximação mecânica das partículas: pressão externa de máquinas, pisoteio, umedecimento e secamento ou pelo caráter retrátil do Nitossolo Bruno (SILVA et al.,

2020). Essa aproximação gera alta força de ligação, mas reduz o espaço poroso (MELLO IVO; MIELNICZUK, 1999).

Nas duas últimas camadas o GF variou menos entre os sistemas, mantendo as médias acima de 60% na camada de 20-30 cm, e acima de 80% de 30-40 cm (Figura 8). Em profundidade maior, o efeito do uso e manejo do solo é menos intenso por isso maior aproximação dos resultados nos diferentes usos.

Figura 8 – Grau de floculação do solo sob diferentes usos em diferentes camadas de um Nitossolo Bruno no município de Campo Belo do Sul – SC.



Nota: ⁽¹⁾ GF: grau de floculação; MN: mata nativa; FP: floresta de pinus; COL/P1: área de pós-colheita florestal (2020)/pastagem implantada após colheita florestal com um ano de condução (2021); P3: pastagem com três anos de condução (2021); P5: pastagem com cinco anos de condução (2021). ⁽²⁾Médias seguidas da mesma letra, em cada camada, não diferem pelo teste de Tukey $p=5\%$.

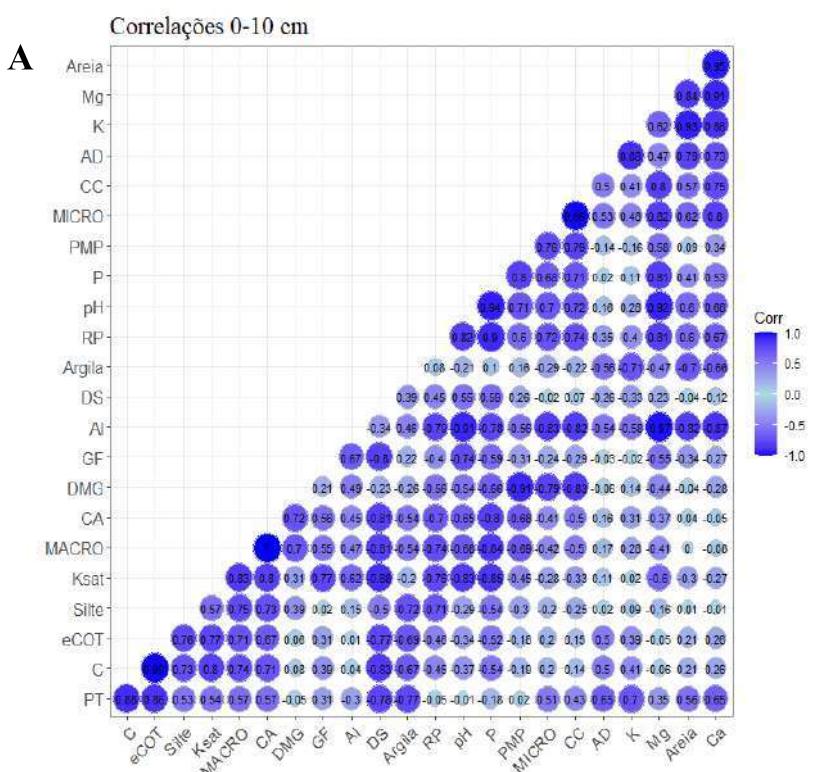
Fonte: produção do próprio autor, 2023.

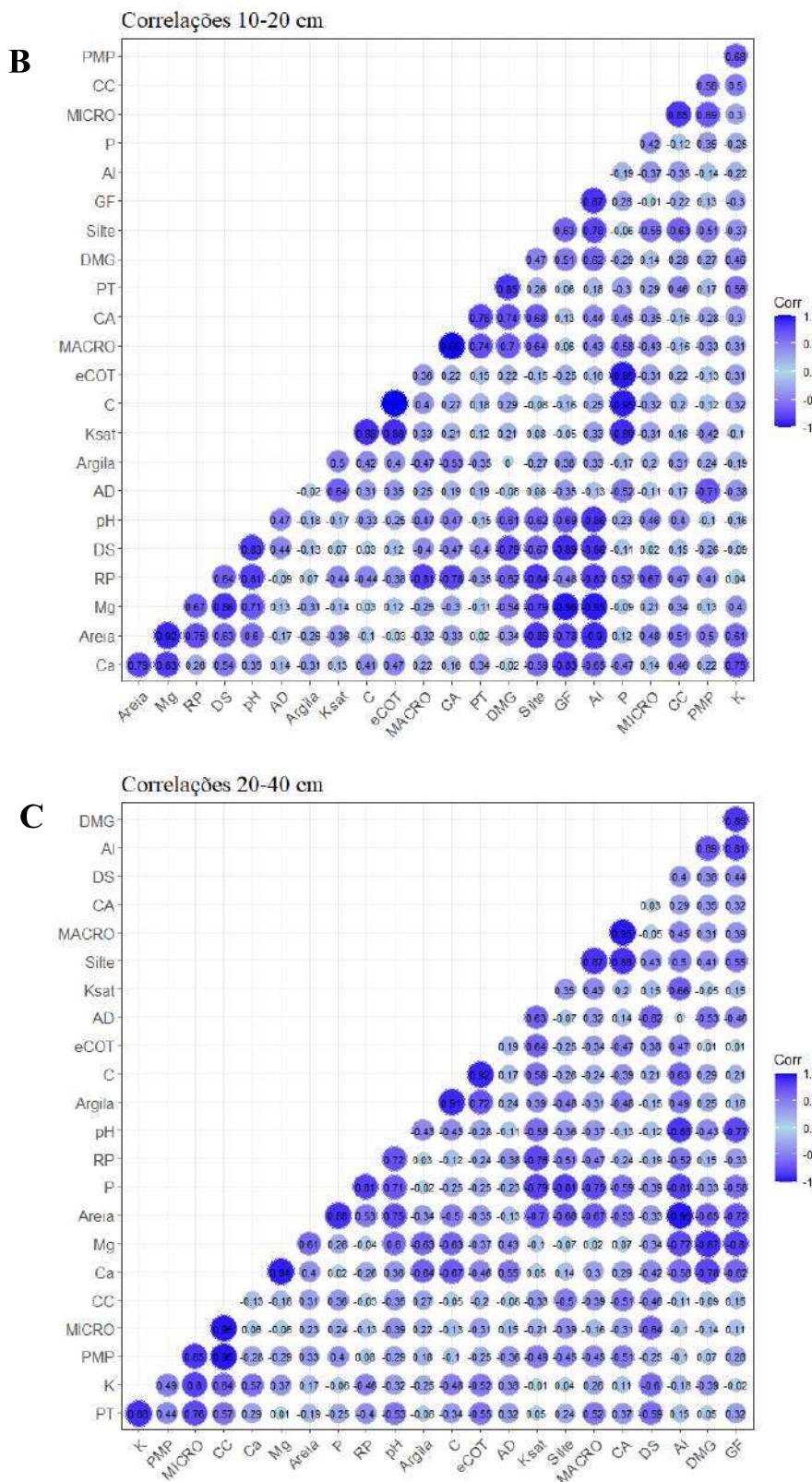
O GF é relacionado à granulometria, teor de matéria orgânica e mineralogia do solo, e também às cargas do solo e tipo de cátions presentes. Em casos de solos com altas concentrações de cátions monovalentes, como o sódio e/ou potássio, pode haver dispersão das argilas, apesar de ser um efeito temporário (PÉRTILE et al., 2017). No entanto, em solos argilosos/muito argilosos com alto teor de cátions polivalentes (Al^{+3} , Ca^{+2} , Mg^{+2}), é difícil modificar o GF. Após 21 anos de estudo em áreas com diferentes sistemas de uso em um Latossolo Bruno muito argiloso no município de Guarapuava – PR, Costa *et al.* (2003) não observaram modificações no GF entre plantio direto, preparo convencional e mata nativa. Os autores ainda afirmam que, possivelmente, alterações químicas

decorrentes da correção do solo são responsáveis pela menor dispersão de argila em solo cultivado.

Dessa maneira, alto teor de cátions polivalentes e alto teor de MO no sistema MN poderia indicar maior GF, no entanto, um motivo para isso não ocorrer pode ser a baixa concentração de Al^{3+} nos primeiros 10 cm do solo nesse sistema (Figura 10B), visto a alta correlação entre esses dois atributos, e correlação menor entre GF e Ca e Mg (Figura 9). Dexter (1988) discutiu o conceito de hierarquia de agregados, propondo que forças microscópicas entre as partículas de argila seriam predominantes na formação de microagregados (óxidos, cátions, carbonatos). Na sequência, os microagregados são unidos por forças de maior alcance (MO, microrganismos) (KRAUSE et al., 2019; XUE et al., 2019) que passam a dominar a estabilidade de agregados maiores. Prova disso é a alta estabilidade de agregados (EA) do solo sob MN (Tabela 3). No entanto, nesse estudo a correlação entre GF e argila, bem como DMG e argila foi baixa em todo o perfil analisado (Figura 9).

Figura 9 - Correlações de atributos químicos e físicos em três camadas do Nitossolo Bruno sob diferentes sistemas de uso no município de Campo Belo do Sul – SC.





6.2 COMPARAÇÃO NO TEOR DE NUTRIENTES EM ÁREA DE PINUS E MATA NATIVA

O teor de nutrientes (P, K, Ca e Mg), pH_{H2O} e o teor de Al foram avaliados no solo da área sob MN e FP em diferentes camadas para compreender qual a interferência do

cultivo de pinus durante 17 anos nesses atributos. O sistema MN foi utilizado como referência (não antropizado) de um solo sem uso e manejo, considerando que durante sua evolução os atributos do solo estão naturalmente em equilíbrio.

O pH não diferiu da superfície até 40 cm (Figura 10A). Ambos os sistemas demonstraram pH baixo, com redução em profundidade. Importante destacar que o pH indica acidez excessiva para o crescimento e desenvolvimento da maioria das espécies vegetais, que é entre 5,5 e 6,0.

Florestas naturais não apresentam sintomas de deficiência causada pela acidez pelo fato de a ciclagem estar em equilíbrio com as demandas, no entanto quando substitui-se por florestas de rápido crescimento, como o pinus, o processo de ciclagem e armazenamento de nutrientes varia e pode limitar o crescimento das plantas.

Elevada acidez é comum em solos de altitude da região sul do Brasil e pode estar associado ao intemperismo do solo e a ocorrência de ácidos orgânicos que se acumulam com a decomposição de resíduos vegetais (SILVA; DICK; INDA JUNIOR, 2008).

A ocorrência de maior acidez no solo sob FP pode decorrer da maior extração de cátions básicos (Ca e Mg) pela cultura sem a devida reposição pela reciclagem (SOUZA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007). Sabe-se que a quantidade de serapilheira é diretamente proporcional com a biomassa dos povoamentos florestais, e que essa camada, quando de baixa qualidade, é relativamente mais espessa do que quando comparamos com resíduos de melhor qualidade (GRAHAM; WOOD, 1991). Nos povoamentos de pinus, geralmente, tem uma camada espessa de resíduos sobre o solo, indicando que a decomposição é lenta e não há fornecimento de nutrientes ao solo na mesma taxa que há a absorção, exceto para o K que não é constitutivo, rapidamente liberado (GIACOMINI et al., 2003).

Li *et al.* (2020) verificaram que a decomposição da serapilheira de árvores coníferas é menor que de outras folhosas devido à composição química, alta relação C:N e alto teor de sódio. Comparando florestas de Pinus com Floresta Atlântica Semideciduval no nordeste da Argentina, Gatti *et al.* (2019) encontraram diferença de população microbiana nas bordas dos plantios florestais, e redução na decomposição da biomassa de pinus e ciclagem de nutrientes em relação à floresta nativa.

Os teores de Al estão altos, com exceção da camada superficial (0-5 cm) da MN que foi menor que da FP (Figura 10B). A acidez do solo facilita a solubilização do Al trocável e pode elevar seu teor. Além disso, alto teor desse elemento é comum nos solos da região devido a composição mineralógica com caulinita e óxidos na fração argila. É

importante salientar que os solos do Planalto Sul Catarinense são fortemente ácidos, pobres em nutrientes e ricos em Al (SILVA; DICK; INDA JUNIOR, 2008). A ausência de Al na camada superficial da MN pode estar relacionada a presença dos cátions básicos Ca e Mg, que neutralizam a acidez do solo e reduzem a solubilização do alumínio.

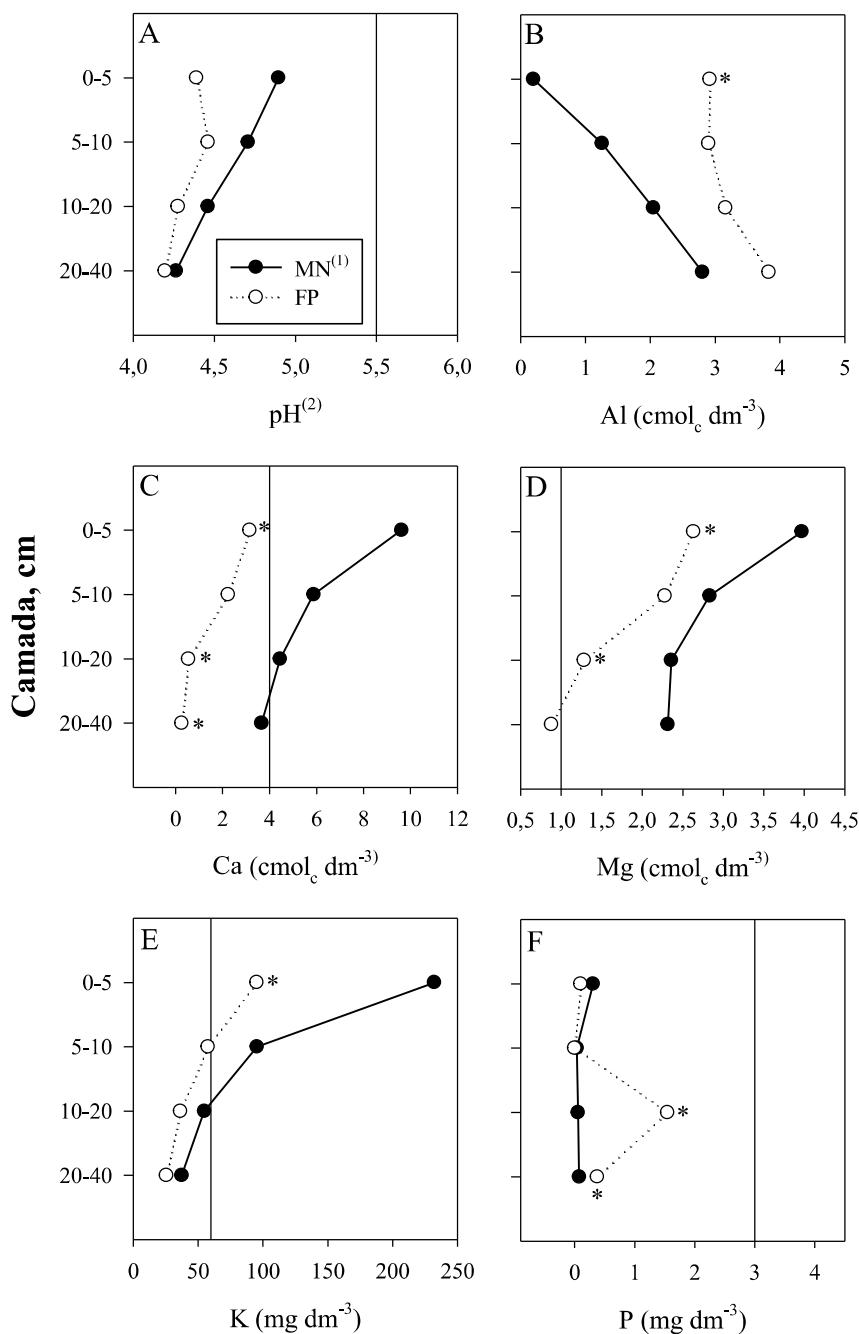
Como já dito anteriormente, a alta extração de Ca e Mg pelo *Pinus* devido ao rápido crescimento, e a decomposição lenta da serapilheira, onde há menor ciclagem dos nutrientes, favorece a acidificação do solo e liberação do Al. Como a MN é um sistema em equilíbrio, a vegetação está adaptada a essa situação, e apesar da presença do Al e pH baixo também há disponibilidade e rápida ciclagem dos nutrientes.

Os teores de Ca e Mg foram maiores na MN na maioria das camadas avaliadas. Na camada 0-5 cm o teor de Ca da MN foi aproximadamente 70% superior à FP. A camada seguinte (5-10 cm) não diferiu apesar do Ca ser 60% maior na MN em relação a FP. De 20-40 cm o teor de Ca foi maior na MN já que na FP o teor foi baixo (Figura 10C). O Mg foi 38 e 42% maior na MN em relação a FP, respectivamente nas camadas 0-5 cm e 10-20 cm (Figura 10D).

Comparando as plantações de *pinus* com áreas de pastagem nativa nos campos de cima da serra do Rio Grande do Sul, Dick *et al.* (2011) relataram teores de Ca e Mg trocáveis menores no reflorestamento. Resultado semelhante foi encontrado por Almeida *et al.* (2012) no Planalto Sul Catarinense, onde relataram redução nos teores de Ca e Mg e aumento na concentração de Al trocável no *pinus* em comparação ao campo nativo.

Os teores de Ca, em todas as camadas da FP encontram-se abaixo do nível crítico ($4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) de manutenção do nutriente, entretanto os teores de Mg encontram-se acima do nível crítico ($1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) segundo Silva *et al.* (2016). Um motivo para essa constatação é o local de concentração de cada nutriente. O Ca acumula-se no caule, e é mantido aí, sem translocação por todo ciclo. O caule é a parte mais comum de se explorar (lenho e casca), levando consigo o Ca que ali se acumulou. Segundo estudos de Gonçalves (1995) e Moro et al. (2008), o Ca é absorvido e concentrado no lenho em maior quantidade que o Mg, ou seja, mais Ca é retirado do solo e exportado juntamente com o caule do *pinus* proporcionalmente numa concentração maior que o Mg, e essa é uma das razões por que o teor de Mg no solo ainda permanece acima do NC após 17 anos de cultivo.

Figura 10 – Comparação de atributos químicos em diferentes camadas de um Nitossolo Bruno sob mata nativa (MN) e floresta de pinus (FP) em Campo Belo do Sul – SC.



Nota: *Difere estatisticamente ($p=5\%$) pelo teste t. ⁽¹⁾MN: mata nativa; FP: floresta de pinus. ⁽²⁾pH: pH do solo em água; Ca, Mg e Al: teores de cálcio, magnésio e alumínio trocável extraído por KCl 1 mol L⁻¹;

P e K: teor de fósforo e potássio extraídos por Melich-1.

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

O teor de K na MN foi 60% maior que na FP na camada 0-5 cm. Abaixo disso os teores não diferiram (Figura 10E). Segundo Silva *et al.* (2016) apenas na primeira camada o nutriente está acima do NC no solo sob FP, revelando que há falta de K, o que pode prejudicar o desenvolvimento das plantas. Um dos motivos para o K ser maior na camada

superficial é a solubilidade desse nutriente, que é disponibilizado do material orgânico proveniente das plantas em pouco tempo, concentrando-se na superfície. O que não é reabsorvido pelas plantas pode ser perdido por lixiviação. A menor concentração de K na FP também pode ser atribuída a alta capacidade de absorção do nutriente pelo pinus (TOMASI et al., 2012) e pelo fato da serapilheira do pinus apresentar pouco K (KLUG et al., 2020).

A substituição de MN por FP não modificou os teores de P até os 10 primeiros centímetros de solo. Abaixo disso a FP teve maior concentração desse nutriente (Figura 10F), entretanto em todas as camadas sua concentração está menor que o NC para esse solo, que é de 3,1 a 4,5 mg dm⁻³ em florestas plantadas (SILVA et al., 2016). Em todas as camadas avaliadas, o teor de fósforo está próximo de zero.

Como já mencionado anteriormente, a MN pode ter milhares de anos de evolução, onde o P está em equilíbrio na MO e adsorvido nos hidróxidos de Fe e Al. Nesse sistema, conforme há a decomposição da MO pelos microrganismos e ocorre o intemperismo dos minerais, o P é absorvido pela vegetação. Entretanto, para uma cultura exótica, de maior exigência e rápido crescimento, é importante haver nutriente suficiente para evitar restrições ao crescimento.

No Brasil o P é o nutriente mais limitante na produção, tanto agrícola como florestal, devido a dois fatores principais: baixos níveis naturais (ERNANI; ALMEIDA, 1986), como demonstrado na Figura 10F; e alta capacidade de interação com os coloides especialmente em solos argilosos, ácidos e compostos por óxidos de ferro e alumínio (ROLIM NETO et al., 2004).

Em experimento com diferentes genótipos de *Pinus spp.* no município de Lages-SC, (ANDRADE et al., 2022) concluíram que o crescimento da planta é incrementado com fertilização suplementar de P. Outros autores (SILVA et al., 2013; TRAZZI et al., 2019) relatam que nas espécies florestais a maior resposta a alta disponibilidade de P ocorre principalmente na fase inicial de desenvolvimento. Para fins de adubação, o nível crítico de P para o solo em questão (argila > 600g kg⁻¹) para culturas do grupo 3 (grupo que se enquadram as florestas plantadas) é entre 3,1 e 4,5 mg P dm⁻³ (SILVA et al., 2016).

No geral, a mudança de uso do solo de MN para FP altera o pH do solo e aumenta o Al trocável na camada de 0-5 cm. Os nutrientes Ca, Mg e K são os mais afetados com o cultivo, reduzindo com o cultivo do pinus. Portanto, a correção da acidez e a adubação é essencial quando utilizada área de MN para produção florestal, especialmente a correção dos níveis de P, o qual naturalmente é baixo nesse tipo de solo.

6.3 EFEITO DA COLHEITA DO PINUS EM ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Ao planejar o manejo florestal, não somente a produtividade e custos deve ser levado em conta, mas também a preservação do ambiente. Um foco especial nesse sentido deve ser dado ao potencial de degradação do solo na colheita florestal (CAMBI et al., 2015; COSTA et al., 2016; SAMPIETRO; LOPES, 2011).

Um dos principais efeitos do tráfego de máquinas é a compactação, que pode ser definida como o aumento da Ds e RP (ANDOGNINI et al., 2020; LUCIANO et al., 2012).

Atributos físicos (DMG, Ds, Ksat, RP, porosidade, AD, CC, PMP e CA) foram avaliados nos sistemas FP e COL para compreender como esse Nitossolo Bruno reage às perturbações causadas pelo manejo de colheita florestal.

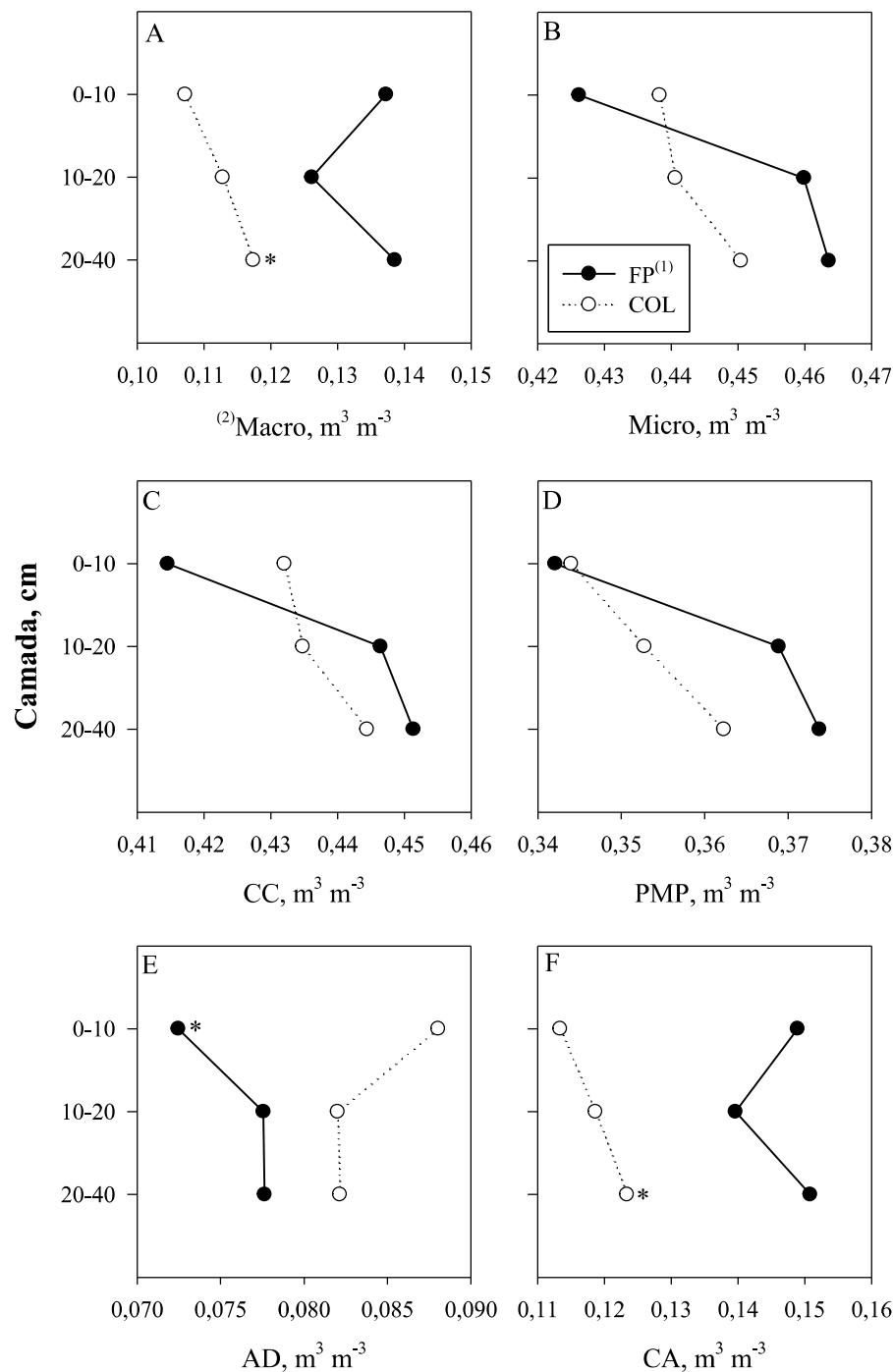
Macro e microporosidade, CC, PMP e CA não diferiram nos dois sistemas de uso (Figura 11). Os macroporos e a CA permaneceram em todo perfil acima do limite de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 11A e F) (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; VOMOCIL; FLOCKER, 1961) abaixo do qual há restrição no crescimento das raízes. A AD na camada superficial (0–10 cm) foi 28% menor na FP em comparação ao solo da área pós-colheita (Figura 11E). Visto que a AD é a diferença entre CC e PMP, e a umidade no PMP em FP e COL é igual (Figura 11D), o volume de água na CC na FP (Figura 11C) (mesmo sem ser estatisticamente significante) resulta em menor volume de AD em comparação à COL.

Nos primeiros 20 centímetros o DMG reduziu após a colheita. Na camada de 0–10 cm passou de 5,9 para 5,5 mm e na camada de 10–20 cm de 5,7 para 5,0 mm, representando redução de 7 e 12% respectivamente. Dos 20 aos 40 cm houve redução de 9% no DMG, no entanto sem diferença significativa (Figura 12A).

Os solos oxídicos tem uma estrutura forte, com microagregados altamente estáveis, e por isso uma alta resistência a pressão (COSTA et al., 2004; SILVA et al., 2020; SUZUKI et al., 2008). Solos do sul do Brasil também possuem em sua maioria alto teor de matéria orgânica, que pela teoria da hierarquia dos agregados é de extrema importância na formação e estabilização dos agregados desde ~ 20 até $>2000 \text{ }\mu\text{m}$ (TISDALL; OADES, 1982). Essas características permitem que o manejo seja realizado sem que haja grandes prejuízos na estrutura através da redução da estabilidade dos agregados. Prova disso é que, apesar da redução do DMG nos primeiros 20 cm, esse

índice manteve-se maior que o diâmetro da primeira peneira utilizada na agitação em água (4,75 mm), o que indica solos estáveis.

Figura 11 - Porosidade, água disponível (AD), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de aeração (CA) do Nitossolo Bruno sob floresta de pinus e área de pós-colheita florestal no município de Campo Belo do Sul – SC.



Nota: *Difere estatisticamente ($p=5\%$) pelo teste t. ⁽¹⁾FP: floresta de pinus; COL: área de pós-colheita florestal. ⁽²⁾Macro: macroporos; Micro: microporos; CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; AD: água disponível; CA: capacidade de aeração.

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

A Ds não alterou com a colheita florestal. As densidades foram em média de 1,06, 1,10 e 1,14 na FP e 1,14, 1,13 e 1,16 na COL, respectivamente nas camadas de 0-10; 10-20; e 20-40 cm (Figura 12B). Esse resultado nos indica que o Nitossolo Bruno tem resistência ao manejo de colheita florestal, e a estrutura do solo, como citado anteriormente, resiste às pressões das máquinas e veículos mantendo-se estável e sem adensamento.

A densidade é utilizada para analisar a compactação do solo, mas depende da granulometria do solo. Então, para cada tipo de solo haverá uma Ds máxima após aplicação de uma carga. Essa Ds máxima pode ser obtida pelo teste de Proctor (VARGAS, 1977; ZHAO et al., 2010). O efeito da compactação também está relacionado a umidade do solo no momento do manejo (PUHLICK; FERNANDEZ, 2020) e ao teor de MO no solo (ZHAO et al., 2010).

Em estudo com graus de compactação, Andognini et al. (2020) verificaram que num Nitossolo Bruno do Planalto Sul de SC a Ds de até $1,15 \text{ kg dm}^{-3}$ representa aproximadamente 90% da densidade máxima que esse solo pode atingir pelo teste de Proctor, nível que não é considerado restritivo ao crescimento da maioria das culturas (SÁ et al., 2016; SILVA; ALBUQUERQUE; COSTA, 2014).

Diversos autores relatam aumento da Ds após o tráfego de máquinas florestais (ANDRADE et al., 2017; COSTA et al., 2016; HAN et al., 2009; PUHLICK; FERNANDEZ, 2020), mas também há registros de solos sem incremento de densidade após a colheita florestal.

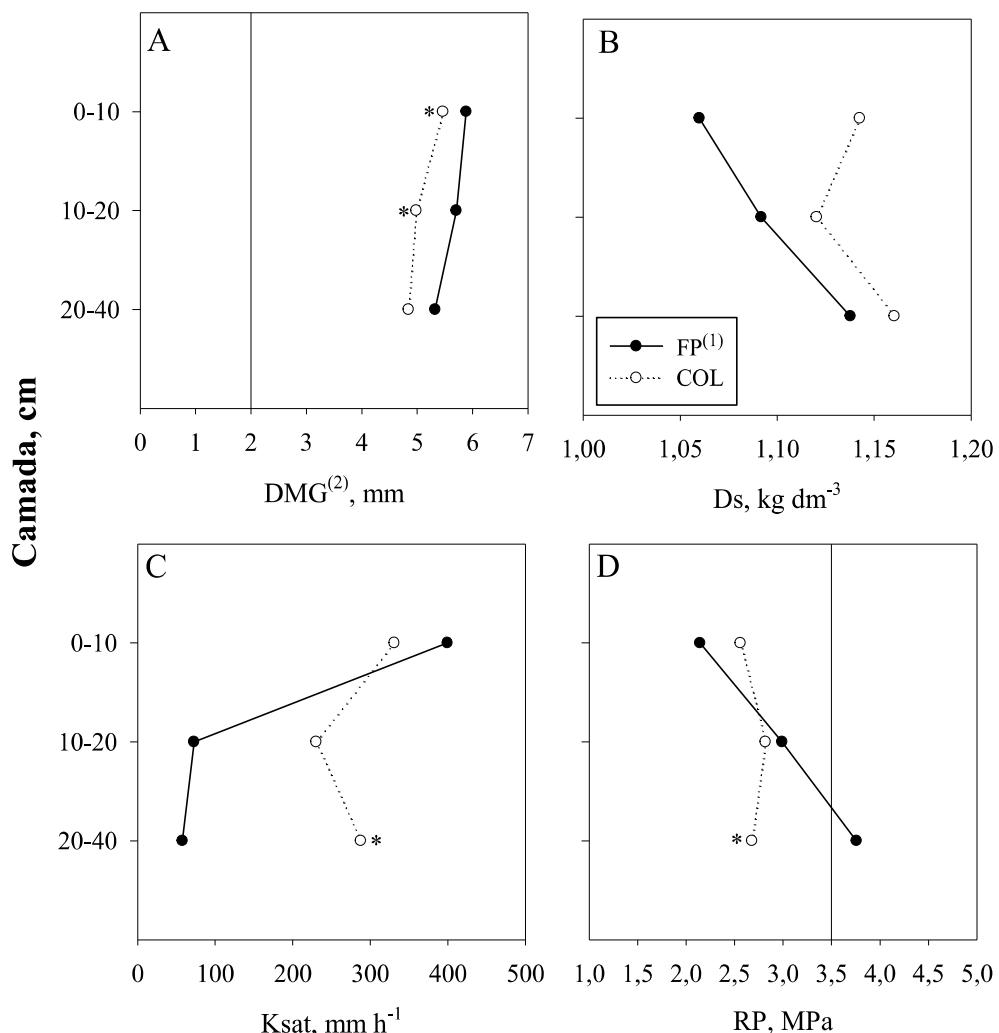
Avaliando a compactação de um Cambissolo Háplico de textura média na colheita de *Pinus* no sistema *cut-to-length* com tráfego de *harvester* e *forwarder*, Lopes et al. (2015) não verificaram alteração na Ds em três camadas: 0-15, 15-30 e 30-50 cm. Em um Latossolo Vermelho de textura muito argilosa, Szymczak et al. (2014) concluíram que há alteração na Ds nos pontos de tráfego da máquina, além disso afirmam que a camada de resíduos minimiza alteração da Ds. Nessa mesma linha, Silva et al. (2007) avaliaram tráfego de maquinário florestal sobre resíduos na superfície, e concluíram que eles minimizaram a compactação do solo pois dissiparam a pressão no solo, evitando atingir a capacidade de suporte do solo.

A condutividade hidráulica do solo não modificou nos primeiros 20 cm. Os resultados encontrados nesse experimento contradizem alguns trabalhos que relatam a

compactação após a colheita florestal. Na subsuperfície, Ksat foi maior em três vezes na camada 10-20 cm e cinco vezes na camada 20-40 cm (Figura 12C).

A Ksat geralmente apresenta variância alta, tanto em diferentes quanto no mesmo solo. Ambus et al. (2023) analisaram um Planossolo no Rio Grande do Sul com diferentes sistemas de manejo e sistema integrado com pecuária e afirmam que solos com propriedades físicas semelhantes não necessariamente resultam em estrutura e funções semelhantes como a forma, distribuição e conectividade dos poros, a qual é essencial para o fluxo de água no perfil do solo.

Figura 12 – Atributos físicos de um Nitossolo Bruno sob floresta de pinus e em área de pós-colheita florestal



Nota: *Difere estatisticamente ($p=5\%$) pelo teste t. ⁽¹⁾FP: floresta de pinus; COL: área de pós-colheita florestal. ⁽²⁾DMG: diâmetro médio geométrico dos agregados; Ds: densidade do solo; Ksat: condutividade hidráulica saturada; RP: resistência do solo à penetração.

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

Andognini et al. (2020) estudaram dois Nitossolos Bruno argilosos com diferentes densidades e diferentes níveis de compactação, e observaram que a Ksat tem estreita relação com a macroporosidade (a qual reduz com a compactação) pois nela que a água flui livremente, observação que corrobora o estudo de Albuquerque et al (2001). Silva et al. (2009) avaliaram um Latossolo Vermelho de textura argilosa e relataram que num aumento de Ds de 1,45 para 1,58 g cm⁻³ a Ksat variou de 268 para 92 mm h⁻¹, afirmando que a continuidade dos poros favoreceu o fluxo de água na amostra.

Os resíduos de pinus são ricos em ceras, lipídeos e resinas, compostos que ao serem degradados formam material orgânico hidrofóbico que recobre as partículas do solo e causa repelência à água, o que no pinus pode ser um dos motivos pela redução da Ksat em profundidade (VOGELMANN; PREVEDELLO; REICHERT, 2015). No entanto, essa não é uma teoria que se confirma em sua totalidade. Zema et al. (2021) analisaram florestas de pinus com diferentes idades na região centro-leste da Espanha e mostraram que a Ksat em florestas mais velhas não diminui, pelo contrário, as áreas com pouco tempo de floresta plantada apresentaram menor condutividade de água.

Existem diversos motivos que alteram a Ksat, e por ser um atributo de grande variabilidade, merece mais estudos com fatores isolados, a fim de encontrar as principais causas dessa variação.

A resistência a penetração (RP) do solo também não diferiu nas duas primeiras camadas (0–10 e 10–20 cm), mas na camada de 20–40 cm foi maior na FP. Na superfície a FP atingiu 2,1 MPa, 19% menor que COL (2,6 MPa). Dos 10 aos 20 cm esse índice foi semelhante nos sistemas – 3,0 e 2,8 MPa na FP e COL, respectivamente. Por fim, na última camada a RP do sistema COL foi 29% menor que FP (2,7 e 3,8 MPa, respectivamente) (Figura 12D).

RP é um indicador de compactação do solo, sensível a mudança da Ds e umidade. Alguns autores afirmam que a partir de 2 MPa as plantas começam a sentir dificuldades em se desenvolver (LIMA et al., 2012; SILVA et al., 2008; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998). Também se aceita um limite de 3,5 MPa em áreas de plantio direto consolidado, ou para culturas de menor sensibilidade (ANDOGNINI et al., 2020; BETIOLI JÚNIOR et al., 2012; TORMENA et al., 2007).

Para fins de análise nesse experimento, utilizamos 3,5 MPa como valor limitante (Figura 12D), e verificamos que nenhum dos sistemas atingiu esse limite, exceto FP na camada de 20-40 cm. Como a umidade no momento da avaliação foi padronizada e a Ds era a mesma, atribui-se a esse resultado a variabilidade natural que existe nos solos.

Por fim, os resultados das análises físicas realizadas nas áreas de pinus e após a colheita nos mostram que o solo em questão não apresentou sinais claros de compactação, mas sim uma leve deformação na estrutura do solo, demonstrada pela redução do DMG, mas que não chega a ser crítico para a qualidade física desse solo. A colheita florestal mecanizada, desde que planejada e executada em umidade adequada não afeta negativamente a estrutura física do Nitossolo Bruno.

6.4 MUDANÇAS EM ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO APÓS IMPLANTAÇÃO DE PASTAGEM EM ÁREA DE COLHEITA FLORESTAL

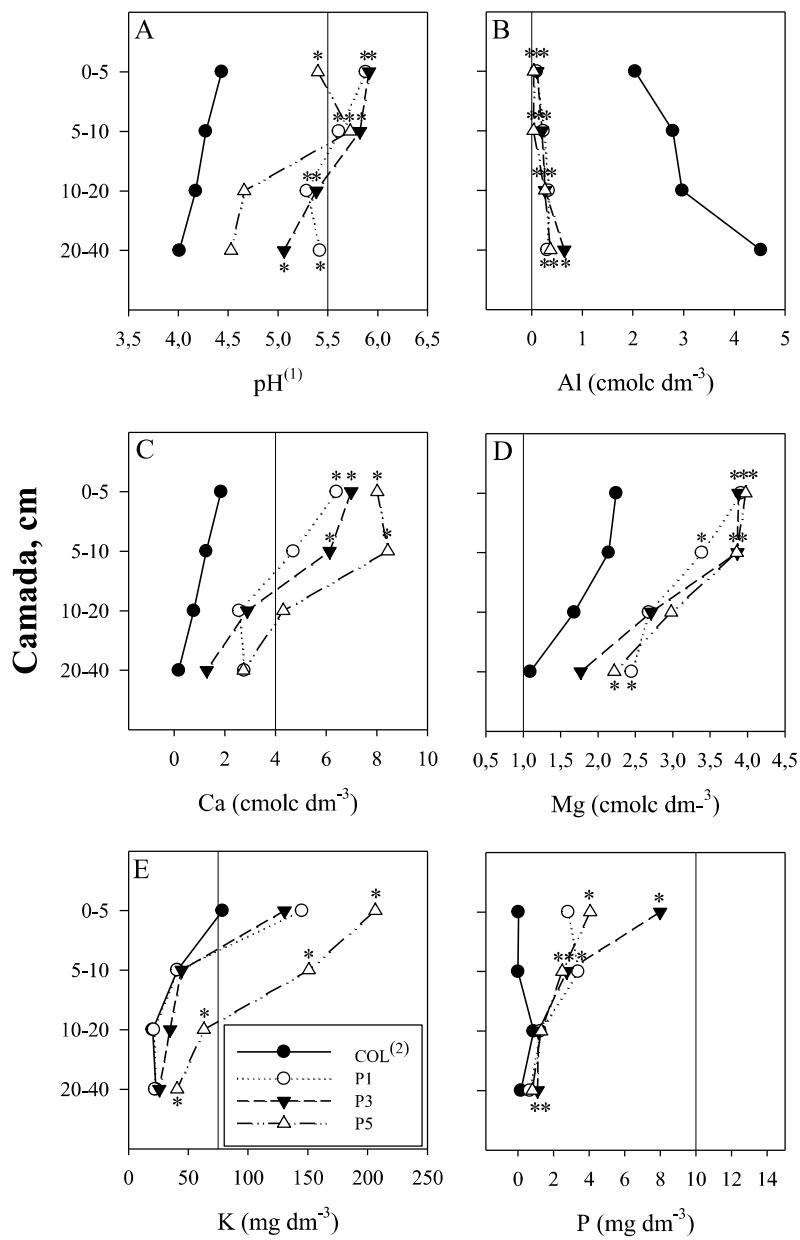
Avaliou-se o teor dos principais nutrientes essenciais à produção agrícola, o pH do solo em água e o teor de alumínio do solo em pastagem conduzida por diferentes anos, que foram implantadas no Nitossolo Bruno após o manejo de colheita florestal e os resultados comparados a uma área de pós-colheita de pinus, para verificar se existem melhorias nesses parâmetros após a correção de pH e adubação antes da semeadura.

Houve aumento do pH em todas as camadas avaliadas. Na superfície (0–5 e 5–10 cm) todas as áreas de pastagem foram estatisticamente maiores que a COL, e estão com pH próximo de 5,5 e 6,0. Nas camadas de 10–20 e 20–40 cm as áreas com um e três anos apresentaram respectivamente pH de 5,3 e 5,4 e diferiram estatisticamente de COL, no entanto PA5 com pH 4,5 nas duas últimas camadas foi igual a COL que apresentou pH igual a 4,0 (Figura 13A).

Acompanhando a correção do solo e elevação do pH, o teor de Al foi menor em todos as pastagens comparando-as com COL. Em todas as áreas e camadas da pastagem a concentração de Al esteve zerada, enquanto na COL encontrou-se 2,0 cmol_c dm⁻³ na camada 0-5 e 3,0 cmol_c dm⁻³ nas camadas entre 5 e 20 cm. A diferença na camada 20-40 cm foi maior ainda, passando de 4,5 cmol_c dm⁻³ para próximo de 0,0 nas pastagens (Figura 13B). Isso demonstra a importância da correção de acidez após o uso desse solo com florestas. O aumento do pH do solo é decorrente da correção realizada antes da semeadura da pastagem no seu primeiro ano. O Al está intimamente relacionado com o pH do solo: em pH baixo, o hidrogênio atua nos minerais e libera Al dentre outros íons, por consequência aumenta sua concentração na solução do solo.

Os teores de Ca e Mg aumentaram da área com COL para P1, P2 e P3, principalmente nas camadas 0–5 e 5–10 cm. As áreas com mais tempo de pastagem apresentaram teores maiores de Ca: 8,0 e 7,0 cmol_c dm⁻³ nas áreas P5 e P3, e 6,4 na P1 de 0-5 cm, e 8,4 e 6,1 cmol_c dm⁻³ nas áreas P5 e P3, e 6,4 cmol_c dm⁻³ na P1 (Figura 13C).

Figura 13 – pH e teores de Al, Ca, Mg, K e P no Nitossolo Bruno sob pastagem implantada após colheita florestal com diferentes anos de condução em comparação a área pós-colheita florestal em Campo Belo do Sul - SC.



Nota: *Difere estatisticamente da área COL ($p=5\%$) pelo teste t. ⁽¹⁾pH: pH do solo em água; Ca, Mg e Al: teores de cálcio, magnésio e alumínio trocável extraído por $KCl 1\text{ mol L}^{-1}$; P e K: teor de fósforo e potássio extraídos por Melich-1. ⁽²⁾COL: área de pós-colheita florestal; P1: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a um ano; P3: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a três anos; P5: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a cinco anos.

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

O Mg esteve com concentração parecida entre as áreas de pastagem. Na camada de 0-5 cm próximo de $4,0\text{ cmolc dm}^{-3}$, e foi reduzindo para próximo de $3,5, 2,8$ e $2,0$ nas camadas de 5-10, 10-20 e 20-40 cm respectivamente. Na primeira, segunda e quarta camada os sistemas com pastagem tem maior teor de Mg em relação a área COL (Figura

13D). Apesar das diferenças, todos os sistemas e camadas tem teor de Mg acima de 1,0 cmol_c dm⁻³, acima do nível crítico (NC) recomendado para cultivos.

Analizando o teor de K, apenas P5 diferiu de COL e isso em todas as camadas. Respectivamente de COL para P5 da primeira para a última camada, evoluiu de 79 para 206 mg dm⁻³, 41 para 151 mg dm⁻³, 20 para 63 mg dm⁻³ e 23 para 37 mg dm⁻³. P1 e P3 possuem teor próximo de 140 mg dm⁻³ na camada superficial, e nas demais teores sempre próximos da COL (Figura 13E).

O teor de P no solo aumentou nos 10 primeiros centímetros nas pastagens P3 e P5. Na camada de 10-20 cm não houve diferença e nos últimos 20 cm avaliados os teores ficaram próximos, no entanto houve diferença de P3 e P5 para COL, 1,1, 0,8 e 0,1 mg dm⁻³ respectivamente (Figura 13F).

Sabe-se que o Al é tóxico para as plantas e isso se manifesta principalmente na inibição do desenvolvimento radicular (ERNANI; BARBER, 1991; KARIMAEI; POOZESH; REZAEI, 2022). Numa faixa de pH próximo de 5,5 ou maior o Al trocável precipita na forma de AlOH-Al(OH)₂-Al(OH)₃ e tem sua toxidez reduzida, por isso a importância da correção do pH.

Como a maioria dos solos ocorrentes no Brasil, o Nitossolo Bruno em questão tem caráter ácido (KAMINSKI et al., 2007) e por isso o baixo pH e alto teor de Al em todo o perfil do solo é comum. O manejo de queima na área de colheita também pode ter algum efeito sobre a concentração de Al. Dick et al. (2008) estudaram o efeito da queima de pastagem em um Latossolo Vermelho distroférico típico de textura argilosa e verificaram que apesar do pH não alterar na pastagem após a queima, a saturação de Al aumentou na pastagem queimada. Em contrapartida, Simon et al. (2016) não observaram mudanças no pH e Al de um Latossolo Vermelho distrófico manejado com e sem utilização da queima de resíduos da superfície. Também há relato de aumento do pH e redução do Al após a queima, como encontrado por Rheinheimer et al. (2003) num Cambissolo Húmico alumínico do Planalto Sul Catarinense, essa mudança foi verificada principalmente na camada superficial. Todos esses estudos foram realizados com manejo de queima recorrente, realizada ano após ano, diferente do manejo pós-colheita de pinus, onde a queima acontece uma só vez. Portanto, a queima não parece ser um fator relevante para as modificações de pH e Al, atribuindo tais mudanças apenas a correção do solo.

Os teores de Ca e Mg elevaram com a utilização do calcário do tipo dolomítico (CaCO₃ MgCO₃) o qual possui em torno de 55% de carbonato de Ca e 45% de carbonato de Mg. O teor de Ca estava abaixo do nível crítico (NC) estabelecido para esse tipo de

solo (SILVA et al., 2016), e após a implantação da pastagem, nos primeiros 10 centímetros, a concentração do nutriente já superava esse limite. Apesar da incorporação até 20 cm, na camada 10–20 cm apenas na área P5 o teor foi maior que o NC. Isso pode estar relacionado a alguma falha na incorporação, que não incorporou corretico suficiente em profundidade, ou um atraso nas reações químicas de liberação do nutriente nessa camada. Abaixo dos 20 cm a concentração do Ca, em todos os sistemas, esteve abaixo do NC. Considera-se a camada arável (0–20 cm) para realizar incorporação do corretivo de acidez, portanto natural que o teor de Ca na última camada esteja menor, comparando-o ao teor inicial da área COL.

Semelhante ao Ca, o teor de Mg também aumentou mais nas duas primeiras camadas, reduzindo em profundidade. Apesar da redução na concentração o teor de Mg sempre ficou acima do NC desse solo (SILVA et al., 2016). Até mesmo antes da aplicação do calcário, o teor de Mg estava suficiente para o desenvolvimento das plantas, e numa concentração próxima do Ca.

Para o solo estar em condição de equilíbrio, a relação Ca:Mg deve estar próxima de 3:1 até 6:1 (BEAR; TOTH, 1948; CHAGANTI et al., 2021; DERU et al., 2021; ROSOLEM; MACHADO; BRINHOLI, 1984), e na área COL essa relação estava aquém do ideal, mas isso melhorou após a correção do solo e implantação da pastagem, com destaque à P5 onde a reação do corretivo está mais avançada e nos 10 cm superficiais Ca:Mg chegou a 2:1, o que indica maior qualidade química do solo visto que essa mesma relação no solo não antropizado (MN) está próximo de 2,5:1 (Figura 10).

Na tendência dos demais nutrientes, os teores de K foram incrementados após a implantação da pastagem, e como anualmente há adubação do nutriente na forma de KCl em superfície, os maiores teores encontram-se na camada de 0-5 cm. P5 destacou-se da COL em todas as camadas, no entanto somente nos 10 primeiros centímetros o teor do nutriente esteve acima do NC para o solo do estudo (SILVA et al., 2016). O solo em P1 e P3 esteve com teor de K acima do NC apenas na camada de 0-5 cm, o que pode ser prejudicial no desenvolvimento das plantas forrageiras. Após a queimada, pode haver tanto incremento quanto perda de K (FONTÚRBEL et al., 2021), mas levando em consideração a intensidade da queima e o tipo de material (lenhoso) a tendência é que o incremento da cinza no solo seja maior que a volatilização ou perda pelo vento.

Alguns trabalhos que avaliaram queima em florestas sugerem que há aumento de Ca e Mg logo após a queima, elevando temporariamente até o pH (FRAGOSO-SERVÓN;

CORONA; HERNÁNDEZ, 2022; SCHARENBROCH et al., 2012), mas os teores de K não alteram ou ainda reduzem (SCHARENBROCH et al., 2012).

Incremento de P foi verificado nas três áreas de pastagem da superfície até os 10 cm, e dos 20-40 cm, com exceção da P1 que diferiu de COL apenas dos 5 aos 10 cm. A primeira explicação para esse incremento do nutriente é a fosfatagem realizada na implantação da pastagem, entretanto outro fator pode ser importante para maior disponibilidade de P. Estudos tem abordado o efeito de queimadas sobre a disponibilidade de P, até porque esse nutriente é um dos mais limitantes no solo. Em ambientes florestais são relatados incrementos no P pela adição de cinzas do material queimado e mineralização da matéria orgânica (FONTÚRBEL et al., 2021). Em relação à camada do solo, no primeiro ano de pastagem após a queima a concentração de P foi maior dos 5-10 cm. Pomianoski et al. (2006) estudaram a queima de resíduos de bracatinga num Cambissolo Háplico e verificaram que a concentração de P aumentou nos 2 primeiros centímetros de solo, em contrapartida num estudo com pastagem queimada e natural sobre um Latossolo Vermelho, Dick et al. (2008) não verificaram modificação no teor de P nos 20 primeiros centímetros do perfil.

Resultados de Galang et al. (2010) mostraram que a intensidade e tempo de queima numa floresta de pinus modificam a concentração desse nutriente, e que o impacto de fogo com alta intensidade em pouco tempo é o mesmo de queima de pouca intensidade por longo tempo. Contudo, o impacto da queima na disponibilidade de P é variável nos diferentes ambientes, intensidade do fogo e tempo de duração da queima, e deixa claro que a fosfatagem foi a principal causa do aumento de P nas áreas com pastagem.

Dentre os atributos físicos, dois bastante importantes foram modificados na primeira camada (0–10 cm) após a transição de uso: a resistência a penetração (RP) e a condutividade hidráulica do solo (Ksat).

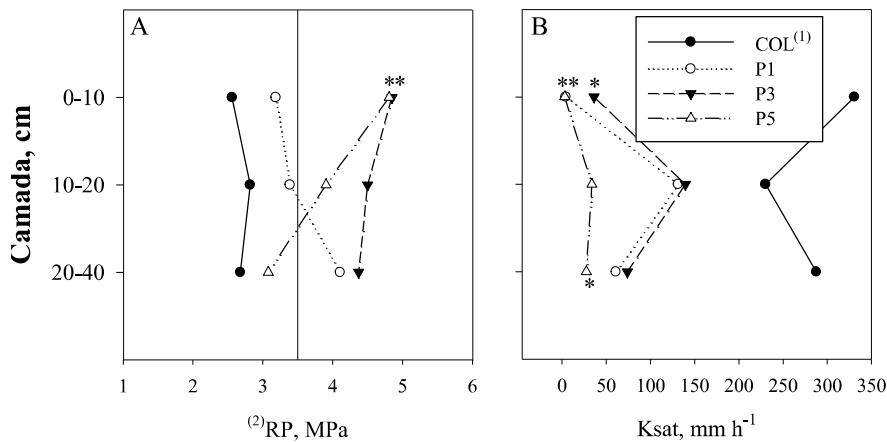
A RP nos sistemas P3 e P5 praticamente dobrou quando comparado à COL, passando de 2,5 para 4,8 MPa (Figura 14A). A Ksat reduziu em todas as áreas com pastagem (0–10 cm), passando de 330 mm h⁻¹ na COL para 4, 36 e 3 mm h⁻¹ em P1, P3 e P5, respectivamente (Figura 14B). Na última camada na P5 foi menor que COL, 27 e 288 mm h⁻¹ respectivamente.

Como mencionado, foi considerado para áreas com pastagem e sem revolvimento do solo um valor de RP de 3,5 MPa como limite crítico, sendo que acima deste pode-se considerar que as plantas sintam dificuldade em desenvolver as raízes. Analisando pelo limite, COL e P1 ficaram abaixo, mas em contrapartida em P3 e P5 (0–20 e 0–40 cm,

respectivamente) ficaram acima deste limite (Figura 14A). Já na comparação com COL (2,6 MPa) apenas P3 e P5 dos 0 aos 10 cm foram diferentes, ambos com 4,8 MPa.

A maior RP do solo na superfície é causada pela intensidade principalmente do pisoteio animal. Apesar do manejo ser feito respeitando o período de crescimento vegetativo, a carga animal é elevada. Em um experimento para avaliar o efeito do pisoteio do gado na compactação do solo Bezkorowajnyj et al. (1993) constataram que nos meses de setembro e outubro, após o período de maior densidade animal no pasto, houve aumento da RP no primeiro mês até os 14 cm e no segundo até 24 cm. Abaixo dos 30 cm a distribuição da RP foi desigual, portanto, os autores concluem que esse efeito ocorre na superfície do solo. Valani et al. (2022) avaliaram propriedades físicas de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de pastejo e uma área controle (mata nativa) e verificaram na camada de 0 a 10 cm aumento da RP nas áreas de pastagem, indicando um processo de compactação do solo. Nesse mesmo experimento RP não diferiu entre os sistemas integração lavoura/pecuária e não integrado dando a entender que o tráfego de máquinas não interferiu no processo de compactação.

Figura 14 – Resistência a penetração (RP) e condutividade hidráulica saturada (Ksat) de um Nitossolo Bruno sob pastagem implantada após colheita de pinus com um (P1), três (P3) e cinco (P5) anos de condução comparadas à área de pós-colheita florestal (COL).



⁽²⁾ RP: resistência do solo à penetração; Ksat: condutividade hidráulica saturada.

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

As medições de Ksat revelaram redução da condutividade de água na superfície do solo (0–10 cm) em todas as áreas com presença do gado (Figura 14B). Esse resultado indica que, já no primeiro ano de mudança de uso do solo, mesmo com as práticas

mecânicas (aração e gradagem) o adensamento das partículas resultante principalmente da pressão dos animais promove a compactação ou reduz a continuidade dos poros.

As propriedades hidráulicas do solo governam a absorção de água pelas plantas (GARDNER, 1964; REICHERT et al., 2011) e a redução de K_{sat} reduz o fornecimento de água em profundidade, que afeta o desenvolvimento das plantas principalmente em épocas de déficit hídrico.

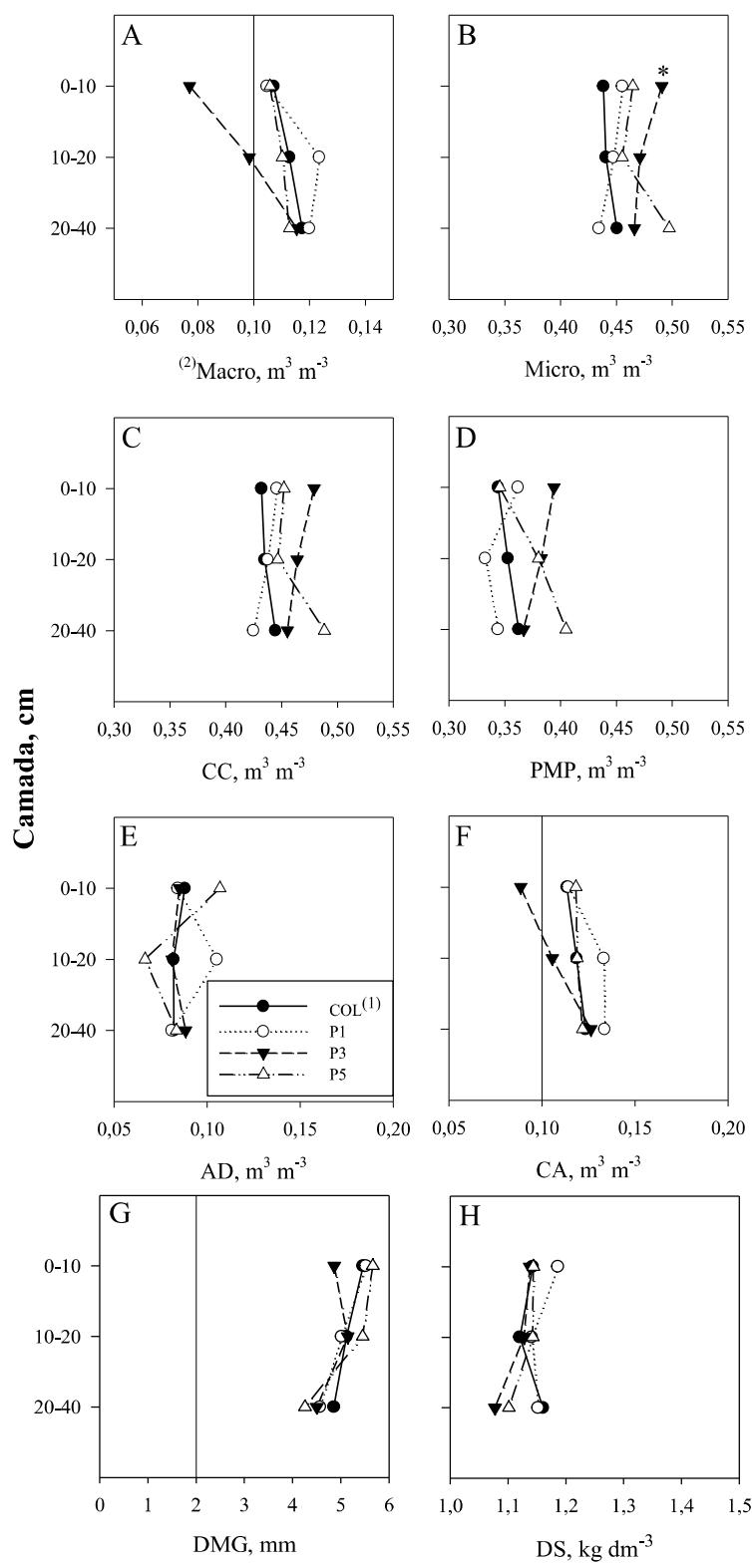
K_{sat} tem uma relação próxima com a porosidade do solo (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007) mas também é dependente de outros fatores (GONÇALVES; MORAES, 2012). Nesse solo percebemos que, dentre todos os sistemas, existe correlação positiva da K_{sat} com a macroporosidade (0,83) e negativa com a D_s (-0,81), especialmente de 0 a 10 cm (Figura 9A). As Figura 15A e H mostram que não houve modificação da macro (tanto que P1 e P5 apresentam o mesmo valor que COL) e da D_s, o que faz crer que outro fator está influenciando na redução da K_{sat}.

Embora existam estudos sobre a hidrofobicidade de tipos de material orgânico à água (como citado no item 6.3), ainda são incipientes e há resultados contraditórios, portanto, o que podemos deduzir é que há uma descontinuidade do sistema poroso do solo que impede a passagem de água e diminui a K_{sat} nos sistemas com pisoteio.

A maioria dos demais atributos físicos analisados nas áreas de pastagem não diferiram entre os sistemas com pastagem da área com COL. Densidade do solo, macro e microporosidade, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível, capacidade de aeração e diâmetro médio geométrico mantiveram-se estáveis após o manejo pós-colheita florestal e a implantação da pastagem até o quinto ano de condução do pasto (Figura 15). Isso demonstra a grande estabilidade que o referido solo tem, suportando grandes cargas e intenso manejo sem grandes prejuízos à sua qualidade física.

Andognini et al. (2020) estudaram um Nitossolo Bruno muito argiloso semelhante ao aqui analisado e encontraram densidade máxima de 1,32 kg dm⁻³ determinada pelo teste de Proctor normal. Na primeira camada a DS foi de 1,14 kg dm⁻³ nos sistemas COL, P3 e P5, e de 1,19 kg dm⁻³ no P1 (Figura 15H). Se dividirmos a densidade dos sistemas de uso pela densidade máxima determinada por Andognini et al. (2020), observamos que o grau de compactação (GC) dos sistemas ficou entre 85 e 90% da densidade máxima do solo, e isso representa uma faixa ótima para o crescimento das plantas (SILVA; ALBUQUERQUE; COSTA, 2014; SUZUKI et al., 2007; TELES et al., 2021).

Figura 15 – Atributos físicos de um Nitossolo Bruno sob pastagem implantada após colheita de pinus com um (P1), três (P3) e cinco (P5) anos de condução comparadas à área de manejo pós-colheita florestal (COL).



Nota: *Difere estatisticamente da área COL ($p=5\%$) pelo teste t. ⁽¹⁾COL: área de pós-colheita florestal; P1: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a um ano; P3: pastagem conduzida a três anos; P5: pastagem conduzida a cinco anos. ⁽²⁾Macro: macroporos; Micro: microporos; CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; AD: água disponível; CA: capacidade de aeração; DMG: diâmetro médio geométrico dos agregados; DS: densidade do solo.

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

Apesar de não diferir, a macroporosidade no P3 ficou abaixo do valor limite de 0,10 m³ m⁻³ (VOMOCIL; FLOCKER, 1961) (0–20 cm) (Figura 15A). Alguns poros maiores foram comprimidos, visto o aumento da microporosidade nesse sistema (0–10 cm) (Figura 15B), no entanto, a umidade do solo tanto na CC quanto no PMP foram numericamente maiores que os demais sistemas e o solo manteve o volume de AD estável (Figura 15E), isso indica que os microporos criados dos macro provavelmente são microporos de tamanho próximo do limite entre esses (50 µm).

Embora a AD não diferiu, há uma consequência do aumento da umidade no PMP: em época de déficit hídrico as plantas na P3 externarão sinais de falta d'água precocemente às demais áreas.

A curva de retenção de água no solo (CRA) é uma forma de visualizar a umidade respectiva de diferentes potenciais de água no solo, ajustada pelo modelo de Van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980) apresenta poucos erros em solos argilosos (AMORIM et al., 2022).

Analizando a curva de retenção de água no solo (CRA) vê-se que quando a umidade do solo atingir 0,40 m³ m⁻³ P3 estará na situação mais crítica pois tem maior PMP, enquanto em COL P5 e P1 as plantas ainda terão condições de retirar água do solo (Figura 16). Andognini et al. (2020) ajustaram a CRA de um Nitossolos Bruno de textura muito argilosa em diferentes níveis de compactação e apenas na densidade máxima (1,24 g cm⁻³) a umidade volumétrica no PMP atingiu 0,40 m³ m⁻³. Outros atributos como macro, micro, AD e CA foram os mesmos dos encontrados na P3. Comparando a umidade no PMP de COL, P1 e P3 com a do solo do estudo anteriormente citado, corresponderia a um grau de compactação de 85%, portanto adequado para o desenvolvimento das plantas.

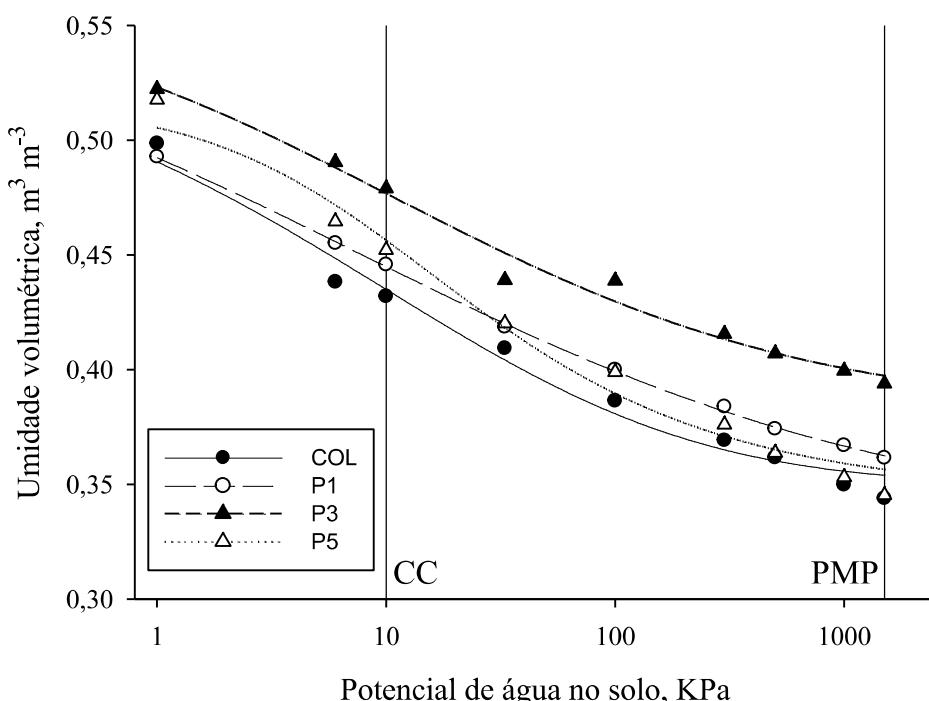
As diferenças na distribuição dos poros modificam não somente o fluxo de água, mas também de ar, e por isso é importante um volume de poros livre de água para formar a atmosfera do solo na qual ocorrerão as trocas gasosas das raízes. Para a CA considerase um limite de 0,10 m³ m⁻³ (BAVER; FARNSWORTH, 1941; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998) dentro do qual o risco de haver anoxia e prejudicar o desenvolvimento das plantas é baixo. A CA na superfície (0–10 cm) teve uma correlação direta (0,72) com DMG (Figura 9A), indicando que quanto mais estruturado o solo, melhor é a capacidade de fornecer condições adequadas às raízes se desenvolverem.

Fortalecendo essa ideia, Reis et al. (2019) verificaram que em um Latossolo sob integração lavoura-pecuária no município de Castro, estado do Paraná, há forte correlação

entre aeração do solo e porosidade (volume, tamanho, forma e ligação) com destaque à camada de 0–10 cm como sendo mais afetada pelos processos físicos de modificação da estrutura. Ou seja, quanto mais estruturado o solo, maior o volume de poros interligados de tamanho e forma tal qual favorecem os processos hidrológicos e de aeração.

A transição do uso do solo para utilização como pastagem de corte afetou as propriedades químicas do solo visto a melhoria do pH, eliminação do Al tóxico e aumento no teor de nutrientes essenciais às plantas. Essa melhoria se deve fundamentalmente pela correção de pH (que também elimina Al) e adubações de correção e manutenção. Em contrapartida houve danos aos atributos físicos, com destaque a K_{sat} e RP, que indicam um princípio de compactação do solo. Atribui-se o pisoteio animal como causa principal da compactação já que o manejo preconiza o mínimo de interferência mecânica e a movimentação do solo ocorre apenas na linha de plantio das espécies forrageiras. No primeiro ano de utilização da área com pastagem (P1) a RP não está no limite crítico, mas com o passar dos anos (P3 e P5) a RP do solo ultrapassa os 3,5 MPa.

Figura 16 – Curva de retenção de água de um Nitossolo Bruno do município de Campo Belo do Sul sob diferentes usos.



Nota: ⁽¹⁾COL: área de pós-colheita florestal; P1: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a um ano; P3: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a três anos; P5: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a cinco anos; CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente.

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

6.5 AVALIAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO SOB PASTAGEM E COLHEITA DE FLORESTA DE PINUS

Comparou-se o estoque de C na COL com o das áreas de pastagem e verificou-se que os diferentes usos do solo têm influência no eCOT em todo perfil de solo (Figura 17).

Logo após o manejo de pós-colheita do pinus o solo possuía 31 Mg ha⁻¹ de C de 0-5 cm, e na área com um ano de pastagem o estoque era de 32 Mg ha⁻¹. Nas áreas P3 e P5 o eCOT reduziu para 24 e 23 Mg ha⁻¹ respectivamente, o que representa 23% de redução no eCOT (Figura 17).

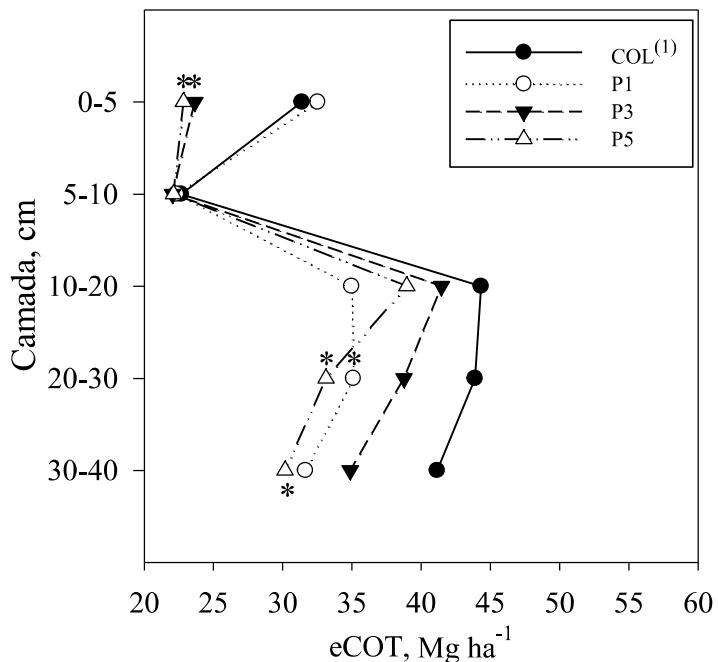
De acordo com estudo realizado por James e Harrison (2016), analisando uma base de dados com 945 observações sobre a perda de C após colheita de florestas, em média há redução do C do solo em 11%. Esse dado é uma média de diversos solos, camadas e vários locais do mundo. Segundo os mesmos autores, as maiores perdas ocorrem em horizontes que contêm naturalmente maior teor de C.

Pellegrini et al. (2018), numa metanálise, estudaram o efeito de queimadas no estoque de C, N e nutrientes do solo em 48 locais ao redor do mundo com diferentes vegetações e intensidades de incêndio. Nesse estudo, relatam que alta frequência de queimada reduziu teor de C em florestas de folhas largas e pastagens, mas em contrapartida nas florestas de coníferas houve aumento de 26%, em média, no teor de C do solo. No entanto, a resposta do solo nesse curto prazo, em resposta a uma única queima é limitada pois a atividade biológica entre plantas e microrganismos ainda é baixa.

Ao longo do tempo em que o solo é usado com pastagem percebe-se que há redução do eCOT. Na área mais velha (P5) a queima ocorreu a cinco anos, e o eCOT é menor na camada de 0-5 cm, e dos 20 aos 40 cm, com respectiva redução de 27 e 26% em relação à área de colheita (COL) (Figura 17).

Existem estudos que afirmam que o C no solo com culturas forrageiras aumenta gradativamente com o manejo correto do solo. Na Califórnia, Dass et al. (2018) mostraram que as pastagens, quando bem conduzidas são um dreno de carbono mais eficiente que as florestas. Isso pode ser explicado por que as florestas acumulam o C na sua biomassa fora do solo e na superfície do solo na serapilheira (JANOWIAK et al., 2017), enquanto em um ecossistema de pastagens, aproximadamente 81% do C está em subsuperfície (ADAMS et al., 1990).

Figura 17 – Estoque de Carbono de um Nitossolo Bruno onde houve mudança de uso de pinus para pastagem, utilizado por um, três e cinco anos com pastejo em comparação à área de colheita florestal no município de Campo Belo do Sul-SC.



Nota: *Difere estatisticamente da área COL ($p=5\%$) pelo teste t. ⁽¹⁾ COL: área de pós-colheita florestal; P1: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a um ano; P3: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a três anos; P5: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a cinco anos; eCOT: estoque de carbono do solo.

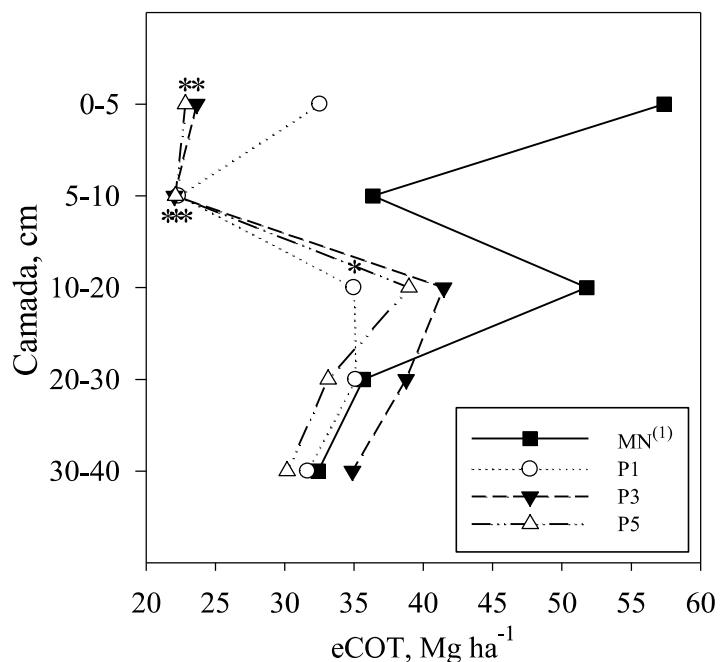
Fonte: produção do próprio autor, 2023.

Evidente que, numa floresta nativa não perturbada, com muitos anos de deposição e ação biológica, as camadas superficiais seriam mais ricas em C. No entanto, deve-se dar especial atenção às possíveis condições das pastagens para aumentar os teores de C no solo mais profundo. Por esse motivo, foi realizada a comparação do eCOT da MN com as áreas de pastagem (Figura 18).

De 0-5 e 5-10 cm, a MN possui um estoque de 57 e 36 Mg ha⁻¹, correspondente a 2,4 e 1,6 vezes o eCOT das áreas de pastagem, significativamente maior. Dos 10 cm abaixo não ocorre essa diferença, exceto pela P1 na camada de 10-20 cm (Figura 18), onde o teor é menor. O estoque de C na área nativa (MN) encontrado nesse estudo, nas duas primeiras camadas, é maior que o descrito por Mafra et al. (2008) nas mesmas camadas de Nitossolo no mesmo município sob mata nativa (26 e 19 Mg ha⁻¹, respectivamente) e floresta de pinus de 20 anos (20 e 18 Mg ha⁻¹, respectivamente).

A redução do eCOT ao longo do tempo demonstra que o sistema tem um balanço negativo de C, esse balanço é causado por perdas maiores que o aporte de C no solo.

Figura 18 – Estoque de Carbono de um Nitossolo Bruno utilizado por um, três e cinco anos com pastagem implantada após colheita florestal de pinus em comparação à área de mata nativa no município de Campo Belo do Sul – SC.



Nota: *Difere estatisticamente da área MN ($p=5\%$) pelo teste t. ⁽¹⁾ MN: mata nativa; P1: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a um ano; P3: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a três anos; P5: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a cinco anos; eCOT: estoque de carbono do solo.

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

Num experimento de longa duração em Argissolo Vermelho do Rio Grande do Sul, Costa et al. (2008) encontraram balanço positivo de C num ambiente com cultivo anual de milho e densa cobertura do solo (aveia-preta, ervilhaca comum e caupi) na entressafra sob plantio direto. O preparo convencional resultou em balanço negativo de C. Silveira et al. (2000) simularam através de modelos a transição de floresta nativa para pastagem no vale do Rio Piracicaba em São Paulo, e as simulações indicaram redução do eCOT de 24% em 20 anos. Já em um estudo de longo prazo de conversão de floresta nativa para pastagem na Austrália, Dalal et al. (2021) registraram redução do eCOT em 12% já no segundo ano de transição para pastagem com capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* cv. Biloela), após esse período o estoque não mais diferenciou-se até os 33 anos de condução da pastagem. No mesmo estudo verificaram que a transição de floresta nativa para uso com culturas anuais, reduziu em torno de 40% o eCOT de 0 a 30 cm.

A pastagem anual implementada após colheita de pinus e conduzida no sistema de pastejo rotacionado no Nitossolo Bruno não recuperou o eCOT num período de até cinco anos de condução, pelo contrário, houve perda de C principalmente na camada

superficial, o que indica que a biomassa vegetal agregada ao solo não está sendo suficiente para repor as perdas.

6.6 AGRUPAMENTO DE ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO SOB DIFERENTES USOS

A análise multivariada é um instrumento importante em experimentos com um grande conjunto de dados. Através de componentes principais (ACP) buscou-se integrar todas as áreas e atributos analisados em uma única análise que demonstrasse a evolução das características do solo com os diferentes usos nas diferentes camadas, bem como a correlação dos sistemas com os atributos testados.

A ACP da camada de 0–10 cm (Figura 19A) mostra que os dois primeiros componentes principais (CP) explicam 80% (CP1 = 46,3%; CP2 = 33,4%) da variância. O eixo 1, que modelou 46,3% da variância, claramente separou em dois grupos os sistemas MN, FP e COL do P1, P3 e P5.

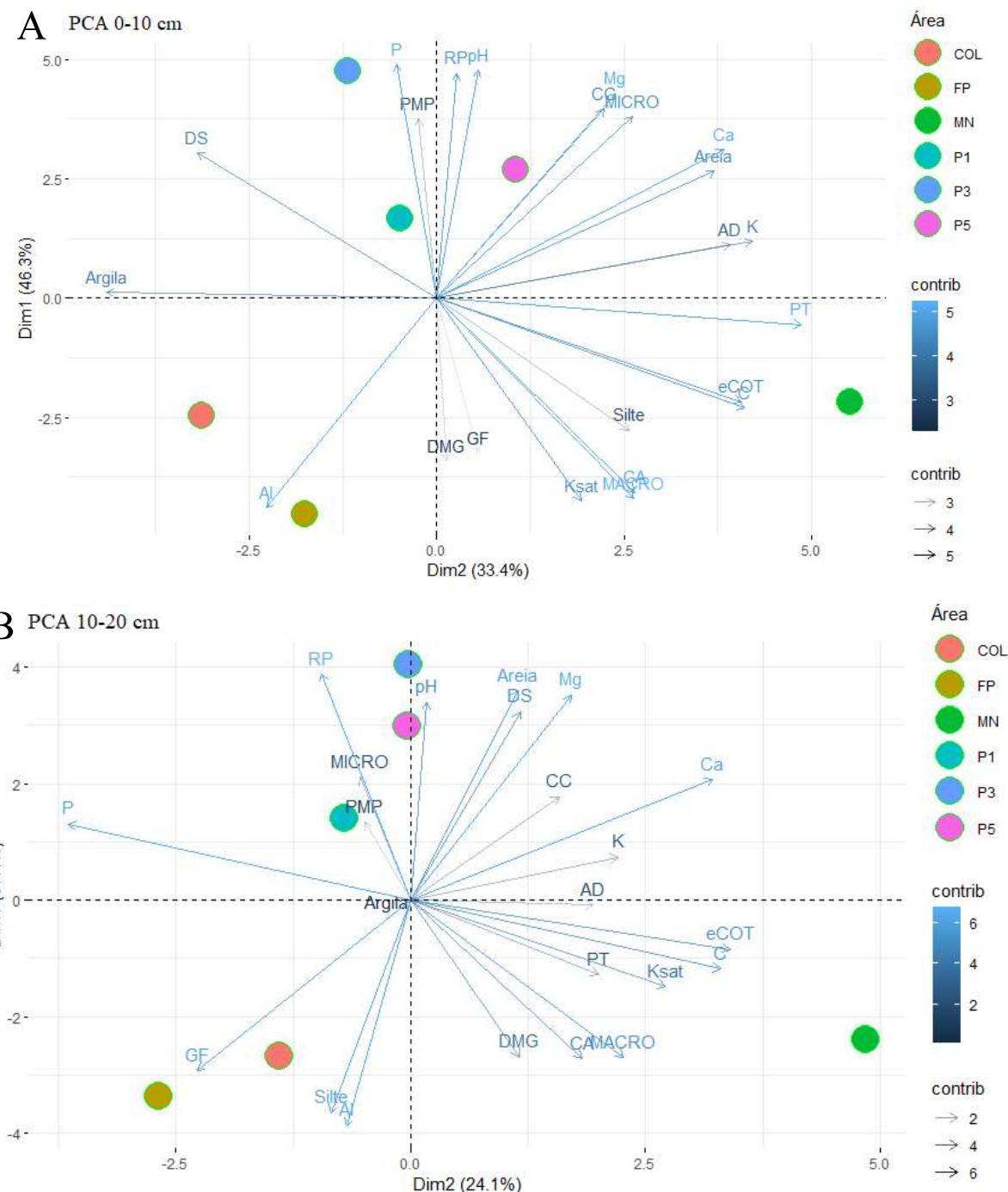
MN tem maior relação com atributos de qualidade do solo, com forte contribuição de PT, C e eCOT, e contribuição mais fraca de atributos de estruturação do solo (Ksat, macro e CA). As áreas FP e COL encontram-se próximas de MN, indicando semelhança entre os atributos do solo nesses locais. A maior correlação nessas duas áreas foi do teor de Al, que reitera o que já foi dito anteriormente: o uso do solo com pinus diminui o pH do solo (relação inversa) e aumenta a concentração de Al tóxico às plantas, exigindo correção previa ao próximo cultivo. DMG e GF também tem uma relação maior com esses sistemas, porém com menor contribuição. O menor vetor desses dois últimos atributos indica que o resultado de todos os sistemas está próximo da média.

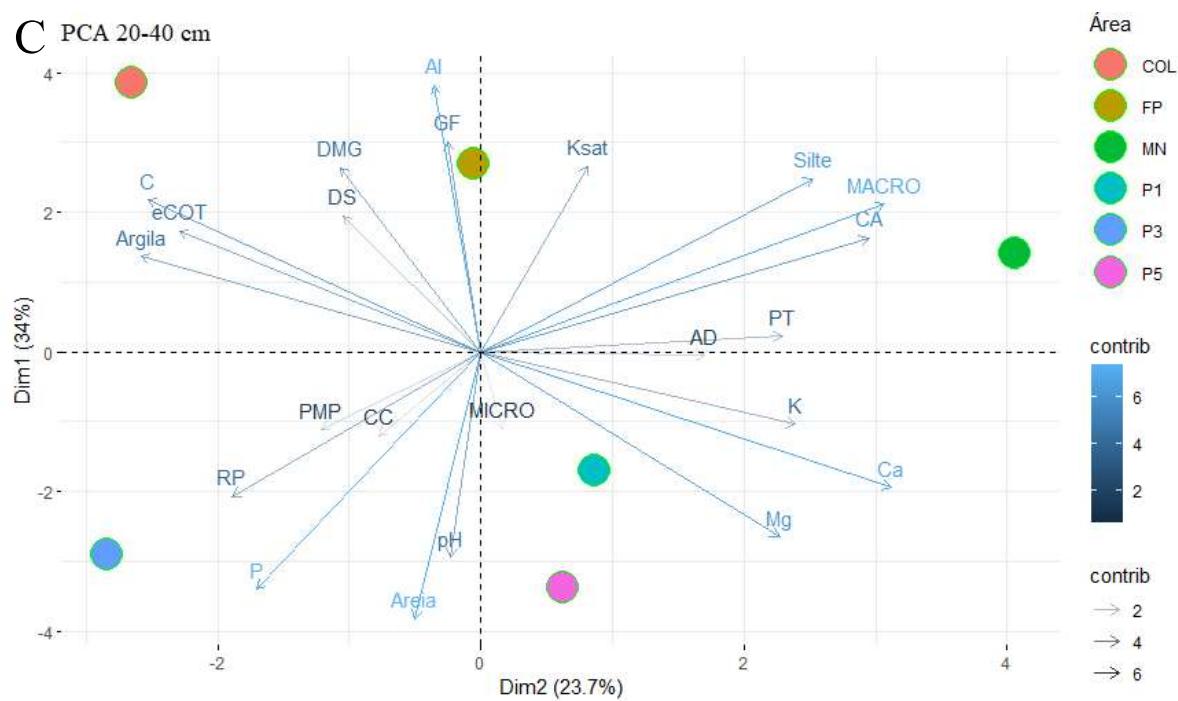
As áreas de pastagem concentraram-se próximas umas das outras, também indicando semelhança entre os atributos nesse sistema nos distintos anos de condução. Teor de Ca, Mg, P e pH são atributos com forte relação com esse sistema, isso devido a correção do pH e adição de nutrientes antes da implantação e adubação anual de manutenção da pastagem. Apesar da melhor condição química, a relação forte com RP, CC, micro e Ds, a proximidade com o vetor do PMP, e a relação inversa com CA, C e eCOT, Ksat e macro, indica que esse sistema está passando por um processo de compactação do solo.

O CP1 (37,4%) e CP2 (24,1%) na ACP da camada 10–20 cm (Figura 19B) explicam 61,5% das variâncias entre os atributos analisados. O comportamento dos sistemas de uso e vetores dos atributos do solo nessas duas camadas foi semelhante à da

primeira, com atributos de qualidade do solo mais relacionados à MN, atributos químicos (nutrientes e pH) mais relacionados às pastagens, além de atributos de retenção de água (CC, PMP e micro) e aqueles que representam processo de degradação do solo (RP e Ds). Os sistemas COL e FP além do Al, tiveram forte relação com GF. DMG teve maior contribuição do que na primeira camada, e ficou intermediário entre MN e FP+COL.

Figura 19 – Análise de componentes principais de atributos do Nitossolo Bruno sob diferentes sistemas de uso em três camadas no município de Campo Belo do Sul – SC.





Nota: COL: área de pós-colheita florestal; FP: floresta de pinus; MN: mata nativa; P1: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a um ano; P3: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a três anos; P5: pastagem implantada após colheita florestal conduzida a cinco anos; pH: pH do solo em água; Ca, Mg e Al: cálcio, magnésio e alumínio trocável extraído por $KCl 1\text{ mol L}^{-1}$; P e K: fósforo e potássio extraídos por Melich-1; C: carbono total; eCOT: estoque de carbono; DMG: diâmetro médio geométrico dos agregados; Ds: densidade do solo; Ksat: condutividade hidráulica saturada; RP: resistência do solo à penetração; PT: porosidade total; Macro: macroporos; Micro: microporos; CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; AD: água disponível; CA: capacidade de aeração; GF: grau de floculação das argilas;

Fonte: produção do próprio autor, 2023.

Na última camada (20-40 cm), o CP1 (34%) e CP2 (23,7%) explicam 58% da variabilidade dos dados. Nessa camada há uma diferença das demais, COL é correlacionada com C, eCOT e Ds, além da maior contribuição do DMG nesses sistemas. O teor de Al segue com forte relação principalmente com a FP. A relação dos demais atributos com os sistemas seguem o padrão das demais camadas (Figura 19C).

De acordo com a correlação entre os atributos e a força com que atuam dentro de cada sistema, a ACP resume o que acontece dentro de cada camada numa visão macro, observando todo o conjunto de atributos e dos sistemas, diferente das análises individualizadas. Nesse sentido, percebe-se que com a remoção da MN e transição para outros sistemas como floresta de pinus ou pastagem, há redução do estoque de carbono no solo. Além disso, há modificações negativas nos atributos físicos do solo, especialmente na camada superficial (0–10 cm) das pastagens, o que representa indícios de degradação física. Também podemos perceber que o cultivo de pinus no Nitossolo Bruno culminou com redução do pH e do teor de nutrientes, e por consequência aumento

do teor de Al no solo. As camadas subsuperficiais seguem uma relação “atributos x sistemas” semelhante à superficial, no entanto a menor porcentagem de explicação das variâncias dos componentes principais um e dois nas camadas 10–20 e 20–40 cm indicam que a influência dos atributos testados não é tão forte quanto na superfície, ou seja, tanto a recuperação química do solo quanto o processo de compactação são mais intensos nos 10 primeiros centímetros das pastagens.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As características do solo sob diferentes usos são variáveis, especialmente quando se trata de mata nativa com áreas cultivadas. Indicadores físicos de qualidade são importantes para determinar se o solo passou ou passa por algum processo de degradação, e a partir deles realizar a correta avaliação, planejamento e tomada de decisão sobre a melhor estratégia de uso e manejo do solo.

A maioria dos solos do Brasil são quimicamente pobres, e por isso quando há mudança de uso para cultivos florestais e/ou anuais devem ser corrigidos e adubados de acordo com a recomendação para a(s) espécie(s) desejada(s). No Nitossolo Bruno da região do Planalto Sul Catarinense, a área de mata nativa, onde não houve intervenção antrópica, há restrições principalmente relacionados com elevado teor de Al e baixo pH e teor de fósforo. No entanto, o uso do solo com floresta de pinus piora a condição química desse solo, além de reduzir o pH e aumentar o teor de alumínio tóxico, ainda há redução dos teores de cálcio, magnésio e potássio, tudo isso com maior intensidade na camada superficial, a mais importante para o cultivo de plantas. Isso quer dizer que, na mudança de uso do solo de floresta de pinus para culturas anuais, a análise de solo para determinar a necessidade de corretivo de acidez e a adubação é de extrema importância.

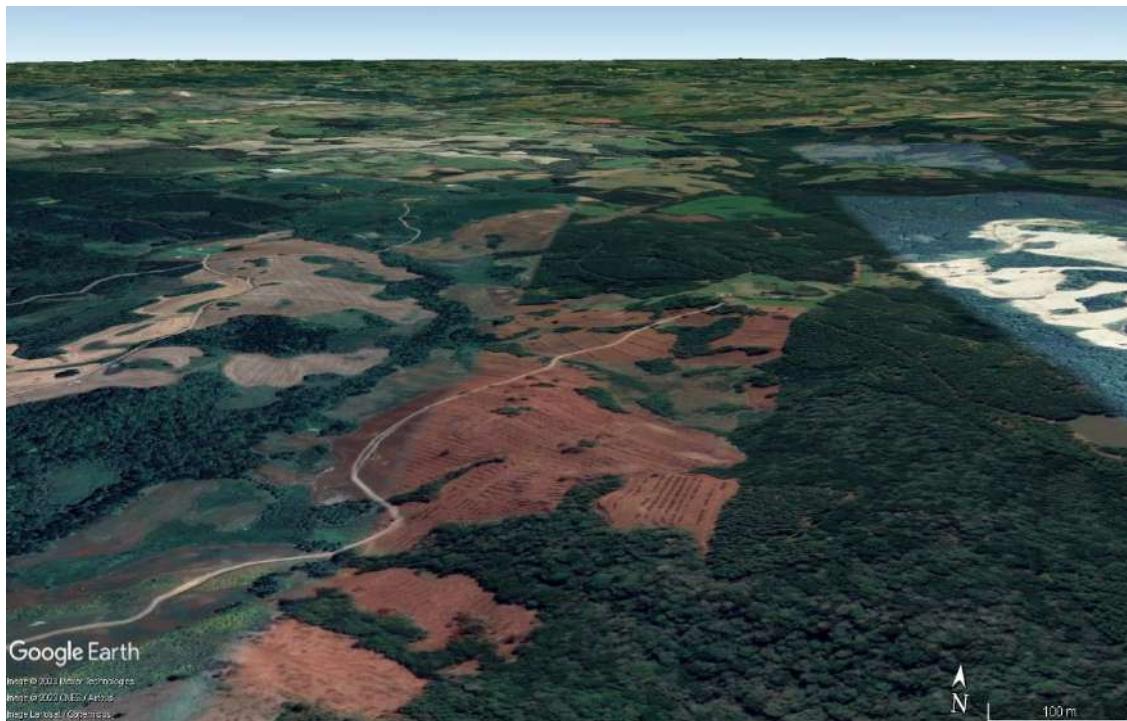
A implementação de pastagens com a aplicação de calcário dolomítico aumenta o pH do solo a níveis favoráveis para o desenvolvimento das plantas, além de neutralizar o alumínio tóxico e elevar os teores de cálcio e magnésio. No Nitossolo Bruno da região, em virtude do alto teor de argila e matéria orgânica, a adubação fosfatada assume crucial importância, pois a disponibilidade do fósforo no solo de mata nativa é muito baixa, sendo este elemento essencial para o crescimento das plantas.

O Nitossolo Bruno destaca-se por sua estabilidade física excepcional. Mesmo sob o cultivo de pinus e após o manejo de colheita e pós-colheita florestal, não se observaram alterações nos atributos do solo que indicassem degradação. No entanto, o uso desse solo para pastagem revelou um início de degradação física por compactação, principalmente na superfície. Essa compactação se manifesta através do aumento da resistência à penetração do solo, especialmente em pastagens com três e cinco anos de manejo, excedendo um nível crítico definido na literatura, e da redução da condutividade hidráulica saturada. Essa redução pode desencadear problemas como aceleração do escoamento superficial, perdas de solo, água e nutrientes e falta de água para as plantas em períodos de estiagem.

O impacto das mudanças climáticas, impulsionadas pela emissão de gases de efeito estufa, é uma realidade inegável. O solo, um dos principais sumidouros de carbono do planeta, assume papel crucial na mitigação desses efeitos. A região do Planalto Sul de SC, tem solos com alto teor de matéria orgânica – fonte de carbono –, oferece oportunidades para manejo sustentável. Aumentar a fixação de carbono no solo, alcançando um balanço positivo (mais carbono armazenado do que emitido), é fundamental. No entanto, o uso do Nitossolo Bruno com pastagem, em curto prazo (até cinco anos), reduz o estoque de carbono no solo em quase 50% na camada de 0 a 10 cm, quando comparado ao solo sob mata nativa. Evidencia-se, portanto, a necessidade de um manejo mais adequado do Nitossolo Bruno na região, visando evitar a degradação física e a perda significativa de carbono.

ANEXO

Anexo 1 – Aspecto da paisagem de relevo suave ondulado a ondulado e predomínio de Nitossolos na área da realização do experimento no município de Campo Belo do Sul – SC.



Fonte: Imagem do Google Earth®, 2023.

REFERÊNCIAS

- ACHAT, D. L. et al. Forest soil carbon is threatened by intensive biomass harvesting. **Scientific Reports**, v. 5, p. 15991, 2015.
- ACR. **Anuário estatístico de base florestal para o estado de Santa Catarina 2022 (Ano base 2021)**. Lages: ACR - Associação Catarinense de Empresas Florestais, 2022.
- ADAMS, J. M. et al. Increases in terrestrial carbon storage from the last glacial maximum to the present. **Nature**, v. 348, p. 711–714, 1990.
- ALBUQUERQUE, J. A. et al. **Métodos de análises físicas do solo e cálculos**. Lages: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2017.
- ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 717–723, 2001.
- ALMEIDA, H. C. et al. Distribution of chemical compartments of soil organic matter and c stocks of a Cambisol from south Brazil as affected by Pinus afforestation. **Química Nova**, v. 35, n. 7, p. 1329–1335, 2012.
- ALMEIDA, J. A. et al. Clay mineralogy and chemical properties of soils in the north plateau of Santa Catarina state. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 2, p. 267–277, 2018.
- ALVES, B. J. R. et al. Dinâmica do carbono em solos sob pastagem. Em: SANTOS, G. A. et al. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 561–569.
- AMBUS, J. V. et al. Integrated crop-livestock systems in lowlands with rice cultivation improve root environment and maintain soil structure and functioning. **Soil and Tillage Research**, v. 227, 1 Mar. 2023.
- AMORIM, R. S. S. et al. Water retention and availability in Brazilian Cerrado (neotropical savanna) soils under agricultural use: Pedotransfer functions and decision trees. **Soil and Tillage Research**, v. 224, 1 Out. 2022.
- AMURES. **Lages completa 245 anos de fundação**. Disponível em: <<https://amures.org.br/noticias/index/ver/codMapaItem/41771/codNoticia/116912>>. Acesso em: 28 set. 2022.
- ANDOGNINI, J. et al. Soil compaction effect on black oat yield in Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. e0190157, 2020.
- ANDRADE, T. C. G. R. DE et al. Influence of phosphorus fertilization on the response of pinus genotypes to glyphosate subdoses. **New Forests**, v. 53, n. 1, p. 143–160, 1 Jan. 2022.
- ANDRADE, M. L. C. et al. Soil compaction caused by harvest and logging operations in eucalyptus forests in coarse-textured soils from northeastern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 2, p. 191–200, 2017.
- ÁVILA, A. C. M. et al. Climate change and its effect on the soil water balance of Lages, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, p. 2796–2809, 2022.

- BAVER, L. D.; FARNSWORTH, R. B. Soil structure effects in the growth of sugar beets. **Soil Science Society of America Journal**, v. 5, n. C, p. 45–48, 1941.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4. ed. Nova Iorque: Wiley, 1972.
- BEAR, F. E.; TOTH, S. J. Influence of calcium on availability of other soil cations. **Soil Science**, v. 65, n. 1, p. 69–74, 1948.
- BETIOLI JÚNIOR, E. et al. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 971–982, 2012.
- BEUTLER, A. N. et al. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 11, p. 1591–1600, Nov. 2008.
- BEZKOROWAJNYJ, P. G.; GORDON, A. M.; MCBRIDE, R. A. The effect of cattle foot traffic on soil compaction in a silvo-pastoral system. **Agroforestry Systems**, v. 21, n. 9, p. 1–1, 1993.
- BLAINSKI, E. et al. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 975–982, 2008.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. Em: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis - Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: Am Soc Agron Soil Sci Soc Am, 1986a. p. 363–375.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle Density. Em: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. 2. ed. Madison: Am Soc Agron Soil Sci Soc Am, 1986b. p. 377–382.
- BLANCO-CANQUI, H. Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 4, p. 687–711, 2017.
- BOENI, M. et al. Densidade de raízes do milho e atributos do solo induzidos por pastejo e preparo do solo. Em: **XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, RJ. Anais**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997.
- BOTTA, G. F. et al. Effect of cattle trampling and farm machinery traffic on soil compaction of an Entic Haplustoll in a semiarid region of Argentina. **Agronomy Research**, v. 18, p. 1163–1176, 2020.
- BOYER, W. D.; MILLER, J. H. Effect of burning and brush treatments on nutrient and soil physical properties in young longleaf pine stands. **Forest Ecology and Management**, v. 70, n. 1–3, p. 311–318, Dez. 1994.
- BRAIDA, J. A. et al. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. Em: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 7. ed. Viçosa/MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v. 7p. 221–278.
- BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Novo código florestal brasileiro.** Brasília, DF: Diário Oficial da União 28 mai, 2012.
- BRASIL. **Instrução normativa SPA/MAPA Nº 1, de 21 de junho de 2022.** Brasília: Diário Oficial da União 22 jun, 2022.

- BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos Solos**. São Carlos: EESC-USP, 1998.
- BUSMAN, N. A. et al. Effect of compaction on soil CO₂ and CH₄ fluxes from tropical peatland in Sarawak, Malaysia. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, p. 11646–11659, 2021.
- CAMBI, M. et al. The impact of heavy traffic on forest soils: A review. **Forest Ecology and Management**, v. 338, p. 124–138, 2015.
- CAMBI, M. et al. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. **Forest Ecology and Management**, v. 384, p. 406–414, 2017.
- CARDOSO, E. L. et al. Efeitos da queima na dinâmica da biomassa aérea de um campo nativo no Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 6, p. 747–752, 2003.
- CAVALCANTI, R. Q. et al. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, 2019.
- CEDDIA, M. B. et al. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo podzólico amarelo no estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 8, p. 1467–1473, 1999.
- CHAGANTI, V. N. et al. Base cation saturation ratios, soil health, and yield in organic field crops. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 5, p. 4190–4200, 1 Set. 2021.
- CIOTTA, M. N. et al. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 33, p. 1161–1164, 2003.
- COSTA, A. et al. Permeâmetro de carga decrescente para determinar a condutividade hidráulica do solo saturado. Em: **XIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Anais. Uberlândia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011.
- COSTA, A. **Impacto de operações de colheita de pinus na estrutura de um Cambissolo Húmico**. Lages: Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de pós-graduação em Ciência do Solo, Out. 2013.
- COSTA, A. et al. Pine harvest impact on soil structure of a dystric cambisol (Humic). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.
- COSTA, F. DE S. et al. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 323–332, 2008.
- COSTA, F. S. et al. Relação entre o conteúdo de argila e carbono orgânico em sistemas de preparo do solo. Em: **XIII Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do solo e da Água**. Anais. Ilhéus: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000.
- COSTA, F. S. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 527–535, 2003.
- COSTA, F. S. et al. Calagem e as propriedades eletroquímicas e físicas de um Latossolo em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 1, p. 281–284, 2004.

- COSTA, L. O. **O continente das Lagens**. Florianópolis: Fundação Catarinense de Cultura, 1982.
- COSTA, O. Y. A.; RAAIJMAKERS, J. M.; KURAMAE, E. E. Microbial extracellular polymeric substances: Ecological function and impact on soil aggregation. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, p. 1–14, Jul. 2018.
- DALAL, R. C. et al. Long-term land use change in Australia from native forest decreases all fractions of soil organic carbon, including resistant organic carbon, for cropping but not sown pasture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 311, 1 Mai. 2021.
- DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. Em: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis - Physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: Am Soc Agron Soil Sci Soc Am, 1986. p. 443–461.
- DASS, P. et al. Grassland may be more reliable carbon sinks than forests in California. **Environmental Research Letters**, v. 13, p. 074027, 2018.
- DERU, J. G. C. et al. Effects of Ca:Mg ratio and pH on soil chemical, physical and microbiological properties and grass N yield in drained peat soil. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, 2021.
- DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, v. 11, p. 199–238, 1988.
- DICK, D. P. et al. Impacto da queima nos atributos químicos e na composição química da matéria orgânica do solo e na vegetação. **Pesq. agropec. bras**, v. 43, n. 5, p. 633–640, 2008.
- DICK, D. P. et al. Pinus afforestation in south brazilian highlands: soil chemical attributes and organic matter composition. **Scientia Agrícola**, v. 68, n. 2, p. 175–181, Mar. 2011.
- EPAGRI. **Banco de dados de variáveis ambientais de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, 2020. (Epagri, Documentos, 310) - ISSN 2674-9521 (On-line), 2020.
- ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A. Comparação de métodos analíticos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, n. 2, p. 143–150, 1986.
- ERNANI, P. R.; BARBER, S. A. Corn growth and changes of soil and root parameters as affected by phosphate fertilizers and liming. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 9, p. 1309–1314, 1991.
- EZE, S. et al. Meta-analysis of global soil data identifies robust indicators for short-term changes in soil organic carbon stock following land use change. **Science of the Total Environment**, v. 860, p. 1–13, Fev. 2023.
- FAUSTINO, L. L.; MARCIANO, C. R. Least limiting water range and critical bulk density values as recovery indicators of a soil under forest and pasture systems. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 2, p. 658–682, 2021.
- FLORIANI, G. DOS S.; FERT NETO, J. A trajetória do uso do solo por florestas na região dos campos de Lages. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 10, n. 2, p. 93–102, 2011.

- FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L. DE; BÜLL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 49–57, 2006.
- FONTÚRBEL, T. et al. The effect of repeated prescribed burning on soil properties: A review. **Forests**, v. 12, n. 6, p. 767, Jun. 2021.
- FRAGOSO-SERVÓN, P.; CORONA, A. P.; HERNÁNDEZ, B. P. Efecto del fuego sobre las propiedades de los suelos agrícolas en la zona kárstica del sur de Quintana Roo. **European Scientific Journal**, v. 11, p. 406–406, Nov. 2022.
- FREITAS, C. L.; SANT'ANNA, G. L. Efeitos do fogo nos ecossistemas florestais. **Revista da Madeira**, v. 13, n. 79, p. 106–112, 2004.
- GAERTIG, T. et al. The impact of soil aeration on oak decline in southwestern Germany. **Forest Ecology and Management**, v. 159, p. 15–25, 1 Abr. 2002.
- GALANG, M. A.; MARKEWITZ, D.; MORRIS, L. A. Soil phosphorus transformations under forest burning and laboratory heat treatments. **Geoderma**, v. 155, n. 3–4, p. 401–408, 15 Mar. 2010.
- GARDNER, W. R. Relation of root distribution to water uptake and availability. **Agronomy Journal**, v. 56, n. 1, p. 41–45, 1964.
- GARRETT, L. G. et al. Impacts of forest harvest removal and fertilizer additions on end of rotation biomass, carbon and nutrient stocks of *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, v. 493, Ago. 2021.
- GATTI, M. G. et al. Moving away from the native forest edge: Changes in ecosystem processes towards the interior of *Pinus taeda* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 967–975, 15 Jan. 2019.
- GEE, G.; BAUDER, J. Particle size analysis. Em: CAMPBELL, D. R. et al. (Eds.). **Methods of Soil Analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v. 1p. 383–411.
- GEISER, G. C. **O pólo madeireiro e suas implicações no desenvolvimento da região dos Campos de Lages, Santa Catarina**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- GIACOMINI, S. J. et al. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 9, p. 1097–1104, 2003.
- GODWIN, D. R.; KOBZIAR, L. N.; ROBERTSON, K. M. Effects of fire frequency and soil temperature on soil CO₂ efflux rates in old-field pine-grassland forests. **Forests**, v. 8, p. 274, Jul. 2017.
- GONÇALVES, F. C.; MORAES, M. H. Porosidade e infiltração de água do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Irriga**, v. 17, n. 3, p. 337–345, 2012.
- GONÇALVES, J. L. DE M. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies típicas da Mata Atlântica. **Documentos Florestais**, n. 15, p. 1–23, 1995.
- GOUTAL, N.; RENAULT, P.; RANGER, J. Forwarder traffic impacted over at least four years soil air composition of two forest soils in northeast France. **Geoderma**, v. 193–194, p. 29–40, 1 Fev. 2013.

- GRAHAM, R. C.; WOOD, H. B. Morphologic Development and Clay Redistribution in Lysimeter Soils under Chaparral and Pine. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n. 6, p. 1638–1646, 1991.
- GREACEN, E. L.; SANDS, R. Compaction of forest soils: A review. **Australian Journal of Soils Research**, v. 18, p. 163–189, 1980.
- GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Crop residues, light organic matter, carbon and nitrogen storage and remaining phosphorus under different management systems in the Cerrado Region of Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 909–920, 2012.
- GUBIANI, P. I. et al. Tensão e extração de água em mesa de tensão e coluna de areia, em dois solos com elevada densidade. **Ciência Rural**, v. 39, n. 8, p. 2535–2538, 2009.
- GUBIANI, P. I. et al. Permeâmetro de carga decrescente associado a programa computacional para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 993–997, 2010.
- GUENNI, O.; MARÍN, D.; BARUCH, Z. Responses to drought of five Brachiaria species. I. Biomass production, leaf growth, root distribution, water use and forage quality. **Plant and Soil**, v. 243, p. 229–241, 2002.
- HAN, S.-K. et al. Soil compaction associated with cut-to-length and whole-tree harvesting of a coniferous forest. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 39, p. 976–989, 2009.
- HANKE, D.; DICK, D. P. Aggregate stability in soil with humic and histic horizons in a toposequence under araucaria forest. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. 1–18, 2017.
- HARGREAVES, P. R. et al. Soil compaction effects on grassland silage yields and soil structure under different levels of compaction over three years. **European Journal of Agronomy**, v. 109, n. April, p. 125916, 2019.
- HASSETT, J. E.; ZAK, D. R. Aspen harvest intensity decreases microbial biomass, extracellular enzyme activity, and soil nitrogen cycling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, n. 1, p. 227–235, 2005.
- HERINGER, I. et al. Características de um Latossolo Vermelho sob pastagem natural sujeita à ação prolongada do fogo e de práticas alternativas de manejo. **Ciência Rural**, v. 32, n. 2, p. 309–314, Abr. 2002.
- HILDEBRANDO, V. Um novo eldorado madeireiro? Notas sobre produtividade industrial madeireira nos campos de Lages. Set. 2017.
- HILLEL, D. **Environmental soil physics**. 1. ed. San Diego, CA: Academic Press, 1998.
- HINOJOSA, M. B. et al. High fire frequency reduces soil fertility underneath woody plant canopies of Mediterranean ecosystems. **Science of the Total Environment**, v. 752, 15 Jan. 2021.
- HOFF, D. N.; SIMONI, F. J.; BRAND, M. A. Análise da competitividade da indústria de base florestal da região de Lages, SC. **Ensaios FEE**, v. 27, p. 109–134, 2006.
- HOGENTOGLEB, C. A. Essentials of soil compaction. **Proceedings Highway**

Research Board, p. 309–316, 1936.

HOLTHUSEN, D. et al. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil and Tillage Research**, v. 117, p. 113–124, 2018.

IBAMA. **Queima controlada**. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/incendios-florestais/queima-controlada>>. Acesso em: 14 nov. 2022.

IBGE. **Censo agropecuário 2017: resultados definitivos**. IBGE ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019.

JAMES, J.; HARRISON, R. The effect of harvest on forest soil carbon: A meta-analysis. **Forests**, v. 7, n. 12, p. 1–22, 2016.

JAMSHIDI, R. et al. Influence of two ground-based skidding systems on soil compaction under different slope and gradient conditions. **International Journal of Forest Engineering**, v. 19, n. 1, p. 9–16, 2008.

JANOWIAK, M. et al. **Considering forest and grassland carbon in land management**. Washington DC: United States Department of Agriculture, Forestry Service, 2017.

JHARIYA, M. K.; SINGH, L. Effect of fire severity on soil properties in a seasonally dry forest ecosystem of Central India. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 18, n. 12, p. 3967–3978, 1 Dez. 2021.

JOURGHOLAMI, M. et al. Influence of slope on physical soil disturbance due to farm tractor forwarding in a Hyrcanian forest of northern Iran. **iForest**, v. 7, p. 342–348, 2014.

KAMINSKI, J. et al. Acidez e calagem no sul do Brasil: Aspectos históricos e perspectivas futuras. Em: **Tópicos em Ciência do Solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 309–332.

KARIMAEI, M.; POOZESH, V.; REZAEI, A. Evaluation of aluminum toxicity and phosphorus treatment on the physiological and biochemical traits of spinach (*Spinacia oleracea* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 298, Mai. 2022.

KELLER, T. et al. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104293, 1 Nov. 2019.

KEMPER, W. D.; CEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. Em: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 1. ed. Madison: John Wiley & Sons, Ltd, 1965. v. 1p. 499–510.

KLUG, I. et al. Atributos químicos do solo em plantios florestais em substituição à vegetação nativa em campos de altitude. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 2, p. 279–290, 2020.

KRAUSE, L. et al. Initial microaggregate formation: Association of microorganisms to montmorillonite-goethite aggregates under wetting and drying cycles. **Geoderma**, v. 351, n. April, p. 250–260, 2019.

LAGES. **Pecuária lageana se desenvolve na última década**. Disponível em: <<https://www.lages.sc.gov.br/noticia-descricao/2869/pecuaria-lageana-se-desenvolve,->>

- na-ultima-decada>. Acesso em: 3 out. 2022.
- LAI, L.; KUMAR, S. A global meta-analysis of livestock grazing impacts on soil properties. **Plos One**, v. 15, n. 8, p. e0236638, 2020.
- LAMBERT, L. **Crescimento de diferentes espécies de Pinus spp. na região serrana de Santa Catarina**. [s.l.] Universidade do Estado de Santa Catarina, 2018.
- LI, Q. et al. The roles of initial litter traits in regulating litter decomposition: a “common plot” experiment in a subtropical evergreen broadleaf forest. **Plant and Soil**, v. 452, n. 1–2, p. 207–216, 1 Jul. 2020.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. São Paulo: Edusp, 2005.
- LIMA, C. L. R. et al. Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 124, p. 190–195, 2012.
- LOPES, E. S. et al. Compactação de um solo submetido ao tráfego do Harvester e do Forwarder na colheita de madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 223–230, 2015.
- LUCAS-BORJA, M. E. et al. Variability of hydraulic conductivity and water repellency of soils with fire severity in pine forests and reforested areas under Mediterranean conditions. **Ecohydrology**, p. e2472, 30 Ago. 2022.
- LUCIANO, R. V. et al. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1733–1744, 2012.
- MACHADO, C. C. et al. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. Em: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita Florestal**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2014. p. 543.
- MAFRA, A. L. et al. Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Árvore**, v. 32, n. 2, p. 217–224, 2008.
- MAGAGNOTTI, N. et al. Site impact after motor-manual and mechanised thinning in Mediterranean pine plantations. **Biosystems Engineering**, v. 113, n. 2, p. 140–147, 1 Out. 2012.
- MCGEARY, R. et al. The soil-water cost of heavy machinery traffic on a Queensland Vertisol, Australia. **Geoderma Regional**, v. 29, p. e00506, 2022.
- MCNABB, D. H.; STARTSEV, A. D.; NGUYEN, H. Soil wetness and traffic level effects on bulk density and air-filled porosity of compacted boreal forest soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 4, p. 1238–1247, Jul. 2001.
- MELLO IVO, W. M. P.; MIELNICZUK, J. Influência da estrutura do solo na distribuição e na morfologia do sistema radicular do milho sob três métodos de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 135–143, 1999.
- MORAES, M. T. DE et al. Critical Limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 288–298, 2014.
- MORO, L. et al. Exportação de nutrientes em povoamento de *Pinus taeda* L. baseada em volume estimado pelo sistema Sispinus. **FLORESTA**, v. 38, n. 3, 30 Set. 2008.
- NAVE, L. E. et al. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 5, p. 857–866, 2010.

- NAWAZ, M. F.; BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modelling. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, p. 291–309, 31 Jan. 2013.
- NORDBORG, M.; ROOS, E. **Holistic management-a critical review of Allan Savory's grazing method**. Upp-sala, Suécia: SLU/EPOK – Centre for Organic Food & Farming & Chalmers, 2016.
- PANDOLFO, C. et al. **Atlas climatológico do estado de Santa Catarina**. CD ROOM ed. Florianópolis: EPAGRI, 2022.
- PANT, D. et al. Forage production from intensive grazing of cover crops and impact on soil health. **SSRN**, p. 36, 2022.
- PASSOS, R. R. et al. Least limiting water range of Udox soil under degraded pastures on different sun-exposed faces. **International Agrophysics**, v. 31, n. 3, p. 393–400, 1 Jul. 2017.
- PELLEGRINI, A. F. A. et al. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. **Nature**, v. 553, p. 194–198, 2018.
- PÉRTILE, P. et al. Corrective potential of alkaline residue (dregs) from cellulose industry in an acid soil cultivated under no-tillage. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 16, p. 1868–1880, Set. 2017.
- PIOVESAN, G. et al. Deposição de serapilheira em povoamento de Pinus. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 206–211, Jun. 2012.
- PLAZA-ÁLVAREZ, P. A. et al. Changes in soil hydraulic conductivity after prescribed fires in Mediterranean pine forests. **Journal of Environmental Management**, v. 232, p. 1021–1027, 2019.
- POMIANOSKI, D. J. W.; DEDECEK, R. A.; VILCAHUAMAN, L. J. M. Efeito do fogo nas características químicas e biológicas do solo no sistema agroflorestal da bracatinga. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 52, p. 93–118, 2006.
- PUHLICK, J. J.; FERNANDEZ, I. J. Influence of mechanized timber harvesting on soil compaction in northern hardwood forests. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 5, p. 1737–1750, 1 Set. 2020.
- RABBI, S. M. F. et al. Microbial processing of organic matter drives stability and pore geometry of soil aggregates. **Geoderma**, 2020.
- RADFORD, B. J. et al. Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 54, n. 3–4, p. 155–170, 1 Abr. 2000.
- REDIN, M. et al. Impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 381–392, 2011.
- REICHERT, J. M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 310–319, Mar. 2009.
- REICHERT, J. M. et al. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. Em: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v. 7p. 1–54.

- REICHERT, J. M. et al. Onion-forage cropping systems on a Vertic Argiudoll in Uruguay: Onion yield and soil organic matter, aggregation, porosity and permeability. **Soil and Tillage Research**, v. 216, p. 105229, 2022.
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S. Mecânica do solo. Em: VAN LIER, Q. DE J. (Ed.). **Física do Solo**. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2010. p. 29–102.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. Em: CERRETA, C.; SILVA, L.; REICHERT, J. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5p. 49–134.
- REINERT, D. J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805–1816, 2008.
- REIS, A. M. H.; ARMANDO, R.; PIRES, L. Physical assessment of a Haplohumox soil under integrated crop-livestock system. **Soil and Tillage Research**, v. 194, 1 Nov. 2019.
- RHEINHEIMER, D. DOS S. et al. Modificações nos atributos químicos de solo sob campo nativo submetido à queima. **Ciência Rural**, v. 33, n. 1, p. 49–55, Fev. 2003.
- RODRIGUES, C. K. **Colheita e Transporte Florestal**. 1. ed. Curitiba: [s.n.].
- ROLIM NETO, F. C. et al. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 6, p. 953–964, 2004.
- ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; BRINHOLI, O. Efeito das relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K do solo na produção de sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 12, p. 1443–1448, 1984.
- RUEHLMANN, J.; KÖRSCHENS, M. Soil particle density as affected by soil texture and soil organic matter: 2. Predicting the effect of the mineral composition of particle-size fractions. **Geoderma**, v. 375, 1 Out. 2020.
- SÁ, M. A. C. DE et al. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1610–1622, 2016.
- SAMANI, K. M. et al. Effect of land-use changes on chemical and physical properties of soil in western Iran (Zagros oak forests). **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 2, p. 637–647, 2018.
- SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. D. S. Compactação de um Cambissolo e Neossolo submetidos a diferentes intensidades de tráfego de Feller Buncher e Skidder. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 265–272, 2011.
- SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. S.; REICHERT, J. M. Compactação causada pelo tráfego de Feller Buncher e Skidder em um Neossolo Regolítico sob distintas umidades. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 239–248, 2015.
- SANT'ANNA, C. M. Corte. Em: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita Florestal**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2014. p. 74–105.
- SANTOS, C. A. DOS et al. Changes in soil carbon stocks after land-use change from

native vegetation to pastures in the Atlantic forest region of Brazil. **Geoderma**, v. 337, n. August 2018, p. 394–401, 2019.

SANTOS, P. H. A. DOS et al. Produtividade e custos de extração de madeira de eucalipto com Clambunk Skidder. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 511–518, Mai. 2013.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - SBCS, 2005.

SCHARENBROCH, B. C. et al. Two decades of low-severity prescribed fire increases soil nutrient availability in a Midwestern, USA oak (*Quercus*) forest. **Geoderma**, v. 183–184, p. 80–91, Ago. 2012.

SHAHEB, M. R.; VENKATESH, R.; SHEARER, S. A. A Review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 46, n. 4, p. 417–439, 2021.

SILVA, A. P. et al. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 1–10, 2008.

SILVA, A. R.; DIAS, M. D. S.; LEITE, F. P. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsolidação de dois latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 1, p. 89–93, Jan. 2007.

SILVA, L. B. DA; DICK, D. P.; INDA JUNIOR, A. V. Solos subtropicais de altitude: atributos químicos, teor de matéria orgânica e resistência à oxidação química. **Ciência Rural**, v. 38, n. 4, p. 1167–1171, 2008.

SILVA, P. H. M. DA et al. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 67–78, 1 Ago. 2013.

SILVA, F. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1731–1739, 2014.

SILVA, L. et al. Soil retraction and relationship with the physical properties and organic matter of Latossolos and Nitossolos of the South of Brazil. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 19, n. 3, p. 337–348, 30 Set. 2020.

SILVA, L. S. et al. **Manual de Calagem e Adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Núcleo Regional Sul. Comissão de Química e Fertilidade do Solo., 2016.

SILVA, V. R. et al. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two brazilian oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1097–1104, 2009.

SILVEIRA, A. M. et al. Simulação dos efeitos das mudanças do uso da terra na dinâmica de carbono no solo na bacia do Rio Piracicaba. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 2, p. 389–399, 2000.

SILVEIRA, C. R. **História da indústria da madeira: Serra catarinense, 1940-2005** -

- Cláudio Rodrigues Silveira - Google Livros.** Lages: Leão Baio Livros, 2005.
- SIMON, C. A. et al. Efeitos da queima de resíduos do solo sob atributos químicos de um Latossolo Vermelho distrófico do cerrado. **Nativa**, v. 4, n. 4, p. 217–221, 31 Ago. 2016.
- SISTI, C. P. J. et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 39–58, 2004.
- SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 7–31, 2004.
- SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. Em: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 1p. 206–268.
- SPARLING, G. P. et al. Changes in soil total C and N contents at three chronosequences after conversion from plantation pine forest to dairy pasture on a New Zealand Pumice soil. **Soil Research**, v. 52, n. 1, p. 38–45, 2014.
- SPELTZ, R.; ALMEIDA, R. F. Conversion of the planted forest with pinus to grain production in the Brazilian conditions: a study showing the economic perspectives. **Advances in Forestry Science**, v. 8, n. 2, p. 1489–1496, 2021.
- SUZUKI, L. E. A. S. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1159–1167, 2007.
- SUZUKI, L. E. A. S. et al. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 963–973, 2008.
- SUZUKI, L. E. A. S. et al. Dispersion and flocculation of Vertisols, Alfisols and Oxisols in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, p. 64–70, 2015.
- SZYMczak, D. A. et al. Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de Pinus taeda L. na região sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, v. 38, n. 4, p. 641–648, 1 Jul. 2014.
- TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Dep. de Solos, UFRGS, 1995.
- TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017.
- TELES, J. S. et al. Desenvolvimento de Jiggs em solos de Santa Catarina com diferentes graus de compactação. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 7, p. 69655–69670, 9 Jul. 2021.
- TESTONI, S. A. **Mineralogia da fração argila de Latossolos e Nitossolos Brunos com caráter retrátil**. [s.l.] Lages: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2015.
- TESTONI, S. A. et al. Clay mineralogy of brazilian Oxisols with shrinkage properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, p. e0160487, 2017.
- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils.

European Journal of Soil Science, v. 33, p. 141–163, 1982.

TOMASI, C. A. et al. Atributos químicos e área superficial específica em Latossolo subtropical de altitude sob usos e manejos distintos. **Ciência Rural**, v. 42, n. 12, p. 2172–2179, 2012.

TORMENA, C. A. et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 211–219, 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 573–581, Dez. 1998.

TRAZZI, P. A. et al. Initial growth of *Pinus taeda* by fertilization response at planting. **Floresta e Ambiente**, v. 26, p. 20180370, 11 Mar. 2019.

VALANI, G. P. et al. Soil physical quality in the topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v. 220, p. 105357, 1 Jun. 2022.

VAN GENUCHTEN, M. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

VANCE, E. D. Agricultural site productivity: Principles derived from long-term experiments and their implications for intensively managed forests. **Forest Ecology and Management**, v. 138, p. 369–396, 2000.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977.

VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 175–180, 1994.

VICENTE, L. C. et al. Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in a southeast region of Brazil. **Catena**, v. 182, p. 104139, Jun. 2019.

VOGELMANN, E. S.; PREVEDELLO, J.; REICHERT, J. M. Origem dos compostos hidrofóbicos e seus efeitos em florestas de *Pinus* e *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 4, p. 1067–1079, Out. 2015.

VOMOCIL, J. A.; FLOCKER, W. J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 4, p. 242–246, 1961.

WAGGER, M. G.; DENTON, H. P. Influence of cover crop and wheel traffic on soil physical properties in continuous no-till corn. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 4, p. 1206–1210, 1989.

WANDER, M. Soil Organic Matter Fractions and Their Relevance to Soil Function. Em: MAGDOFF, F.; RAY, R. W. (Eds.). **Soil organic matter in sustainable agriculture**. Boca Raton: CRC Press Inc., 2004. p. 67–102.

WARKOTSCH, W. The impact of harvesting operations on timber quality: Causes and remedies. **South African Forestry Journal**, v. 169, n. 1, p. 33–48, 1994.

- WHALLEY, W. R.; DUMITRU, E.; DEXTER, A. R. Biological effects of soil compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 35, p. 53–68, 1995.
- WILLIAMSON, J. R.; NEILSEN, W. A. The influence of forest site on rate and extent of soil compaction and profile disturbance of skid trails during ground-based harvesting. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 30, n. 8, p. 1196–1205, 2000.
- XUE, B. et al. Roles of soil organic carbon and iron oxides on aggregate formation and stability in two paddy soils. **Soil and Tillage Research**, v. 187, n. July 2018, p. 161–171, 2019.
- ZEMA, D. A. et al. Influence of forest stand age on soil water repellency and hydraulic conductivity in the Mediterranean environment. **Science of the Total Environment**, v. 753, 20 Jan. 2021.
- ZHAO, Y. et al. Relative bulk density as a measure of compaction and its influence on tree height. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, n. 9, p. 1724–1735, 2010.