

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA DIAGNOSE NUTRICIONAL E  
GEOESTATÍSTICA NA QUALIDADE FÍSICA DO PREPARO DO SOLO**

**JULIANA CARVALHO BARBOSA RAMOS**

**CRUZ DAS ALMAS - BAHIA  
JANEIRO - 2021**

**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA DIAGNOSE NUTRICIONAL E  
GEOESTATÍSTICA NA QUALIDADE FÍSICA DO PREPARO DO SOLO**

JULIANA CARVALHO BARBOSA RAMOS  
Engenheira Florestal  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Dissertação submetida ao Colegiado de Curso do Programa de Pós-Graduação Em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Título de *Magister Scientiae* em Solos e Qualidade de Ecossistemas.

**Orientador:** Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Elton da Silva Leite

**Co-orientador:** Prof.<sup>o</sup> Dr.<sup>o</sup> Aureo Silva de Oliveira

CRUZ DAS ALMAS - BAHIA  
JANEIRO – 2021

## FICHA CATALOGRÁFICA

R175i

Ramos, Juliana Carvalho Barbosa.

Índices de vegetação na diagnose nutricional e geoestatística na qualidade física do preparo do solo / Juliana Carvalho Barbosa Ramos. – Cruz das Almas, Bahia, 2021.

49f.; il.

Orientador: Elton da Silva Leite.

Coorientador: Áureo Silva de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Programa de Pós-Graduação em Solos e Qualidade de Ecossistemas.

1.Solo – Manejo florestal – Eucalipto. 2.Solo – Física do solo. 3.Geoestatística – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.

CDD: 631.43

Ficha elaborada pela Biblioteca Central de Cruz das Almas - UFRB.

Responsável pela Elaboração - Antonio Marcos Samento das Chagas (Bibliotecário – CRB5 / 1615).  
(os dados para catalogação foram enviados pelo usuário via formulário eletrônico).



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

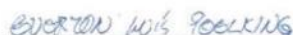
**ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA DIAGNOSE NUTRICIONAL E  
GEOESTATÍSTICA NA QUALIDADE FÍSICA DO PREPARO DO SOLO**

COMISSÃO EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE  
JULIANA CARVALHO BARBOSA RAMOS



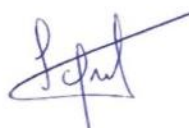
---

Prof. Dr. Éiton da Silva Leite (Orientador)  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia



---

Prof. Dr. Everton Luís Poelking  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia



---

Prof. Dr. Luis Carlos de Freitas  
Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Dissertação homologada pelo Colegiado do Curso de Mestrado em Ciências Agrárias em \_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_, conferindo o Título de Mestre em Solos e Qualidade de Ecossistemas em \_\_\_\_\_.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por todas as oportunidades de superação, mas principalmente por conduzir minha jornada até aqui colocando em meu caminho pessoas que tiveram papel fundamental para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Aos meus pais Agileildes de Carvalho e Herval Ramos por me proporcionarem acesso à educação que eles não tiveram oportunidade de ter, acreditando que este é o único caminho para transformação social e para alcançar um futuro melhor.

À minha irmã Narayana Carvalho pela paciência e por me esperar para almoçar ou jantar quando eu chegava tarde do laboratório.

Ao professor Elton Leite pela orientação no mestrado e participação na minha formação acadêmica.

Aos amigos Laís Santos, Jonas Silva, Flávia Alves, Mariana Coimbra e Raquel Amorim pela amizade, apoio e parceria.

Ao professor Everton Poelking por sempre acreditar no meu potencial, pelo incentivo, pelos conselhos sendo um dos principais responsáveis pela profissional que eu me tornei. Ao professor Deoclides Ricardo pela boa vontade em orientar, aconselhar e incentivar o meu crescimento acadêmico desde a graduação até aqui. Ao professor João Albany, sem o qual a finalização deste trabalho não seria possível. Ao professor Danívio Batista pelo apoio, conselhos e solicitude.

Aos colegas do laboratório de Mecanização Agrícola e Florestal que participaram dos levantamentos de campo, muito obrigada pelo apoio.

À empresa Bracell na figura de Ricardo Previdente, Iago Mello e Humberto Amoedo, por disponibilizarem os dados e por todo apoio prestado para realização desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Qualidade de Ecossistemas – PPGSQE, ao Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas – CCAAB e à Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB.

## SUMÁRIO

RESUMO GERAL .....	10
OVERVIEW .....	11
INTRODUÇÃO GERAL .....	12
REFERÊNCIAS .....	14
CAPÍTULO 1 .....	16
ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA DIAGNOSE NUTRICIONAL DE POVOAMENTOS DE EUCALIPTO .....	16
INTRODUÇÃO .....	19
MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
CONCLUSÕES .....	28
REFERÊNCIAS .....	30
APÊNDICE .....	33
CAPÍTULO 2 .....	34
GEOESTATÍSTICA NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO APÓS SUBSOLAGENS PRÉ E PÓS-COLHEITA E PLANTIO DIRETO .....	34
INTRODUÇÃO .....	37
MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
CONCLUSÕES .....	48
REFERÊNCIAS .....	49
CONCLUSÃO GERAL.....	51

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### Capítulo 1

Figura 1. Mapa de localização das áreas cultivadas com o eucalipto na região dos Tabuleiros Costeiros do estado da Bahia. ....	21
--	----

### Capítulo 2

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo realizado em Entre Rios – Bahia, na região dos Tabuleiros Costeiros. ....	39
---	----

Figura 2. Esquema de coleta e amostragem da resistência do solo à penetração para análise da qualidade do solo em áreas de subsolagem pré e pós-colheita e plantio direto sob cultivo de eucalipto. ....	42
--	----

Figura 3. Distribuição espacial da resistência do solo à penetração sob a influência dos preparos: pré-colheita com escarificação (A) e preparo pré-colheita (B). ....	44
--	----

Figura 4. Distribuição espacial da resistência do solo à penetração sob a influência do preparo reduzido com subsolagem a 1,10 m (C), subsolagem a 0,90 m (D) e subsolagem a 0,60 m (E). ....	46
---	----

Figura 5. Distribuição da RSP no solo sob plantio direto na linha do ciclo anterior. ....	47
---	----



## LISTA DE TABELAS

### Capítulo 1

Tabela 1. Classificação das unidades de manejo (UM) das áreas sob cultivo de eucalipto nos Tabuleiros Costeiros do estado da Bahia.....	22
Tabela 2. Características técnicas do sensor do satélite <i>Planet</i> . .....	22
Tabela 3. Valores médios do padrão de referência para os teores de macronutrientes em matéria seca foliar para <i>Eucalyptus</i> ssp. ....	23
Tabela 4. Equações dos índices de vegetação utilizados na diagnose nutricional por sensor remoto. ....	24
Tabela 5. Teores médios de macronutrientes obtidos na análise foliar em função das unidades de manejo dos povoamentos de eucalipto na região dos Tabuleiros Costeiros do estado da Bahia. ....	25
Tabela 6. Tabela da análise de correlação binária de Pearson dos valores dos índices de vegetação dos macronutrientes em plantios de eucalipto no estado da Bahia. ....	27

### Capítulo 2

Tabela 1. Caracterização física do solo na área de estudo pré-preparo do solo. ....	39
Tabela 2. Caracterização dos preparos do solo pré e pós-colheita e plantio direto em área de solo coeso e sob cultivo de eucalipto no estado da Bahia, Brasil. ....	40
Tabela 3. Parâmetros do semivariograma anisotrópico dos dados de resistência do solo à penetração para os preparos pré e pós-colheita e plantio direto em área sob cultivo de eucalipto na Bahia, Brasil. ....	43

## RESUMO GERAL

O monitoramento florestal constitui uma importante ferramenta para garantia de altas produtividades e controle nutricional e na qualidade das operações de preparo de solo. Objetivou-se utilizar imagens remotas para diagnosticar o estado nutricional dos povoamentos e avaliar a qualidade física do solo sob diferentes preparos na cultura do eucalipto. O estudo do diagnóstico nutricional desenvolveu-se em 62 áreas sob dois regimes pluviométricos (1000 a 1300 mm ano<sup>-1</sup> e 1300 a 1600 mm ano<sup>-1</sup>) e três tipos de solo (classe e textura). Para análise de tecido foliar e correlacionar com os valores dos índices de vegetação (NDVI, NDWI e SAVI). Os resultados do diagnóstico do estado nutricional demonstraram que o valor médio de NDWI foi significativo a 1% para os teores médios de Ca e Mg com grau de correlação de 0,353 e  $R^2 = 0,21$ . No ponto de vista nutricional, concluiu-se que os índices NDVI, NDWI e SAVI apresentam forte correlação entre si (-0,97 a 1,00) e podem auxiliar no mapeamento da sanidade de povoamentos de eucalipto. O estudo da qualidade física do solo consistiu na avaliação geoestatística da resistência do solo à penetração (RSP) do espaçamento e a 1,2m de profundidade, em uma área de eucalipto no estado da Bahia submetido a seis preparos de solo: subsolagem pré-colheita com escarificação (T1), subsolagem pré-colheita sem escarificação (T2), subsolagem pós-colheita a 1,10 m de profundidade (T3), subsolagem pós-colheita a 0,90 m de profundidade (T4), subsolagem pós-colheita a 0,60 m (T5) e plantio direto na linha da subsolagem do ciclo anterior (T6). Os parâmetros da variabilidade espacial da RSP demonstraram que houve forte dependência espacial para os sistemas de preparo do solo (superiores a 94%) e os menores valores de RSP foram observados na subsolagem realizada a 1,10 m no período pós colheita. Para a subsolagem pré-colheita recomenda-se o uso de escarificação para melhoria da qualidade da operação com redução em 16,53% da RSP nas camadas do solo em comparação a subsolagem pré-colheita sem escarificação. O preparo de subsolagem à 0,6m de profundidade configurou o menos indicados para a implantação florestal no solo coeso. O preparo de plantio direto com o uso da subsolagem do ciclo anterior mostra-se como alternativa na redução de custos com preparo do solo.

**Palavras-chave:** Manejo florestal; compactação do solo; índice de vegetação.

## OVERVIEW

Forest monitoring is an important tool for ensuring high productivity and nutritional control and for the quality of soil preparation operations. The objective was to use remote images to diagnose the nutritional status of the stands and to evaluate the physical quality of the soil under different preparations in the eucalyptus culture. The study of nutritional diagnosis was developed in 62 areas under two rainfall patterns (1000 to 1300 mm year<sup>-1</sup> and 1300 to 1600 mm year<sup>-1</sup>) and three types of soil (class and texture). To analyze leaf tissue and correlate with the values of the vegetation indices (NDVI, NDWI and SAVI). The results of the diagnosis of nutritional status showed that the average value of NDWI was significant at 1% for the average levels of Ca and Mg with a degree of correlation of 0.353 and  $R^2 = 0.21$ . From the nutritional point of view, it was concluded that the NDVI, NDWI and SAVI indices have a strong correlation between them (-0.97 to 1.00) and can assist in mapping the health of eucalyptus stands. The study of the physical quality of the soil consisted of the geostatistical evaluation of the resistance of the soil to the penetration (RSP) of the spacing and to 1.2m of depth, in an area of eucalyptus in the state of Bahia submitted to six soil preparations: pre-harvest subsoiling with scarification (T1), pre-harvest subsoiling without scarification (T2), post-harvest subsoiling at 1.10 m deep (T3), post-harvest subsoiling at 0.90 m deep (T4), post-harvest subsoiling at 0.60 m (T5) and no-till in the subsoiling line of the previous cycle (T6). The parameters of the RSP spatial variability demonstrated that there was a strong spatial dependence for the soil tillage systems (greater than 94%) and the lowest RSP values were observed in the subsoiling carried out at 1.10 m in the post-harvest period. For pre-harvest subsoiling it is recommended to use scarification to improve the quality of the operation with a 16.53% reduction in RSP in soil layers compared to pre-harvest subsoiling without scarification. The subsoiling preparation at 0.6m depth was the least suitable for forest implantation in cohesive soil. The preparation of no-tillage using the subsoiling of the previous cycle is shown as an alternative in reducing costs with soil preparation.

**Keywords:** Forest management; soil compaction; vegetation index.

## INTRODUÇÃO GERAL

O setor florestal brasileiro exportou cerca de U\$ 779,6 milhões em madeira, papéis e celulose em fevereiro de 2020, um aumento de 5,2% em relação ao mês anterior (CEPEA, 2020). Este aumento representou 1,2% do PIB nacional e receita bruta total de R\$ 97,4 bilhões em 2019 (IBÁ, 2020).

O crescimento desse setor deve-se, entre outros fatores, às condições edafoclimáticas favoráveis ao desenvolvimento florestal, bem como à viabilização de atividades mecanizadas em que a região dos Tabuleiros Costeiros destaca-se pela expansão da cultura do eucalipto (PIRES et al, 2020), especialmente, em áreas de relevo plano ou suave ondulado onde se predominam Latossolos e Argissolos (EMBRAPA, 2020). Estas áreas estão localizadas, principalmente, nos solos nos Tabuleiros Costeiros que apresentam baixa fertilidade natural e caráter coeso (EMBRAPA, 2020), condições que oferecem grandes limitações ao desenvolvimento do eucalipto.

No aspecto nutricional, a principal limitação se dá pelas restrições químicas que os solos distróficos apresentam, o que implica na necessidade de adubação para atendimento da demanda nutricional para cultivo do eucalipto (CIPRIANI et al., 2016; PES e ARENHARDT, 2015; ROCHA et al., 2015).

Para auxiliar no manejo da adubação das florestas plantadas, a investigação dos índices de vegetação (IV) constitui importante ferramenta de precisão para avaliação da resposta espectral do povoamento florestal (GOERGEN et al., 2016; CRUSIOL et al., 2017) e pode auxiliar no diagnóstico da deficiência nutricional do eucalipto e na avaliação dos teores de macronutrientes.

Associada à baixa fertilidade do solo, o caráter coeso e a compactação destacam-se como importantes limitações ao desenvolvimento do eucalipto (FILHO et al., 2016), que manifesta-se de maneira mais pronunciada em solos coesos característicos dos Tabuleiros Costeiros quando submetidos ao intenso tráfego de máquinas (FERRARI et al., 2018; LEITE et al., 2020; SZYMCZAK et al., 2014), mas que podem ser remediados a partir do preparo do solo.

A remediação da compactação e coesão do solo envolve a adoção de sistemas de preparo, como a subsolagem, que recuperam a qualidade física do solo (NUNES et al., 2020) e ampara-se em ferramentas de precisão, entre as

quais destaca-se a geoestatística (DE SOUZA et al., 2018; GREGO et al., 2014; MICHELON et al., 2019; SIQUEIRA et al., 2018), fundamental para subsidiar as tomadas de decisão para diagnosticar o método de preparo que apresenta menor resistência do solo à penetração e melhor custo-benefício (BARBOSA et al., 2015).

Assim, o monitoramento de plantios clonais de eucalipto justifica-se pela necessidade de detecção precoce de possíveis perdas de produtividade, redução de custos e garantia da sustentabilidade (BONFATTI JÚNIOR et al., 2019) tendo em vista que o uso de ferramentas de precisão auxiliam no monitoramento de grandes áreas de produção com maior eficiência e subsidiam rápidas intervenções e redução de danos (MICHELON et al., 2019).

Além disso, a automatização dos processos de monitoramento permitem a otimização dos processos realizados convencionalmente (NUNES et al., 2020), além de oferecer mais recursos para as tomadas de decisão. Com isso, informações armazenadas de forma sistemática permitem a modelagem a partir de um banco de dados robusto capaz de subsidiar estratégias de planejamentos futuros (ALBA et al., 2017) e facilita o acompanhamento de rotina dos processos produtivos da cadeia florestal.

Para auxiliar no manejo florestal e garantir altas produtividades, objetivou-se diagnosticar o estado nutricional dos povoamentos e avaliar a qualidade física do solo para promover o desenvolvimento da cultura do eucalipto.

## REFERÊNCIAS

- ALBA, E. et al. Uso de imagens de média resolução espacial para o monitoramento de dosséis de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 4, p. 1–8, 2017.
- BARBOSA, L. P. et al. Desempenho operacional e análise de custo do conjunto mecanizado no preparo do solo para plantio florestal. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 21, p. 746–763, 2015.
- BONFATTI JÚNIOR, E. A.; LENGOWSKI, E. C.; REESE, E. Monitoramento da sobrevivência de *eucalyptus* spp. por imagens obtidas por VANTS. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 3, p. p.220-226, 2019.
- CEPEA. **Informativo Setor Florestal - Fevereiro 2020**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/revista/pdf/0968381001585680770.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2020.
- CIPRIANI, H. N. et al. **Teores foliares de N , P e K em eucaliptos sob diferentes adubações em Porto Velho , Rondônia**. I Reunião de Ciência do Solo do Núcleo Noroeste. **Anais...Rolim de Moura - RO: 2016** Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1067673/1/CIPRIANIResu molRCSNRNO.pdf>>
- CRUSIOL, L. G. . et al. Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento do déficit hídrico na cultura da soja. **XII Jornada Acadêmica da Embrapa Soja**, v. 1, 2017.
- DE SOUZA, W. J. O. et al. Machine traffic and soil penetration resistance in guava tree orchards. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 4, p. 980–986, 2018.
- EMBRAPA. **Tabuleiros Costeiros**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tabuleiros-costeiros/apresentacao>>. Acesso em: 22 dez. 2020.
- FERRARI, J. M. S. et al. Análise da variabilidade espacial da resistência do solo em diferentes profundidades. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 12, n. 2, p. 164–175, 2018.
- FILHO, F. X. DE O. et al. Compactação de solo cultivado com cana-de-açúcar em Baía Formosa, Rio Grande do Norte. **Revista Ceres**, v. 63, n. 5, p. 715–723, 2016.
- GOERGEN, L. C. DE G. et al. Distinguição de espécies de eucalipto de diferentes idades por meio de imagens TM/Landsat 5. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 1, p. 53–60, 2016.
- GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. DE; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa Solos, 2014. p. 74–83.

IBÁ. **Relatório 2020.** Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2021.

LEITE, E. DA S. et al. Compactação do solo causada pelo harvester e intensidade de tráfego do forwarder na colheita florestal. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, p. 1–10, 2020.

MICHELON, D. et al. Uso do sensoriamento remoto com VANT's: possibilidade de aquisição de dados para agricultura. **CIÊNCIA & TECNOLOGIA**, v. 3, n. 1, p. 23–35, 29 jul. 2019.

NUNES, Í. L. et al. Variabilidade espacial de clones de Eucalipto em função do preparo de solo e adubações. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 12334–12349, 2020.

PES, L. Z.; ARENHARDT, M. H. **Fisiologia Vegetal**. 1. ed. Santa Maria - RS: Colégio Politécnico da UFSM, 2015.

PIRES, M. DE M.; AGUIAR, P. C. B. DE; SANTANA, É. G. F. Efeitos socioeconômicos do cultivo do eucalipto no desenvolvimento de municípios produtores na Bahia, Brasil. **Geosul**, v. 35, n. 75, p. 231–256, 2020.

ROCHA, J. H. T. et al. **Nutrição e fertilização com enxofre e uso de gesso em plantações de eucalipto**. São Paulo - SP, 2015.

SIQUEIRA, P. G. DE S. et al. Avaliação da resistência à penetração em um argissolo vermelho distrófico. **Revista Ambientale**, v. 2, n. 2, p. 1–15, 2018.

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, 2014.

## **CAPÍTULO 1**

### **ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA DIAGNOSE NUTRICIONAL DE POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**



## ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA DIAGNOSE NUTRICIONAL DE POVOAMENTOS DE EUCALIPTO

**RESUMO:** O sensoriamento remoto por meio das técnicas de razão de bandas para o monitoramento nutricional de plantios clonais de eucalipto são fundamentais para garantir a sanidade e produtividade, reduzir custos de empreendimentos florestais. Objetivou-se aplicar índices de vegetação a partir de imagens de satélite de alta resolução na diagnose nutricional de macronutrientes em plantios de eucalipto. O estudo foi realizado em 62 áreas de seis municípios do estado da Bahia sob cultivo de plantios homogêneos de eucalipto, com idades entre 1,3 e 1,8 anos. O delineamento foi o inteiramente casualizado com seis tratamentos constituídos pelo regime pluviométrico (1000 a 1300 mm ano<sup>-1</sup> e 1300 a 1600 mm ano<sup>-1</sup>) e tipos de solo (classe e textura). A diagnose nutricional dos macronutrientes (N; P; K; Ca; Mg; S) foi realizada a partir da análise foliar em laboratório e da determinação dos índices de vegetação: índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), índice de diferença normalizada da água (NDWI) e índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI). As áreas avaliadas possuem alto vigor (NDVI > 0,70) e os maiores valores foram observados nas regiões chuvosas (1300 a 1600 mm ano<sup>-1</sup>) (médio de 0,78). O índice NDWI apresenta maior correlação para os teores médios de Ca e Mg. Os índices NDVI, NDWI e SAVI apresentam forte correlação entre si (-0,97 a 1,00) e podem auxiliar no mapeamento do vigor e conseqüentemente na produtividade de eucalipto.

**Palavras-chave:** Manejo florestal; sensoriamento remoto; macronutrientes.

## VEGETATION INDICES IN NUTRITIONAL DIAGNOSIS OF EUCALYPTUS SETTINGS

**ABSTRACT:** Remote sensing by means of band ratio techniques for the nutritional monitoring of clonal eucalyptus plantations are essential to ensure health and productivity, reduce costs of forestry enterprises. The objective was to apply vegetation indices from high resolution satellite images in the nutritional diagnosis of macronutrients in eucalyptus plantations. The study was carried out in 62 areas of six municipalities in the state of Bahia under cultivation of homogeneous eucalyptus plantations, aged between 1.3 and 1.8 years. The design was completely randomized with six treatments consisting of the pluviometric regime (1000 to 1300 mm year<sup>-1</sup> and 1300 to 1600 mm year<sup>-1</sup>) and soil types (class and texture). Nutritional diagnosis of macronutrients (N; P; K; Ca; Mg; S) was performed based on leaf analysis in the laboratory and the determination of vegetation indexes: index of normalized difference (NDVI), index of normalized difference of water (NDWI) and soil-adjusted vegetation index (SAVI). The evaluated areas have high vigor (NDVI > 0.70) and the highest values were observed in the rainy regions (1300 to 1600 mm year<sup>-1</sup>) (average of 0.78). The NDWI index shows a higher correlation for the average levels of Ca and Mg. The NDVI, NDWI and SAVI indices have a strong correlation between them (-0.97 to 1.00) and can assist in the mapping of vigor and, consequently, in eucalyptus productivity.

**Keywords:** Forest management; remote sensing; macronutrients.

## INTRODUÇÃO

O segmento de base florestal desempenha grande relevância no mercado externo com vendas de R\$ 97,4 bilhões em 2019 (IBÁ, 2020), deixando o Brasil em posição de destaque como o maior exportador de celulose, impulsionando a economia brasileira (CEPEA, 2020). Tal crescimento estimula o investimento em técnicas para aumento da produção florestal e garante a sustentabilidade econômica do empreendimento (MICHELON et al., 2019).

O aumento da produtividade das florestas é promovido, dentre outros fatores, pelos nutrientes minerais ou orgânicos que são disponibilizados para a cultura (ROCHA et al., 2019). Neste contexto, torna-se essencial o monitoramento nutricional como forma de garantir que o povoamento esteja em condições satisfatórias de produtividade, por meio de análises de tecido foliar (CIPRIANI et al., 2016) que permitem identificar a ocorrência de eventuais deficiências ou desequilíbrios (EMBRAPA, 2005).

A importância do monitoramento nutricional dos talhões é fundamental para garantir alta produtividade, já que por meio dele é possível manejar as adubações de manutenção que podem ser necessárias após a adubação de plantio (CIPRIANI et al., 2016). Contudo, monitorar e realizar coletas foliares em extensas áreas pode se tornar uma atividade onerosa e que exija recursos financeiros e humanos elevados.

Além disto, a diagnose visual exige mão de obra altamente capacitada e a automatização deste método a partir das técnicas de razão de bandas de imagens de alta resolução obtidas por sensores remotos poderia aumentar a assertividade do monitoramento visto que a diagnose nutricional constitui indicadores de produtividade vegetal (ALBA et al., 2017). Nesse sentido, o sensoriamento remoto (SR) apresenta-se como alternativa para redução de custos e otimização do monitoramento das florestas (BONFATTI JÚNIOR et al., 2019).

A interpretação de índices de vegetação (IV's) obtidos a partir de imagens multiespectrais está entre as ferramentas do SR que podem auxiliar no manejo das florestas e indicar o comportamento espectral dos talhões clonais de eucalipto fotossinteticamente ativos e sadios, considerando os resultados encontrados por Alba et al. (2017) em seu estudo sobre o SR na estimativa de

volume de eucalipto e por Ponzoni et al. (2015) na caracterização de dosséis de eucalipto. Além disto, a aplicação do SR no diagnóstico nutricional do eucalipto constitui-se como uma inovação tecnológica no setor florestal, considerando o fato desta tecnologia ser amplamente utilizada para culturas agrícolas (FURTADO et al., 2020; MARIN et al., 2019; MORIYA et al., 2017), haja vista a relação dos teores nutricionais das folhas com a resposta espectral de imagens de alta resolução.

Estudos realizados por Crusiol et al. (2017) e Silva et al. (2019) apontam diferentes métodos de avaliação das paisagens, entre os quais destaca-se o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para analisar a condição de florestas naturais e plantadas.

O Índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) constitui um método de avaliação da vegetação sem a interferência do solo (ALBA et al., 2017). Destaca-se ainda o Índice de água por diferença normalizada (NDWI) utilizado no monitoramento da vegetação podendo indicar o estado hídrico da vegetação conforme observado por Bertolin et al. (2017) em estudo que comprovou a sensibilidade do NDWI às mudanças espectrais de áreas irrigadas e corroborou com Rodrigues et al (2017) na identificação de áreas secas e alagadas.

Para otimizar o monitoramento da sanidade florestal, objetivou-se com este trabalho aplicar índices de vegetação a partir de imagens de alta resolução espacial na diagnose nutricional de macronutrientes em povoamentos de eucalipto na região dos Tabuleiros Costeiros da Bahia.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O estudo foi realizado em 61 áreas de plantios homogêneos de híbridos clonais de *Eucalyptus urophylla*, espaçamento 9 m<sup>2</sup> por planta, idade entre 1,3 e 1,8 anos, localizadas nos municípios de Itanagra, Esplanada, Alagoinhas, Jandaíra, Conde e Entre Rios, no estado da Bahia, Brasil, na região dos Tabuleiros Costeiros (Figura 1).

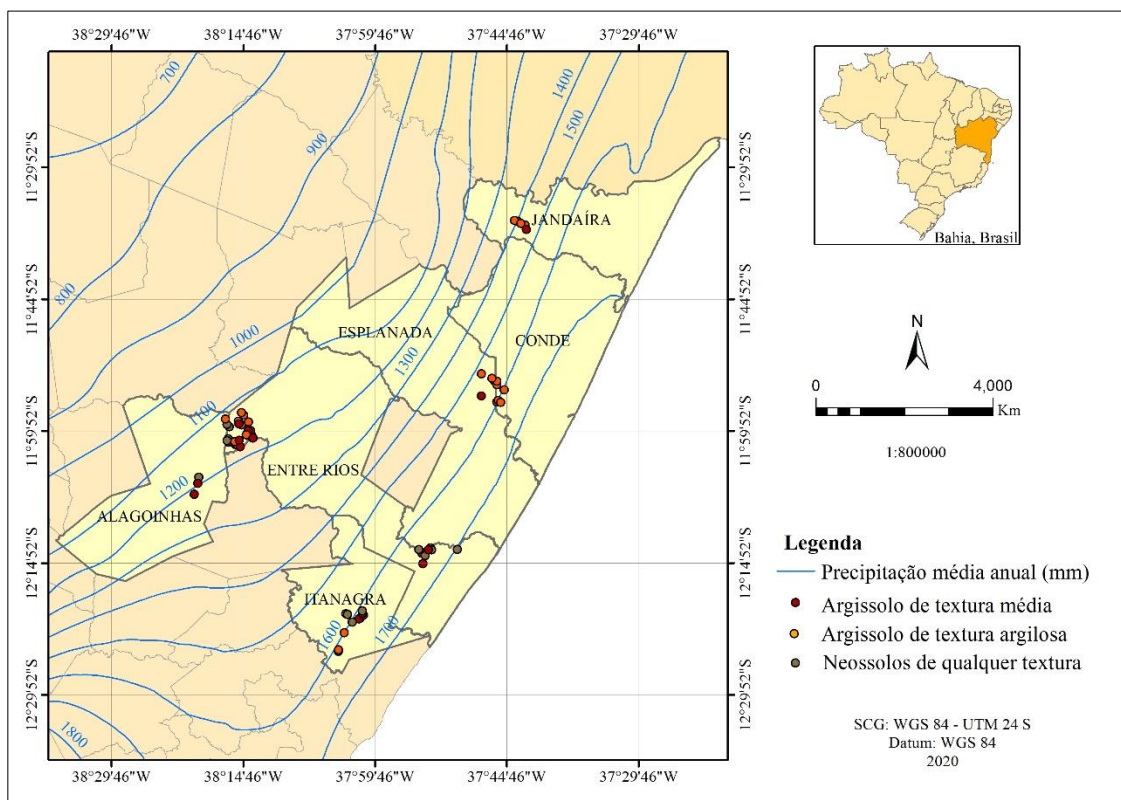


Figura 1. Mapa de localização das áreas cultivadas com o eucalipto na região dos Tabuleiros Costeiros do estado da Bahia.  
Fonte: CPRM (2006).

O clima da região foi classificado como “As” segundo Koppen-Geiger (ALVARES et al., 2013), caracterizado por clima tropical com estação seca de verão e temperatura média anual de 24,3 °C (CLIMATE-DATA, 2020). As áreas apresentaram relevo suave-ondulado onde predominam os seguintes tipos de solo: Argissolo amarelo, Argissolo vermelho-amarelo e Neossolo quartzarênico (EMBRAPA, 2018).

As áreas foram identificadas em campo de acordo com a possibilidade de ocorrência de deficiência nutricional (menor crescimento e deformidade nos fustes) e diferenciaram-se no regime pluviométrico, classe e textura de solo (Apêndice 1). As unidades de manejo foram conforme o regime pluviométrico (classes M - mediano com variação de 1000 a 1300 mm ano<sup>-1</sup> e classe W - chuvoso com variação de 1300 a 1600 mm ano<sup>-1</sup>) e três tipos de solo (1 - Argissolos de textura arenosa (0,0 a 0,2 m) e média (0,2 a 0,4 m); 2 - Argissolos coesos de textura média ou argilosa (0,0 a 0,2 m) e argilosa (0,2 a 0,4 m); e 3 - Neossolos de qualquer textura nas camadas de 0,0 a 0,4 m) (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação das unidades de manejo (UM) das áreas sob cultivo de eucalipto nos Tabuleiros Costeiros do estado da Bahia.

UM	Pluviosidade anual (mm)	Classe de Solo	Textura (0 – 0,2 / 0 – 0,4 m)	n
M1	1000 – 1300	Argissolos	Arenosa / média	13
M2			Média ou argilosa / argilosa	19
M3		Neossolos	*	8
W1	1300 – 1600	Argissolos	Arenosa / média	6
W2			Média ou argilosa / argilosa	9
W3		Neossolos	*	7
Total				62

M = regime pluviométrico "median" (mediano); W = regime pluviométrico "wet" (chuvoso); 1 a 3 = grupos de solo. Textura = classe granulométrica nas camadas superficiais (0 – 0,2 m) e subsuperficiais (0 – 0,4 m). n = número de áreas em cada unidade de manejo (UM).

\* Textura arenosa, média ou argilosa entre 0,0 e 0,40 m.

As imagens utilizadas foram referentes aos dias: 8 do mês de agosto de 2019 e aos dias 3, 6, 7 e 18 de setembro de 2019 do satélite *Planet* (<https://www.planet.com/>), correspondentes às datas mais próximas ao período de coleta foliar no campo. Os cálculos dos índices de vegetação (IV) foram feitos a partir da álgebra dos *rasters* utilizando o *software ArcGis 10.2* ®. Características do sensor encontram-se descritas na Tabela **Erro! Fonte de referência não encontrada.2**.

Tabela 2. Características técnicas do sensor do satélite *Planet*.

Resolução espacial* (m)	3,00
Resolução espectral (nm)	Azul: 464 – 517 Verde: 547 – 585 Vermelho: 650 – 682 NIR: 846 – 888
Resolução radiométrica ( <i>bits</i> )	16
Resolução temporal (dias)	1
Horário de imageamento (hh:min)	09:30 a 11:30
Altitude de operação (m)	475000
Ortorretificação**	Sim
Correção atmosférica**	Sim
Correção radiométrica**	Sim

\*Em nadir; \*\*As imagens do *Planet Ortho Scene* são ortorretificadas, redimensionadas para reflectância de superfície, apresentam projeção cartográfica (UTM/WGS84) e são adequadas para aplicações analíticas e visuais. NIR: *near infra-red* (infra-vermelho próximo).

Fonte: Planet (2019)

Os valores nutricionais foram estimados por coleta de tecido foliar analisados em laboratório (testemunha) e por três índices de vegetação (IV). A

coleta de dados para obter os valores foliares, testemunha, foi realizada no período de 26 de agosto a 20 de setembro para realização da diagnose nutricional determinada em laboratório.

A amostragem do tecido foliar em laboratório foi realizada em três parcelas por área para composição de uma amostra composta. Em cada parcela, foram selecionadas 4 árvores de DAP dominante (diâmetro a altura do peito) considerando os ramos localizados nos quatro sentidos (norte, sul, leste e oeste) do terço médio superior das copas. Em cada ramo, foram coletadas a 5ª e a 6ª folha, totalizando 8 folhas por árvore (correspondendo a 32 folhas por parcela) e resultando em uma amostra composta por 96 folhas por área.

As amostras de tecido vegetal foram analisadas os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), no laboratório *TechSolo* de acordo com os padrões do Programa Interlaboratorial de Análise de Tecido Vegetal (PIATV) promovido pela ESALQ-USP (LIBRELOTTO et al, 2019) cujas metodologias de determinação dos macronutrientes basearam-se em Malavolta et al (1997).

Os valores de referência para os teores de macronutrientes na massa seca das folhas de eucalipto (Tabela 3) referem-se ao padrão nutricional determinados a partir da metodologia *Kenworthy* (IKW), em que o teor ótimo do nutriente e sua variabilidade foram obtidos a partir de sítios florestais de alta qualidade e na metodologia DRIS utilizadas pelo *NuTreeLyptus*.

Tabela 3. Valores médios do padrão de referência para os teores de macronutrientes em matéria seca foliar para *Eucalyptus* ssp.

<b>Elemento</b>	<b>Valores adequados (g Kg<sup>-1</sup>)</b>
N	23,23
P	1,35
K	8,02
Ca	6,00
Mg	2,24
S	1,43

N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; S = enxofre.

Os IV avaliados foram: Índice de vegetação por diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI), Índice de água por diferença normalizada (*Normalized Difference Water Index* - NDWI) e Índice de vegetação ajustado ao solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI) (Tabela 4).

Tabela 4. Equações dos índices de vegetação utilizados na diagnose nutricional por sensor remoto.

Índice de vegetação	Equação	Autor
NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	Rouse et al. (1973)
NDWI	$NDWI = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{NIR}}{\rho_{GREEN} + \rho_{NIR}}$	McFeeters (1996)
SAVI	$SAVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{RED}) * (1 + L)}{(\rho_{NIR} + \rho_{RED})}$	Huete (1988)

$\rho_{NIR}$  = reflectância no *near infrared* (infra-vermelho próximo);  $\rho_{RED}$  = reflectância no vermelho;  $\rho_{GREEN}$  = reflectância no verde; L = 0,5 (fator de correção para médias densidades de vegetação).

As áreas estudadas foram vetorizados para remoção do efeito de borda (faixa de 6 m) e obtenção de dados médios de NDVI, NDWI e SAVI representativos das áreas contendo apenas os *pixels* que não sofreram influência da mistura espectral com áreas externas (BERTOLIN et al., 2017). Após o cálculo dos IV, foi feita a estatística zonal por meio da ferramenta *Zonal Statistic (Spatial Analyst)* do *ArcGis 10.2*® para obtenção dos valores médios de cada área estudada.

Os teores médios de macronutrientes foram avaliados pelo teste de média *Tukey* a 5% de significância no *software* R. Para a verificação do grau de associação entre os teores médios de macronutrientes nas folhas de eucalipto e os índices de vegetação aplicou-se a análise de Correlação Linear de Pearson e a análise de regressão múltipla no *software* SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da análise foliar (testemunha, determinados em laboratório) indicou que não houve deficiência nutricional nos talhões avaliados, pois os teores de macronutrientes encontram-se acima do padrão nutricional de referência propostos conforme pode ser observado através do CV (Tabela 5 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), exceto os teores de enxofre que encontraram-se abaixo de 1,43 g Kg<sup>-1</sup> nas unidades M1, M2 e W2:



Tabela 5. Teores médios de macronutrientes obtidos na análise foliar em função das unidades de manejo dos povoamentos de eucalipto na região dos Tabuleiros Costeiros do estado da Bahia.

UM		Macronutrientes (g Kg <sup>-1</sup> )					
		N	P	K	Ca	Mg	S
Ref.		23,23	1,35	8,02	6,00	2,24	1,43
M1	Média	26,92	2,00	11,12	6,55	2,55	1,32
	CV (%)	14,04	13,07	16,64	8,35	16,24	21,69
M2	Média	28,13	2,14	10,65	7,49	2,70	1,39
	CV (%)	15,38	19,31	12,58	20,23	20,17	23,23
M3	Média	26,44	2,11	11,31	6,73	2,34	1,55
	CV (%)	13,48	11,44	12,14	11,32	15,67	22,61
W1	Média	26,87	1,75	10,12	7,10	2,62	1,63
	CV (%)	18,38	16,85	18,78	20,20	19,25	22,13
W2	Média	27,90	2,03	9,58	6,43	2,41	1,40
	CV (%)	17,25	20,13	28,74	16,40	17,16	29,01
W3	Média	25,07	2,04	10,44	6,64	2,51	1,71
	CV (%)	10,56	10,89	13,84	31,27	15,81	14,46

Ref. = Padrão nutricional de referência para os teores de macronutrientes em matéria seca foliar para *Eucalyptus* ssp. N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; S = enxofre. UM = unidade de manejo; M1 = pluviosidade mediana, Argissolo arenoso ou médio; M2 = pluviosidade mediana, Argissolo argiloso; M3 = pluviosidade mediana, Neossolo arenoso, médio ou argiloso; W1 = pluviosidade chuvosa, Argissolo arenoso ou médio; W2 = pluviosidade chuvosa, Argissolo argiloso; W3 = pluviosidade chuvosa, Neossolo arenoso, médio ou argiloso.

Os teores médios foliares de P e K apresentaram valores mais baixos nas regiões chuvosas (1300 a 1600 mm ano<sup>-1</sup>) para os três grupos de solo (Tabela 5), corroborando com Costa et al. (2006) ao salientar que em alguns solos tropicais os teores de P absorvidos pelas plantas podem ser menores mesmo em condições de alta umidade.

Além disso, o fluxo transpiratório também pode contribuir para o movimento do P nas plantas (TAIZ & ZEIGER, 2009; PES & ARENHARDT, 2015). Assim, os maiores teores de P nas folhas em regiões com regime pluviométrico mediano (1000 e 1300 mm ano<sup>-1</sup>) pode estar relacionado com taxas de transpiração superiores àquelas situadas em W1, W2 e W3.

O teste de média Tukey a 5% revelou que apenas os teores médios de enxofre diferiram estatisticamente para os regimes pluviométricos e para os tipos de solo. As maiores médias ocorreram no regime pluviométrico chuvoso (1300 a 1600 m ano<sup>-1</sup>) onde o teor médio de enxofre foi de 1,56 g Kg<sup>-1</sup> e nos Neossolos (1,70 g Kg<sup>-1</sup>).

Os teores médios dos demais macronutrientes não diferiram estatisticamente para o regime pluviométrico ou solo, visto que a pluviosidade anual média e os tipos de solo não exerceram influência significativa nos teores foliares de N, P, K, Ca e Mg para o clone de eucalipto avaliado e demonstrou sua adaptação ao ambiente.

Os maiores valores de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) foram observados em M1 e W1 (0,77 e 0,78, respectivamente), onde ocorrem Argissolos com textura arenosa ou média. Já o menor valor de NDVI foi observado em M2 (0,71) onde ocorrem solos argilosos sob regime pluviométrico médio inferior a 1300 mm ano<sup>-1</sup>.

O valor mais baixo de NDVI em M2 pode ser explicado pela textura e pela pluviosidade média anual, tendo em vista que solos argilosos apresentam maior capacidade de retenção de água (BARBOZA et al., 2019) e que a menor ocorrência de chuvas na região interfere na absorção de água e conseqüentemente na fotossíntese (PES e ARENHARDT, 2015).

Os valores de NDVI diferiram estatisticamente para o regime pluviométrico, sendo a maior média observada na região de regime chuvoso (NDVI = 0,78) e corroboram com Crusiol et al. (2017) em seu estudo onde observou-se que as regiões de maior disponibilidade hídrica apresentaram maiores valores de NDVI. Portanto, considerando que as condições meteorológicas nos dias que antecederam a aquisição da imagem afetam diretamente a atividade fotossintética, entende-se que no presente estudo a frequência de chuvas na região de regime chuvoso explica a maior média de NDVI visto que no período de seca, tais valores podem variar. Para os tipos de solo, os teores médios de NDVI foram estatisticamente iguais.

Os valores de NDVI encontrados neste estudo corroboraram com Goergen et al. (2016) em seu trabalho cujos valores de NDVI permitiram identificar áreas com plantios clonais de eucalipto no segundo ano de plantio a partir de imagem de satélite. Sendo assim, com base nas análises foliares foram feitas inferências sobre o NDVI que refletiram o estado nutricional sadio do eucalipto.

O SAVI apresentou a mesma tendência do NDVI, fato explicado pelo fato de que este índice é resultante do ajuste do NDVI (ALBA et al., 2017) ao fator de correção do solo ( $L = 0,5$ ) recomendado para médias densidades de vegetação. Assim, o SAVI também diferiu estatisticamente para o regime pluviométrico,

sendo a maior média observada em região chuvosa (SAVI = 1,17) mas não diferiu estatisticamente para tipos de solo.

O NDWI apresentou valores negativos para todas as UM's, com valores entre -0,79 e -0,69 corroborando com os dados obtidos por Brenner e Guasselli (2015) em seu estudo onde as áreas classificadas como “não água” apresentaram valores abaixo de zero (-1,0 a -0,10) correspondentes às áreas de produção vegetal assim como os plantios clonais de eucalipto deste presente estudo. Considerando o que foi estabelecido por Mc Feeters (1996) e exposto por Brenner e Guasselli (2015) a respeito da aplicação deste índice para o realce do contraste entre vegetação e corpos hídricos, constatou-se que o NDWI automatizou a delimitação dos povoamentos clonais de eucalipto proporcionada pelo uso das bandas do infravermelho próximo e do verde.

Os resultados da análise de correlação binária (Tabela 6) entre os macronutrientes indicaram que houve significância para enxofre (S), nitrogênio (N) e fósforo (P) com valores negativos demonstrando que as variáveis são inversamente proporcionais, sendo -0,34 para enxofre com nitrogênio e -0,28 para enxofre com fósforo, com 5% e 1% de significância respectivamente. Tais correlações podem ser explicadas pela dinâmica de absorção dos nutrientes minerais pelas plantas, tendo em vista a importância do enxofre nos processos de assimilação do P e N e a deficiência de S causada pela adubação com NPK (OLIVEIRA et al., 2017; ROCHA et al., 2015).

Tabela 6. Tabela da análise de correlação binária de Pearson dos valores dos índices de vegetação dos macronutrientes em plantios de eucalipto no estado da Bahia.

	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>S</b>	<b>NDVI</b>	<b>NDWI</b>	<b>SAVI</b>
<b>P</b>	0,12	1							
<b>K</b>	0,01	0,36**	1						
<b>Ca</b>	0,11	0,04	0,19	1					
<b>Mg</b>	0,14	0,22	0,03	0,32*	1				
<b>S</b>	-0,34**	-0,28*	-0,17	-0,19	0,06	1			
<b>NDVI</b>	-0,15	0,18	-0,05	-0,31*	0,15	0,07	1		
<b>NDWI</b>	0,17	-0,16	0,05	0,35**	-0,16	-0,13	-0,97**	1	
<b>SAVI</b>	-0,15	0,18	-0,05	-0,30*	0,15	0,07	1,00**	-0,97**	1

\* = 5% de significância. \*\* =1% de significância.

N = nitrogênio; P = fósforo; K = potássio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; S = enxofre.  $\Sigma$  = soma dos teores médios de todos os macronutrientes; NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index* (índice de vegetação por diferença normalizada); NDWI = *Normalized Difference Water Index* (índice da diferença normalizada da água); SAVI = *Adjusted Vegetation Index to Soil* (índice de vegetação ajustado ao solo).

Também houve correlação significativa para potássio com fósforo e cálcio com magnésio (Tabela 6) aos níveis de 1 e 5% de significância, respectivamente. Os valores positivos revelaram a relação proporcional entre os teores de macronutrientes, sendo altamente significativo para potássio com fósforo (0,36) e significativo para cálcio com magnésio (0,32). Porém, os graus de associação entre os teores foram baixos, o que pode ser explicado pela distinção entre as grandezas dos teores relacionados (Tabela 5).

Para todos os índices de vegetação avaliados, a análise de correlação binária revelou significância para os teores de cálcio (Tabela 6), sendo o NDWI o índice que apresentou maior correlação (0,35) com 1% de significância. Contudo, observou-se baixo grau de associação para os IV na determinação do estado nutricional do cálcio nas folhas de eucalipto.

A análise de correlação binária (Tabela 6) também demonstrou que houve significância nas correlações do NDVI com o NDWI e o SAVI. Para o NDWI a correlação foi de -0,97 a 1% de significância, por serem índices inversamente proporcionais, mas para o SAVI a correlação foi de 1,00 corroborando com Alba et al. (2017). Portanto, os resultados demonstraram que o vigor do povoamento de eucalipto descrito pelo NDVI, tendo a influência da água no processo fotossintético na produção vegetal e produtividade (PES e ARENHARDT, 2015).

A análise de regressão múltipla para cálcio (Ca) e magnésio (Mg) com os índices de vegetação demonstrou que o NDWI foi o índice que obteve maior  $R^2$  (0,208). Apesar de apresentar  $R^2$  muito baixo, a existência de correlação entre o NDWI e o Ca e o Mg reforça que os índices de vegetação constituem uma importante ferramenta de precisão para o monitoramento de plantios florestais (ALBA et al., 2017; MORIYA et al., 2017; PONZONI et al., 2015).

## CONCLUSÕES

As 62 áreas avaliadas possuem valores de NDVI superiores a 0,70, contudo as UM localizadas em região chuvosa (1300 a 1600 mm ano<sup>-1</sup>) apresentaram maiores médias.

O índice NDWI apresenta maior correlação para os teores médios de Ca e Mg. Os índices NDVI, NDWI e SAVI apresentam forte correlação entre si (-0,97 a 1,00) e podem auxiliar no mapeamento do vigor e conseqüentemente na produtividade de eucalipto.

Os demais macronutrientes não apresentaram correlações significativas com NDVI, NDWI ou SAVI nas condições deste estudo para os povoamentos clonais de eucalipto no segundo ano de idade.

Recomenda-se estudos complementares considerando diferentes condições nutricionais (deficiência, teores adequados e toxidez) para investigação dos graus de correlação entre os índices NDVI, NDWI e SAVI e os teores médios de Ca no eucalipto.

## REFERÊNCIAS

- ALBA, E. et al. Uso de imagens de média resolução espacial para o monitoramento de dosséis de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 4, p. 1–8, 2017.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- BARBOZA, S. et al. **Determinação das curvas de retenção de água no solo em diferentes topossequências de uma pequena bacia hidrográfica no sul do Brasil**. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...2019**
- BERTOLIN, N. DE O. et al. Predição da produtividade de milho irrigado com auxílio de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 4, p. 1627–1638, 2017.
- BONFATTI JÚNIOR, E. A.; LENGOWSKI, E. C.; REESE, E. Monitoramento da sobrevivência de *eucalyptus* spp. por imagens obtidas por VANTS. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 3, p. p.220-226, 2019.
- BRENNER, V. C.; GUASSELLI, L. A. Índice de Diferença Normalizada da Água (NDWI) para Identificação de Meandros Ativos no Leito do Canal do Rio Gravataí/RS - Brasil. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, n. 1, p. 6381–6388, 2015.
- CEPEA. **Informativo Setor Florestal - Fevereiro 2020**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/revista/pdf/0968381001585680770.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2020.
- CIPRIANI, H. N. et al. **Teores foliares de N , P e K em eucaliptos sob diferentes adubações em Porto Velho , Rondônia**. I Reunião de Ciência do Solo do Núcleo Noroeste. **Anais...Rolim de Moura - RO: 2016**. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1067673/1/CIPRIANIResumoIRCSNRNO.pdf>>
- CLIMATE-DATA. **Dados climáticos da Bahia**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/bahia-207/>>. Acesso em: 2 abr. 2020.
- COSTA, J. P. V et al. Fluxo difusivo de fósforo em função de doses e da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 828–835, 2006.
- CRUSIOL, L. G. et al. Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento do déficit hídrico na cultura da soja. **XII Jornada Acadêmica da Embrapa Soja**, v. 1, 2017.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Atlas pluviométrico do Brasil**. 2006. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e>

Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html > Acesso em: 15 fev. 2021.

EMBRAPA. **Interpretação de resultados de análise foliar**. Dourados - MS, 2005. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/252841/1/DOC200574.pdf>>. Acesso em: 18 maio. 2020

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018.

FURTADO, G. D. F. et al. As geotecnologias e o agronegócio brasileiro: Um estudo de caso na produção de Soja. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v. 10, n. 3, p. 88–96, 2020.

GOERGEN, L. C. DE G. et al. Distinção de espécies de eucalipto de diferentes idades por meio de imagens TM/Landsat 5. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 1, p. 53–60, 2016.

HUETE, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. **International Agrophysics**, v. 4, n. 4, p. 367–376, 1988.

IBÁ. **Relatório 2019**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 18 maio. 2020.

LIBRELOTTO, M. et al. Preparo de amostras para análise foliar por decomposição ácida assistida por radiação micro-ondas. Seminário de Iniciação Científica. **Anais...** p. 173, 2019.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. [S.l: s.n.], 1997.

MARIN, D. B. et al. Sensoriamento remoto multiespectral na identificação e mapeamento das variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro 1. **Revista Ceres**, v. 66, n. 2, p. 142–153, 2019.

MCFEETERS, S.K., 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing**. v 17, 1425-1432.

MICHELON, D. et al. Uso do sensoriamento remoto com VANT's: possibilidade de aquisição de dados para agricultura. **CIÊNCIA & TECNOLOGIA**, v. 3, n. 1, p. 23–35, 29 jul. 2019.

MORIYA, É. A. S.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G. **Avaliação do potencial de índices de vegetação para detecção de doença na cana-de-açúcar em imagens hiperespectrais adquiridas por VANT**. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...**2017

OLIVEIRA, R. J. P. et al. Resposta da beterraba a adubação com nitrogênio, enxofre e micronutrientes em um Cambissolo Háplico. **Horticultura Brasileira**, v. 35, n. 1, p. 63–68, 2017.

PES, L. Z.; ARENHARDT, M. H. **Fisiologia Vegetal**. 1. ed. Santa Maria - RS: Colégio Politécnico da UFSM, 2015.

PONZONI, F. J. et al. Caracterização espectro-temporal de dosséis de Eucalyptus spp. Mediante dados radiométricos TM/Landsat5. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 267–275, 2015.

ROCHA, J. H. T. et al. **Nutrição e fertilização com enxofre e uso de gesso em plantações de eucalipto**. São Paulo - SP, 2015.

ROCHA, J. H. T.; DU TOIT, B.; GONÇALVES, J. L. DE M. Ca and Mg nutrition and its application in Eucalyptus and Pinus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 442, n. January, p. 63–78, 2019.

RODRIGUES, W. B.; MORAIS, F. DE; PASCHOAL, L. G. **Índice de diferença normalizada da água (NDWI) calculado para estações chuvosas e secas na bacia do Córrego Barreiro, Lagoa da Confusão – TO**. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. **Anais...2017**

ROUSE, J. W. et al. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. **Texas A&M University Remote Sensing Center**, p. 120, 1973.

SILVA, F. et al. **Correlações da produtividade do algodoeiro com índices de vegetação obtidos por séries temporais de imagens de satélite**. Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária. **Anais...2019**

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.



## APÊNDICE

UM	P (mm)	Solo	Idade (anos)	nº de Talhões	
M1	1000 a 1300	Argissolos	1,8	3	13
			1,7	0	
			1,6	3	
			1,5	1	
			1,4	2	
			1,3	4	
M2		Argissolos	1,8	3	19
			1,7	2	
			1,6	0	
			1,5	2	
			1,4	9	
			1,3	3	
M3		Neossolo	1,8	3	8
			1,7	0	
			1,6	0	
			1,5	0	
			1,4	4	
			1,3	1	
W1	1300 a 1600	Argissolos	1,8	1	5
			1,7	0	
			1,6	1	
			1,5	0	
			1,4	2	
			1,3	1	
W2		Argissolos	1,8	0	9
			1,7	0	
			1,6	2	
			1,5	5	
			1,4	1	
			1,3	1	
W3		Neossolos	1,8	1	7
			1,7	3	
			1,6	0	
			1,5	2	
			1,4	0	
			1,3	1	
				Total	61

Apêndice 1. Caracterização dos talhões clonais de *Eucalyptus urophylla* plantados em região de clima As, relevo suave-ondulado e 9 m<sup>2</sup>/planta. **P** = pluviosidade média anual (mm); **UM** = unidade de manejo operacional.

## **CAPÍTULO 2**

### **GEOESTATÍSTICA NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO APÓS SUBSOLAGENS PRÉ E PÓS-COLHEITA E PLANTIO DIRETO**

## GEOESTATÍSTICA NA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO APÓS SUBSOLAGENS PRÉ E PÓS-COLHEITA E PLANTIO DIRETO

**RESUMO:** Para estudo da qualidade física do solo na implantação florestal, objetivou-se avaliar a resistência do solo à penetração em plantios clonais de eucalipto sob diferentes preparos na região dos Tabuleiros Costeiros da Bahia. A área de estudo foi composta por clones de *Eucalyptus urophylla* em idade de colheita, cultivado em Argissolo amarelo distrocoeso fragipânico de textura argilo-arenosa. Os sistemas de preparo de solo avaliados foram: a subsolagem pré-colheita com escarificação (T1), subsolagem pré-colheita sem escarificação (T2), subsolagem pós-colheita a 1,10 m de profundidade (T3), subsolagem pós-colheita a 0,90 m de profundidade (T4), subsolagem pós-colheita a 0,60 m (T5) e plantio direto na linha da subsolagem do ciclo anterior (T6). Mensurou-se a resistência do solo à penetração (RSP) em amostragem sistemática e os dados foram submetidos à análise geoestatística para verificação da distribuição espacial da RSP no espaçamento (eixo X) e profundidade do solo (eixo Y) nos diferentes sistemas de preparo. Observou-se forte dependência espacial para RSP em ambos os sistemas de preparo. O preparo T3 mostra-se mais eficiente na redução da RSP. O preparo pré-colheita T1 apresenta menores valores de RSP em relação a T2. O preparo T5 é o menos indicado para a implantação florestal. O preparo T6 evidencia a ocorrência da manutenção do efeito do preparo do solo do ciclo anterior e mostra-se como alternativa de redução de custos com preparo do solo, nas condições do estudo.

**Palavras-chave:** Silvicultura, subsolagem; resistência do solo à penetração.

## **GEOSTATISTICS IN THE PHYSICAL QUALITY OF THE SOIL AFTER PRE- AND POST-HARVEST SUBSOILINGS AND DIRECT PLANTING**

**ABSTRACT:** In order to study the physical quality of the soil in the forest implantation, the objective was to evaluate the resistance of the soil to penetration in clonal eucalyptus plantations under different preparations in the Coastal Coastal Region of Bahia. The study area was a clonal planting of *Eucalyptus urophylla* in the harvest phase (6 years), cultivated in yellow clayey clayey sandstone texture. The soil tillage systems evaluated were: pre-harvest subsoiling with scarification (T1), pre-harvest subsoiling without scarification (T2), post-harvest subsoiling at 1.10 m depth (T3), post-harvest subsoiling at 0.90 m depth (T4), post-harvest subsoiling at 0.60 m (T5) and no-till in the subsoiling line of the previous cycle (T6). Soil resistance to penetration (RSP) was measured in systematic sampling and the data were subjected to geostatistical analysis to verify the spatial distribution of RSP in spacing (X axis) and soil depth (Y axis) in different tillage systems. A strong spatial dependence for RSP was observed in both tillage systems. Preparation T3 is more efficient in reducing RSP. The pre-harvest preparation T1 presents lower values of RSP in relation to T2. The T5 preparation is the least suitable for forest implantation. The T6 preparation shows the occurrence of the maintenance of the soil preparation effect of the previous cycle and is shown as an alternative to reduce costs with soil preparation, under the conditions of the study.

**Keywords:** Silviculture, subsoiling; soil resistance to penetration.

## INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se no mercado internacional por apresentar 5,7 milhões de ha plantados principalmente com eucalipto para fins de produção de papel e celulose (IBÁ, 2019). Para garantir a alta produtividade desses povoamentos, são realizadas operações de preparo que auxiliam na melhoria das condições físicas do solo para o desenvolvimento do eucalipto (GONÇALVES et al., 2017).

O caráter coeso dos solos dos Tabuleiros Costeiros está entre as limitações físicas que restringem o crescimento radicular, reduzem os macroporos e aumentam a densidade do solo, interferindo na capacidade de aeração, no aporte de água (BONINI et al, 2011; COLLARES et al., 2011) e na redução da produção vegetal (REICHERT et al, 2009). A degradação também pode ser provocada pela compactação no solo (DE SOUZA et al., 2018) decorrente, principalmente, do tráfego intensivo de máquinas na colheita florestal (DE SOUZA et al., 2018; LOPES et al., 2011; SZYMCZAK et al., 2014). Nesse sentido, o preparo de solo é fundamental para remediação das limitações físicas dos solos. Entre as operações de preparo de solo, destaca-se a subsolagem como sistema que produz melhores condições físicas para o desenvolvimento do eucalipto (NUNES et al., 2020). A adoção do preparo do solo adequado para implantação florestal sujeita-se à eficiência em superar limitações físicas e ampara-se em critérios operacionais e econômicos que norteiam o seu custo-benefício (BARBOSA et al., 2015) e são primordiais para manutenção de altas produtividades.

Entretanto, faz-se necessário investigar formas alternativas de preparo (GONÇALVES et al., 2016) que garantam alto desempenho e que sejam viáveis do ponto de vista operacional. Considerando a intensificação da demanda por celulose (ROCHA et al., 2020) sobre os povoamentos de eucalipto, o tempo disponível entre colheita e plantio sofre redução, o que implica na diminuição do período disponível para preparo do solo. Assim, a adoção de sistemas alternativos como o preparo pré-colheita ou plantio direto na linha de subsolagem do ciclo anterior justifica-se pela garantia de condições de solo adequadas para implantação florestal.

De forma geral, é indispensável o monitoramento das condições físicas pós preparo do solo (DE SOUZA et al., 2018; FERRARI et al., 2018; SIQUEIRA et

al., 2018). A qualidade física do solo, efeito da compactação do solo, pode ser mensurada e avaliada por meio de penetrômetros e ferramentas de precisão que medem a resistência do solo à penetração (RSP) e auxiliam na tomada de decisão (FERRARI et al., 2018; GONÇALVES et al., 2017; SIQUEIRA et al., 2018). A obtenção da resistência do solo à penetração (RSP) por métodos de precisão em campo destaca-se por sua praticidade de coleta e facilidade de interpretação, sendo dispensável uso de laboratório.

Com esse método pode-se empregar a geoestatística, que constitui uma ferramenta de precisão importante no acompanhamento deste fenômeno e norteia intervenções que permitem solucionar problemas de RSP (GREGO et al., 2014), sendo sensível no diagnóstico do manejo do solo (NAGAHAMA et al., 2016).

Portanto, é altamente relevante o emprego de sistemas de preparo de solo pré e pós-colheita e plantio direto para melhoria das condições físicas do solo.

Para monitorar a eficiência operacional da subsolagem, objetivou-se avaliar a resistência do solo à penetração em plantios clonais de eucalipto sob diferentes preparos na região dos Tabuleiros Costeiros.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

O estudo foi realizado entre agosto de 2019 e fevereiro de 2020, em área cultivada com *Eucalyptus urophylla* sob espaçamento 3,0 x 3,0 m, nas coordenadas centrais 12° 0' 57,070" sul e 38° 3' 28,824" oeste localizados no município de Entre Rios, Bahia, na região dos Tabuleiros Costeiros (Figura 1).

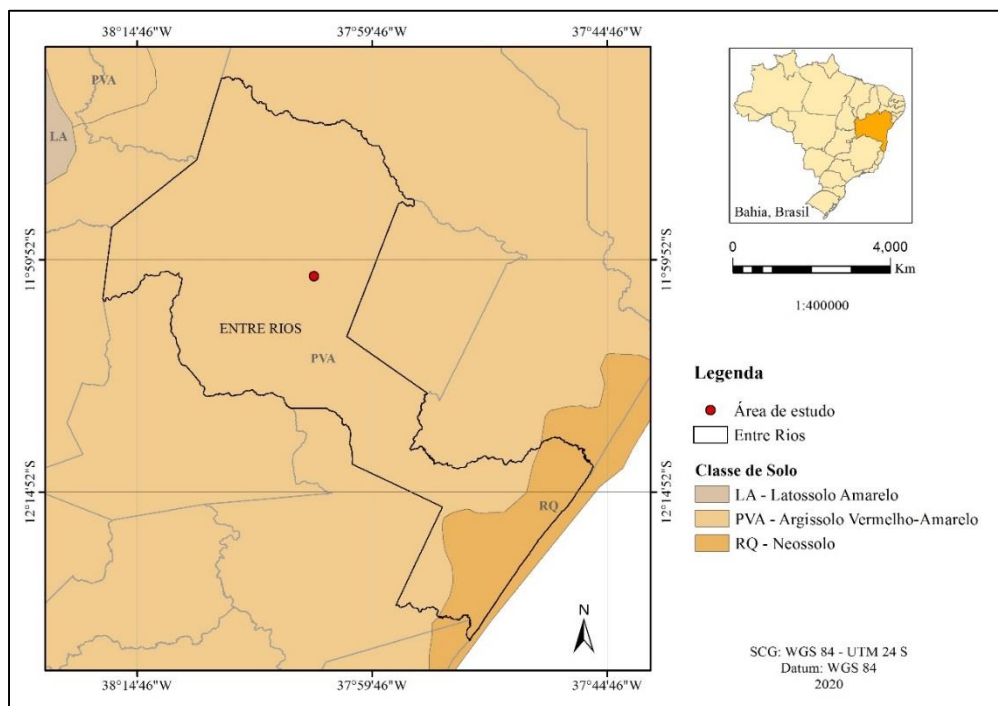


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo realizado em Entre Rios – Bahia, na região dos Tabuleiros Costeiros.

O clima da região foi caracterizado como tropical úmido ou superúmido sem estação seca (Af) segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (ALVARES et al., 2013) com temperatura média anual de 24,3 °C e precipitação média anual de 1300 mm ano<sup>-1</sup> (CLIMATE-DATA, 2020).

O solo da área de estudo foi classificado como Argissolo amarelo distrocoeso (PAdx) com caráter fragipânico (EMBRAPA, 2018) com densidade de 1,50 a 1,55 g cm<sup>-3</sup> e textura argilo-arenosa nas camadas de 0,0 a 0,6 m.

A caracterização física apresentada na Tabela 1 foi obtida de acordo com o Manual de Métodos de Análise de Solo (EMBRAPA, 2017) a partir de 40 amostras indeformadas coletadas nas camadas de 0 a 0,60 m de solo:

Tabela 1. Caracterização física do solo na área de estudo pré-preparo do solo.

Solo	Profundidade (m)		PT	Mi	Ma	K <sub>sat</sub>
PAdx fragipânico	0,00 - 0,20	Média	28,39	17,31	11,08	2,40
		CV (%)	18,50	23,68	22,68	58,96
	0,20 - 0,40	Média	37,96	22,73	15,24	1,84
		CV (%)	7,31	13,62	10,12	87,15
	0,40 - 0,60	Média	36,01	23,43	12,59	1,37
		CV (%)	12,36	17,54	43,34	78,50

PAdx fragipânico = Argissolo amarelo distrocoeso com caráter fragipânico; PT = Porosidade total (%); Mi = Microporosidade (%); Ma = Macroporosidade (%); K<sub>sat</sub> = Condutividade hidráulica saturada (cm h<sup>-1</sup>).

Os sistemas de preparo de solo avaliados foram: a subsolagem pré-colheita com escarificação (T1), subsolagem pré-colheita sem escarificação (T2), subsolagem pós-colheita a 1,10 m de profundidade (T3), subsolagem pós-colheita a 0,90 m de profundidade (T4), subsolagem pós-colheita a 0,60 m (T5) e plantio direto na linha da subsolagem do ciclo anterior (T6) (Tabela 2).

Os tratamentos T1 e T2 foram realizados a 1,10 m de profundidade no período pré-colheita (agosto de 2019), quando a floresta apresentava seis anos de idade, sendo que em T1 foi realizada a limpeza da linha de plantio e escarificação com 0,40 m de profundidade após a colheita e em T2 foi realizada apenas a limpeza da linha de plantio. Os tratamentos T3, T4 e T5 foram realizados no período posterior à colheita (dezembro de 2019), sendo realizada a subsolagem em janeiro de 2020 nas profundidades de 1,10 m, 0,90 m, 0,60 m, respectivamente. O tratamento T6 consistiu no plantio direto de mudas na linha de subsolagem do ciclo anterior (1,10 m de profundidade), realizado 6 anos antes. Após 15 dias da operação do plantio, foram realizadas as mensurações da resistência do solo à penetração em fevereiro de 2020 (Tabela 2). A subsolagem e a escarificação foram realizadas por meio de uma única haste.

Tabela 2. Caracterização dos preparos do solo pré e pós-colheita e plantio direto em área de solo coeso e sob cultivo de eucalipto no estado da Bahia, Brasil.

<b>Tratamentos</b>	<b>Preparo do solo</b>	<b>Descrição</b>
T1	Subsolagem a 1,10m pré-colheita e escarificação a 0,40 m pós-colheita	Subsolagem (1,10 m de profundidade) em pré-colheita, limpeza de linha de plantio e escarificação (0,4 m de profundidade) em pós-colheita
T2	Subsolagem a 1,10 pré-colheita	Subsolagem (1,10 m de profundidade) em pré-colheita e limpeza de linha de plantio em pós-colheita
T3	Subsolagem a 1,10 m pós-colheita	Subsolagem (1,10 m de profundidade) e limpeza de linha de plantio em pós-colheita
T4	Subsolagem a 0,90 m pós-colheita	Subsolagem (0,90 m de profundidade) e limpeza de linha de plantio em pós-colheita
T5	Subsolagem a 0,60 m pós-colheita	Subsolagem (0,60 m de profundidade) e limpeza de linha de plantio em pós-colheita
T6	Plantio direto	Plantio entre plantas na linha de subsolagem do ciclo anterior

Os subsoladores apresentavam hastes aladas e foram tracionadas por tratores de esteira da marca *Caterpillar* de modelos D6 e D8. O trator D6 com potência líquida de 138 kW, peso operacional de 20449 Kg, foi utilizado para a escarificação e para a profundidade de subsolagem de 0,6 m. O trator D8 com



potência líquida de 242 kW e peso operacional de 38351 Kg foi utilizado para as subsolagens de 0,9 e 1,10 m de profundidade.

A colheita foi realizada pelo sistema de toras curtas (*cut-to-length*), constituído pelo conjunto *Harvester* (corte e processamento) e *Forwarder* (extração). O *Harvester* utilizado foi o de esteira da marca *John Deere*, modelo 903MH de 224 kW de potência e peso operacional de 28000 Kg. O *Forwarder* utilizado foi o modelo 895 da marca *Komatsu* de 195 kW de potência e peso operacional de 20,700 kg.

A resistência do solo à penetração (RSP) foi mensurada após o plantio na umidade volumétrica de 24,69 % (umidade gravimétrica de 16,36 %), umidade de friabilidade do solo. Utilizou-se o penetrômetro digital com ponta em forma de cone e ângulo de vértice de 30 graus, em conformidade com a norma ASAE S313.3 (ASABE, 2013; FILHO et al., 2016), equipamento da marca *Falker* e modelo *SoloStar* com motor acoplado a um quadrículo adaptado para alcançar até 1,20 m de profundidade.

A amostragem sistemática da RSP foi realizada na extensão do espaçamento (entre linha, linha e entrelinha). Na linha em que foram plantadas as mudas foram realizadas amostragens aleatoriamente em quatro pontos de espaçamentos em cada tratamento. O perfil de solo foi avaliado nas profundidades de 0,0 a 1,2 m correspondentes às coordenadas Y e os pontos de coleta foram espaçados a cada 0,5 m correspondentes às coordenadas X no sentido perpendicular à linha de preparo, totalizando 3 m de comprimento caracterizando linha e entre linhas (Figura 2**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

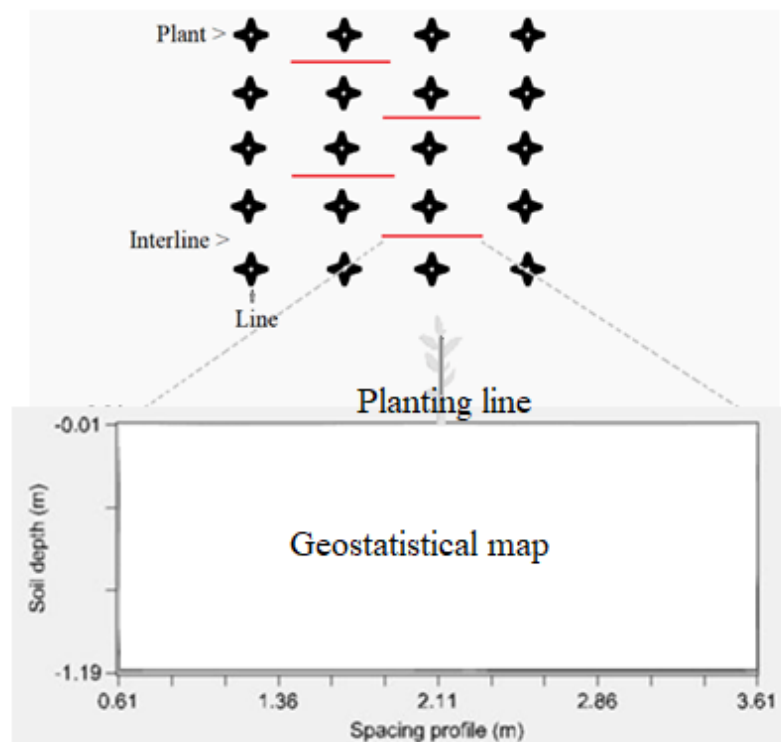


Figura 2. Esquema de coleta e amostragem da resistência do solo à penetração para análise da qualidade do solo em áreas de subsolagem pré e pós-colheita e plantio direto sob cultivo de eucalipto.

Os dados de RSP foram submetidos à análise geoestatística no *software* GS+ v. 5.1.1. A seleção dos modelos matemáticos baseou-se no coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e efeito pepita ( $C_0$ ) de melhores ajustes nos semivariogramas anisotrópicos ou isotrópicos, sendo utilizado o método de *krigagem* ordinária para interpolação dos dados (GREGO et al, 2014).

O índice de dependência espacial foi determinado pela Equação 1 (SIQUEIRA et al., 2018), onde:  $IDE < 25\%$  representa fraca dependência espacial,  $25\% \leq IDE < 75\%$  implica em dependência espacial moderada e  $IDE \geq 75\%$  indica forte dependência espacial.

$$IDE = \frac{C}{C_0 + C} \quad (\text{Equação 1})$$

em que:

IDE = índice de dependência espacial;  $C_0$  = Efeito pepita; C = componente estrutural.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise geoestatística indicaram a existência de forte dependência espacial da resistência do solo à penetração (RSP) em todos os preparos de solo (Tabela 3), o mesmo foi observado por De Souza et al. (2018) em Argissolo.

Tabela 3. Parâmetros do semivariograma anisotrópico dos dados de resistência do solo à penetração para os preparos pré e pós-colheita e plantio direto em área sob cultivo de eucalipto na Bahia, Brasil.

Tratamento	Preparo	Modelo	Range	C <sub>o</sub>	IDE	R <sup>2</sup>
T1	Subsolagem pré-colheita a 1,10m e escarificação a 0,40 m pós-colheita	Exponencial	5,85	0,01	1,00	0,46
T2	Subsolagem pré-colheita a 1,10 m	Gaussiano	6,88	0,01	1,00	0,66
T3	Subsolagem a 1,10 m pós-colheita	Linear	5,40	0,001	1,00	0,51
T4	Subsolagem a 0,90 m pós-colheita	Linear	6,40	0,99	0,97	0,53
T5	Subsolagem a 0,60 m pós-colheita	Gaussiano	3,58	1,23	0,98	0,51
T6	Plantio direto	Gaussiano	4,15	1,48	0,94	0,60

**Range** = alcance (m); **C<sub>o</sub>** = efeito pepita; **IDE** = índice de dependência espacial dado pela Equação 1; **R<sup>2</sup>** = coeficiente de determinação.

A forte dependência espacial observada na Tabela 3 e nos estudos de De Souza et al. (2018) e Siqueira et al (2018) e evidenciaram que a distribuição da RSP apresenta maior tendência de assumir valores mais parecidos aos pontos mais próximos no espaço.

Assim, os dados da Tabela 3 demonstrou que o manejo do solo interferiu na homogeneidade das amostras nas profundidades de atuação do implemento para descompactação do solo (FERRARI et al., 2018), pois o alto IDE indicou que os valores de RSP na região de solo preparado foram similares entre si.

Os parâmetros geoestatísticos (Tabela 3) também permitiram observar que, para todos os modelos ajustados, o alcance foi maior do que a distância de amostragem (0,50 m) explicitando a continuidade espacial das amostras, como também foi observado por Nunes et al. (2020) e Siqueira et al. (2018). O modelo gaussiano (Tratamentos 2, 5 e 6) obteve os melhores ajustes, seguido do linear (tratamento 3 e 4) e o exponencial (Tratamento 1).

A distribuição espacial da RSP no perfil do solo sob as subsolagens pré-colheita demonstrou que o tratamento com a escarificação apresentou menores

valores absolutos de RSP e menores efeitos de compactação do solo pelo tráfego das máquinas (Figura 3). A diferença entre os preparos pré-colheita está relacionada com a escarificação pós-colheita, resultado que reduziu a RSP. Em estudos com uso da escarificação, Drescher et al (2016) evidenciaram melhorias na qualidade física de solo argiloso manejado sob plantio direto, confirmando os benefícios desta operação.

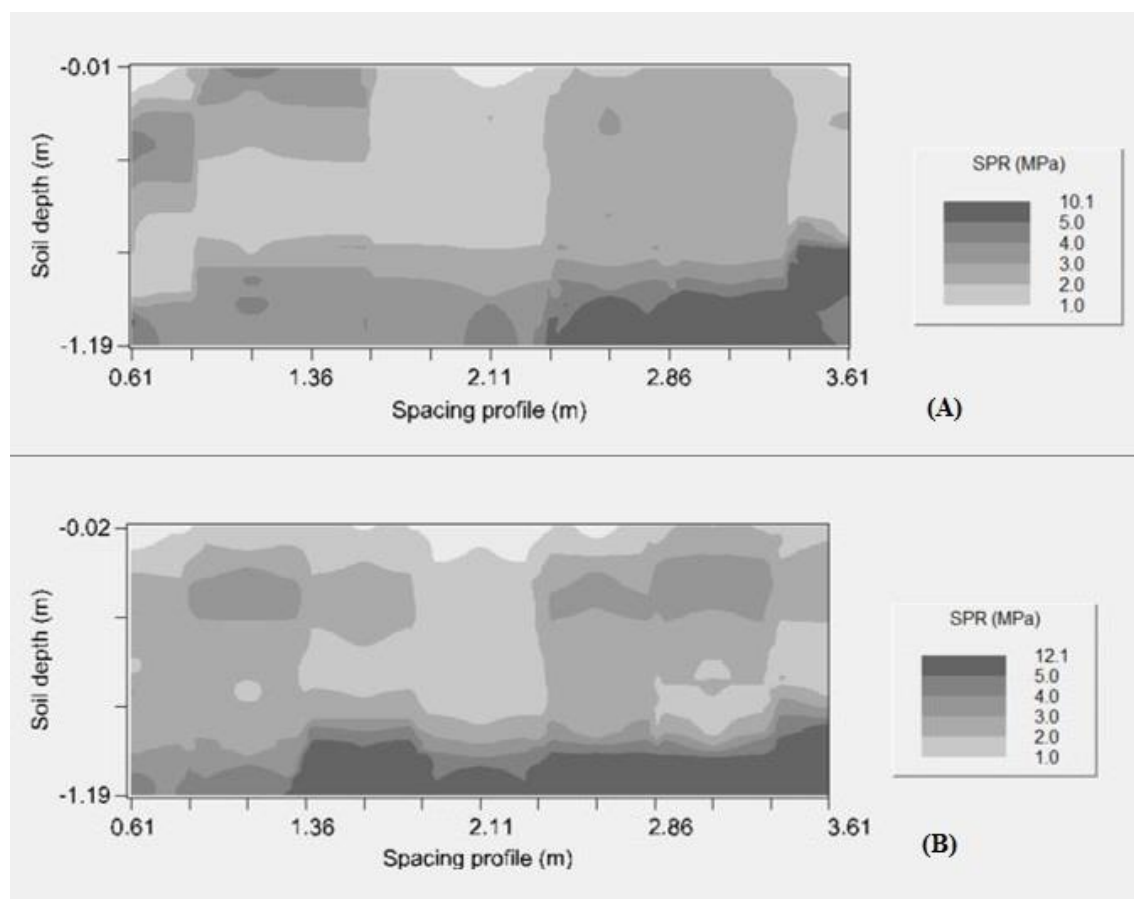


Figura 3. Distribuição espacial da resistência do solo à penetração sob a influência dos preparos: pré-colheita com escarificação (A) e preparo pré-colheita (B).

**Soil depth** = profundidade do solo (m); **Spacing profile** = espaçamento do perfil de solo (m); **SPR** = *soil resistance to penetration*, resistência do solo à penetração (MPa).

A Figura 3 evidenciou que a RSP na linha de preparo de solo (ponto de 2,11 m) alcançou valores inferiores ao limite crítico de 3 Mpa estabelecido por Giarola e Da Silva (2002) como restritivo ao desenvolvimento radicular. Para as camadas inferiores, observou-se que a RSP foi maior na camada entre 1,10 e 1,20 m por não apresentar mobilização do solo e pode estar relacionado ao caráter coeso de solos dos Tabuleiros Costeiros associados às condições de umidade, considerando que o solo sob plantio de eucalipto pode apresentar maior umidade (LEITE et al., 2020; SANTOS et al., 2019).

O tratamento T2 apresentou maiores valores de RSP, o que pode acarretar menor desenvolvimento para as culturas florestais por necessitarem de sistema radiculares profundos. No T1 ocorreu uma faixa maior de descompactação do solo na linha de preparo, quando comparado ao T2 sem escarificação (Figura 3) onde a faixa com menor RSP é mais estreita e mais compactada ao redor. Esse resultado corrobora com Drescher et al. (2016) em seu estudo sobre os efeitos da escarificação nos atributos físicos do solo e na compactação, demonstrando que a escarificação constitui uma alternativa que viabiliza a subsolagem no período pré-colheita para eucalipto em solos coesos.

Portando, a escarificação mostrou-se como uma prática de manejo eficiente para atenuar os efeitos da RSP quando a subsolagem for realizada no período pré-colheita, com redução em 16,53% da RSP quando comparado com o Tratamento 3. Além disso, esta operação pode trazer benefícios para ajustar que o preparo seja realizado na faixa adequada de umidade do solo.

Na subsolagem no período pós-colheita observou-se que a RSP foi menor no T3 onde a profundidade de preparo foi 1,10 m (Figura 4 C) e os valores foram maiores para os preparos a 0,90 m e 0,60 m de profundidade (T4 e T5), atingindo 13,8 MPa na subsolagem a 0,60 m (tratamento T5) (Figura 4 E). Assim, verificou-se que a subsolagem pós-colheita a 1,10 m reduz em 38,55 % a RSP das camadas profundas do solo quando comparado à subsolagem realizada a 0,60 m de profundidade (GONÇALVES et al., 2016), devido à maior profundidade de atuação do implemento reduzindo os valores de RSP da compactação e coesão do solo no T3.

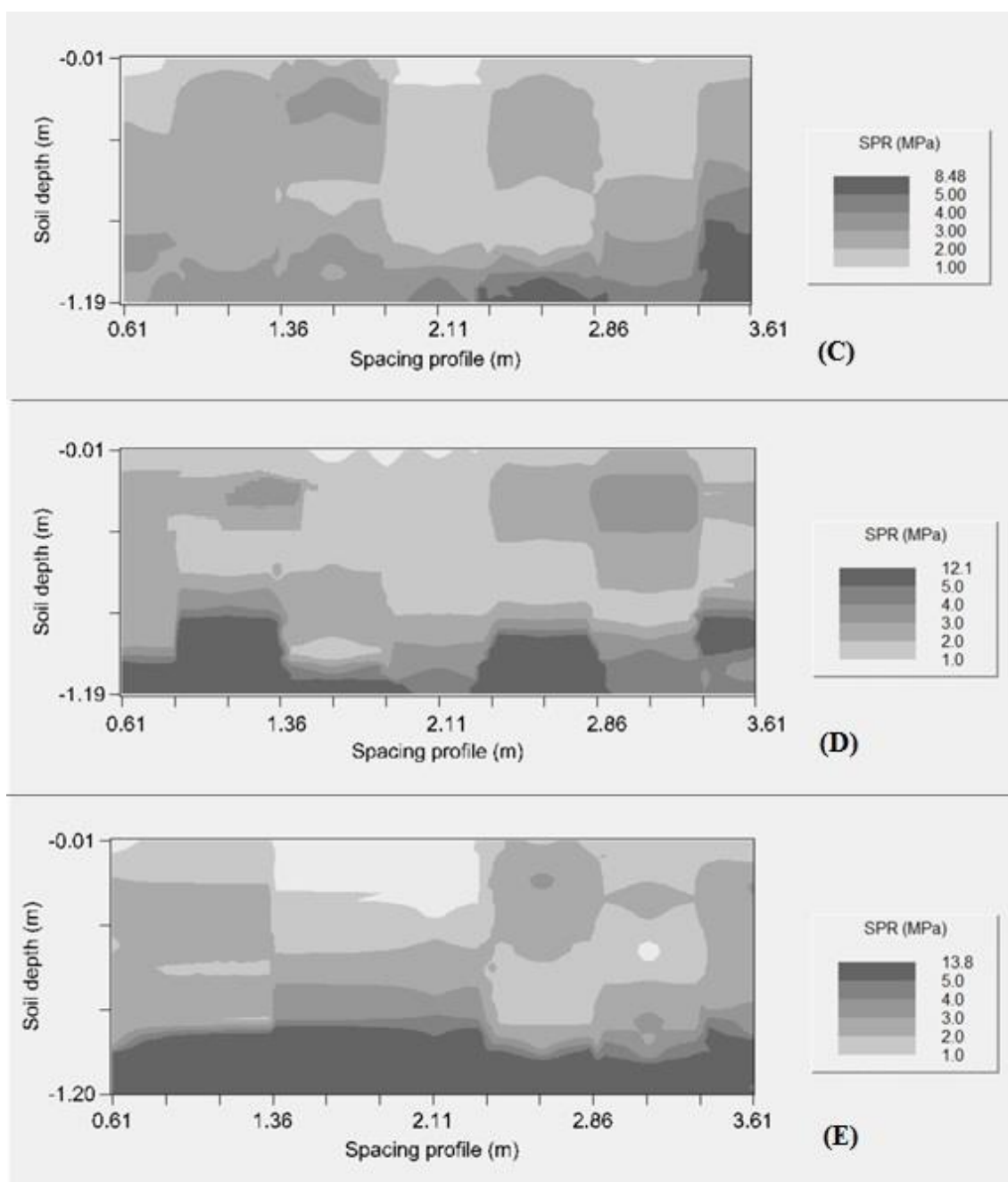


Figura 4. Distribuição espacial da resistência do solo à penetração sob a influência do preparo reduzido com subsolagem a 1,10 m (C), subsolagem a 0,90 m (D) e subsolagem a 0,60 m (E).

**Soil depth** = profundidade do solo (m); **Spacing profile** = espaçamento do perfil de solo (m); **SPR** = *soil resistance to penetration*, resistência do solo à penetração (MPa).

A subsolagem pós-colheita a 1,10 m (Tratamento 3) também mostrou-se mais eficiente na redução da compactação do solo em relação ao preparo pré-colheita com escarificação (Tratamento 1) com redução de 16,03 % de RSP. O Tratamento 3 também foi mais eficiente do que o Tratamento 2 ao reduzir em

16,53% a RSP, o que foi explicitamente demonstrado pela tonalidade mais escura nos mapas de variabilidade espacial da RSP (Figura 4) especialmente nas camadas mais profundas onde se tem maior efeito da RSP. Assim, o desempenho inferior da subsolagem pré-colheita quando comparada à subsolagem pós-colheita a 1,10 m pode estar relacionado com a compactação provocada pelas máquinas de corte e extração florestal (SZYMCZAK et al., 2014).

O efeito do tráfego de máquinas na compactação do solo também pode ser observado na Figura 4 a partir da tonalidade mais escura nas camadas mais superficiais das entrelinhas em contraste à região mais clara de menor RSP, sendo que no Tratamento 5 observou-se maior influência do tráfego de máquinas, inclusive com sinais de compactação nas camadas abaixo de 0,60 m, referente à profundidade de atuação do implemento.

A subsolagem pós-colheita a 1,10 m apresentou menor RSP nas camadas mais profundas do solo em relação ao preparo com plantio direto (Figura 5). Contudo, no plantio direto a RSP nas camadas de 0,0 a 0,80 m apresentou valores similares em relação aos tratamentos 1, 2, 3, 4 e 5 e este desempenho pode estar associado ao efeito de longo prazo da subsolagem do ciclo anterior realizado a 1,10 m de profundidade e também ao efeito da resiliência do solo, quando ocorre o retorno das características inerentes ao solo.

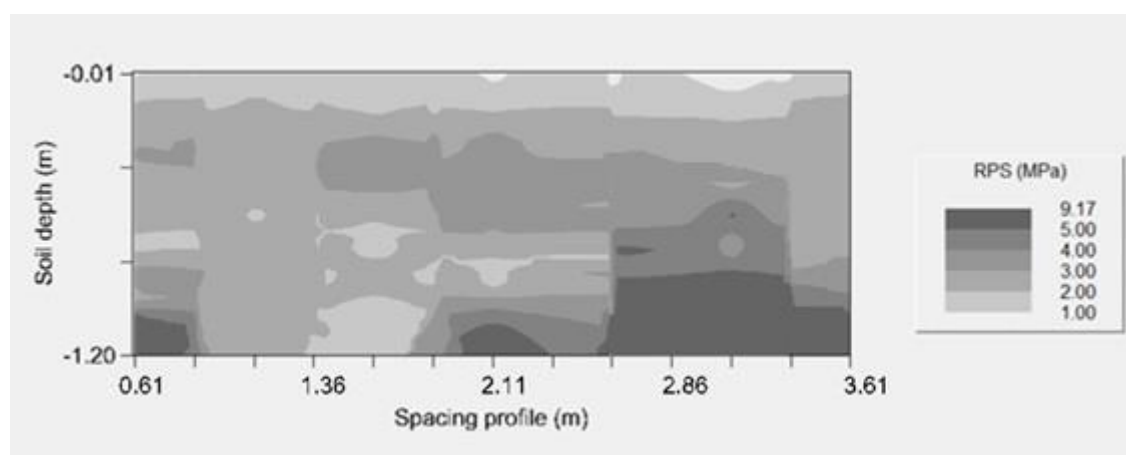


Figura 5. Distribuição da RSP no solo sob plantio direto na linha do ciclo anterior. **Soil depth** = profundidade do solo (m); **Spacing profile** = espaçamento do perfil de solo (m); **SPR** = *soil resistance to penetration*, resistência do solo à penetração (MPa).

A RSP no plantio direto foi menor quando comparado aos preparos T4 e T5 (Figura 4 D e E), indicando que os efeitos da subsolagem do ciclo anterior (1,10 m de profundidade) permaneceram após 6 anos e pode viabilizar o

reaproveitamento da linha de plantio do ciclo anterior. Em relação ao Tratamento 3 (Figura 4 C), a RSP no plantio direto foi 7,52 % maior nas camadas mais profundas do solo e indica que o maquinário utilizado nas operações florestais e a atuação de forças de coesão no solo contribuíram para o aumento da RSP (DE SOUZA et al., 2018; LEITE et al., 2020).

Os preparos realizados em menores profundidades de subsolagem (T4 e T5) foram os que resultaram em menor qualidade física do solo, sendo que a maior profundidade de atuação do subsolador contribuiu para a melhoria física do solo (GONÇALVES et al., (2016).

## **CONCLUSÕES**

A subsolagem pós-colheita a 1,10 m de profundidade apresentou melhores condições físicas para o desenvolvimento do eucalipto.

Para a subsolagem pré-colheita, recomenda-se o uso de escarificação para melhoria da qualidade da operação com redução em 16,53% da RSP nas camadas do solo em comparação a subsolagem pré-colheita sem escarificação.

O preparo de subsolagem a 0,60m de profundidade, Tratamento 5, mostrou-se menos eficiente para o processo de implantação florestal em solo coeso.

O plantio direto com o aproveitamento da subsolagem do ciclo anterior (T6) mostra-se como alternativa de redução de custos com o preparo do solo e pode ser empregado na recondução de mais um ciclo florestal, nas condições deste estudo.

Sugere-se o uso de critérios econômicos e o acompanhamento contínuo do desenvolvimento do eucalipto para obter a rentabilidade econômica dos preparos de solo para a tomada de decisão.



## REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ASABE (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS). **Soil cone penetrometer**. St. Joseph: ASAE standard S313.3. p. 3. 2013. Disponível em: <<https://elibrary.asabe.org/standards.asp>>. Acesso em: 24 Ago 2020.
- BARBOSA, L. P. et al. Desempenho operacional e análise de custo do conjunto mecanizado no preparo do solo para plantio florestal. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 21, p. 746–763, 2015.
- BONINI, A. K.; SECCO, D.; SANTOS, R. F. Atributos físico-hídricos e produtividade de trigo em um Latossolo sob estados de compactação. **Rev. Ciência Rural**, v. 41, n. 9, p. 1543–1548, 2011.
- CLIMATE-DATA. **Dados climáticos da Bahia**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/bahia-207/>>. Acesso em: 2 abr. 2020.
- COLLARES, G. L. et al. Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura – pecuária de leite no noroeste do Rio Grande do Sul. **Rev. Ciência Rural**, v. 41, n. 2, p. 246–250, 2011.
- DE SOUZA, W. J. O. et al. Machine traffic and soil penetration resistance in guava tree orchards. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 4, p. 980–986, 2018.
- DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 2, p. 159–168, 2016.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2018.
- FERRARI, J. M. S. et al. Análise da variabilidade espacial da resistência do solo em diferentes profundidades. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 12, n. 2, p. 164–175, 2018.
- GIAROLA, N. F. B.; DA SILVA, A. P. Conceitos sobre solos coesos e Hardsetting. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 3, p. 613–620, 2002.
- GONÇALVES, S. B. et al. Efeito da profundidade de trabalho na qualidade da operação de subsolagem para implantação florestal. **Revista Arvore**, v. 40, n. 1, p. 29–37, 2016.

GONÇALVES, S. B. et al. Resistência do solo a penetração em diferentes profundidades de subsolagem. **Nativa**, v. 5, n. 3, p. 224–229, 2017.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. DE; VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. In: **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa Solos, 2014. p. 74–83.

IBÁ. **Relatório 2019**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>>. Acesso em: 18 maio. 2020.

LEITE, E. DA S. et al. Compactação do solo causada pelo harvester e intensidade de tráfego do forwarder na colheita florestal. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, p. 1–10, 2020.

LOPES, E. DA S. et al. Avaliação da umidade na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 659–667, 2011.

NAGAHAMA, H. DE J. et al. Efeitos da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e agronômicos do capim elefante. **Revista Ceres**, v. 63, n. 5, p. 741–746, 2016.

NUNES, Í. L. et al. Variabilidade espacial de clones de Eucalipto em função do preparo de solo e adubações. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 12334–12349, 2020.

REICHERT J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil Till Res.** v. 2:242-54. 2009

ROCHA, J. S. DA et al. O mercado contemporâneo da celulose brasileira : uma proxy do comportamento da demanda e atratividade ao investimento privado The contemporary brazilian pulp market: a proxy for demand behavior and attractiveness to private investment. **Revista Sítio Novo**, v. 4, n. 1, p. 134–143, 2020.

SANTOS, C. S. S. et al. **Relação da umidade com diferentes coberturas vegetais do solo**. IV Congresso Brasileiro de Eucalipto. **Anais...**2019

SIQUEIRA, P. G. DE S. et al. Avaliação da resistência à penetração em um argissolo vermelho distrófico. **Revista Ambientale**, v. 2, n. 2, p. 1–15, 2018.

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, 2014.

## **CONCLUSÃO GERAL**

Os índices NDVI, NDWI e SAVI mostraram-se promissores no diagnóstico nutricional do eucalipto, contudo recomenda-se estudos complementares que permitam correlacionar os teores de nutrientes com a reflectância nas diferentes bandas do sensor remoto para derivação de índices de vegetação por meio de uma curva espectral para diagnose nutricional do eucalipto.

A geoestatística auxiliou no monitoramento da qualidade dos diferentes sistemas de preparo, porém sugere-se a análise de custos operacionais com mão de obra, manutenção e combustível para auxiliar na tomada de decisão sobre o melhor sistema de preparo de solo para implantação do eucalipto.