

MURILO FIGUERÊDO CAMPOS DE JESUS

**INTEGRAÇÃO DE MODELAGEM ECOFISIOLÓGICA, ANÁLISE DE
COMPONENTES PRINCIPAIS E LINHAS DE FRONTEIRA NA
PARAMETRIZAÇÃO DE MODELO DE QUALIDADE DO SOLO PARA EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Raphael Bragança Alves
Fernandes

Coorientador: Júlio César Lima Neves

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

J58i
2024

Jesus, Murilo Figuerêdo Campos de, 1986-

Integração de modelagem ecofisiológica, análise de componentes principais e linhas de fronteira na parametrização de modelo de qualidade do solo para eucalipto / Murilo Figuerêdo Campos de Jesus. – Viçosa, MG, 2024.

1 dissertação eletrônica (38 f.): il.

Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 2024.

Referências bibliográficas: f. 34-38.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.662>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos - Qualidade - Medição. 2. Eucalipto. 3. Florestas - Manejo. I. Fernandes, Raphael Bragança Alves, 1969-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.
III. Título.

CDD 22. ed. 631.4

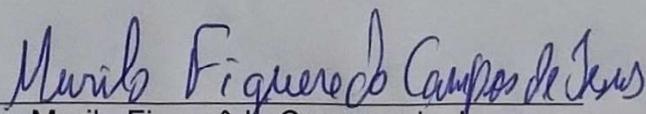
MURILO FIGUERÊDO CAMPOS DE JESUS

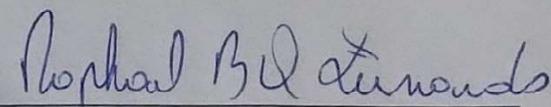
**INTEGRAÇÃO DE MODELO ECOFISIOLÓGICO, ANÁLISE DE COMPONENTES
PRINCIPAIS E LINHAS DE FRONTEIRA NA PARAMETRIZAÇÃO DE MODELO
DE QUALIDADE DO SOLO PARA EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovado: 27 de fevereiro de 2024.

Assentimento:


Murilo Figuerêdo Campos de Jesus
Autor


Raphael Bragança Alves Fernandes
Orientador

AGRADECIMENTOS

À Deus primeiramente, pelo dom da vida e abrir meus caminhos.

À minha família, em especial a minha esposa Fabiane Ferreira Neiva, minha mãe Hélia Figuerêdo dos Santos, minha avó Cacilda Figueredo dos Santos e minha irmã Jéssica Figuerêdo Campos de Jesus, pela paciência e apoio incondicional ao renunciar as suas necessidades, em favor da realização dos meus sonhos, desejos e conquistas da vida.

Ao meu filho, Benício Neiva Figueredo pela paciência, carinho, amor e sua dedicação ao crescimento intelectual nos estudos.

Ao meu pai, irmão, tios e demais familiares, José Wilson Campos de Jesus, Leonardo Wilson Campos de Jesus, Álvaro Figuerêdo dos Santos, Itamar Figuerêdo dos Santos e Adroaldo Guimarães dos Santos Filho pelo incentivo, apoio e conversas.

Ao meu orientador Raphael Bragança Alves Fernandes, que entendeu meu sonho profissional, viabilizou e trilhou comigo mais esse desafio acadêmico.

Ao meu coorientador Júlio César Lima Neves, pelos ensinamentos, confiança, reflexões científicas, aprimoramento ímpar na área florestal e da pesquisa.

À Universidade Federal de Viçosa - UFV, ao Programa de Solos e Nutrição de Plantas e professores deste, pelo acolhimento, por possibilitar o conhecimento universal e aprimoramento científico em mais uma etapa da minha vida.

Aos colegas pelo aprendizado, Amanda Abreu, Aniely Saar, Caik Miranda, César Arévalo-Hernández, Cíntia Moreira, Clara Oliveira, Cláudio Andrade, Davi Senna, David Pereira, Gaston Rochebois, Guilherme Moura, Gustavo Alves, Gutemberg Porto, Heitor Palma, Hugo Silva, Jackson Alves, Jeani Sandin, José Henrique Magri, Juliano Mudadu, Karin Ferraz, Katherine Escobar, Magda Farias, Marco Túlio, Mikaela Abranches, Nicolly Vieira, Priscila Resende e Rugana Imbaná.

À empresa Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA), em especial a Fernando Palha Leite pelo acolhimento da proposta e atenção para a realização desta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro para realização dos meus estudos e pelo incentivo contínuo a pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

JESUS, Murilo Figuerêdo Campos de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Integração de modelagem ecofisiológica, análise de componentes principais e linhas de fronteira na parametrização de modelo de qualidade do solo para eucalipto.** Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes. Coorientador: Júlio César Lima Neves.

A cultura do eucalipto envolve um importante setor da economia brasileira, sendo o Brasil destaque mundial na produção de florestas plantadas desta árvore. Investimentos em ganhos de produtividade do eucalipto têm sido associados a preocupação da relação do manejo da cultura com a qualidade do solo nos últimos anos. O presente estudo teve por objetivo propor uma nova modalidade para a parametrização de modelo de qualidade do solo de forma conectada com ganhos de produtividade da cultura do eucalipto e da sustentabilidade da produção florestal. A área de abrangência deste estudo compreendeu propriedades rurais com cultivo de eucalipto plantados e conduzidos pela empresa Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA), durante o período de 1990 a 2022, de 44 municípios no estado de Minas Gerais, Brasil. O banco de dados de uma empresa foi utilizado onde estavam disponíveis dados das análises físicas, químicas de solos e produtividade de cada talhão pelo inventário florestal a partir do incremento médio anual (IMA). Os dados de 825 perfis de solo foram divididos em dois grupos, 70% dos dados, foi usado para compor o grupo de treinamento nas análises de parametrização do modelo de qualidade do solo e os 30% restantes compuseram o grupo de validação. O método da linha de fronteira foi utilizado para 29 variáveis, relacionado a produtividade relativa anual IMA/IMA_{3-PG} . Os dados foram submetidos a análise de componentes principais (PCA) pelo *software* R versão 4.3.2, as variáveis foram selecionadas para evitar a multicolinearidade e pelos valores de *loading* de 0,707, posteriormente obteve-se a composição do Índice de Qualidade do Solo (IQS) e os pesos de cada variável selecionada. As variáveis densidade do solo (Ds), matéria orgânica (MO), capacidade de água disponível 180cm (CAD) e fósforo remanescente (P-rem) tiveram maior influência na produtividade de eucalipto, e conseqüentemente, possuem maior estabilidade devido as suas características intrínsecas ao sítio e menor alteração em grandes escalas de povoamentos florestais. As áreas amostradas apresentam boa

qualidade do solo dentre as variáveis analisadas, sendo 85,7 % (Ds), 70,9 % (MO), 84,5% (CAD) e 75,9 % (P-rem), dentro das duas melhores categorias identificadas. E 98,2% dos solos apresenta índice de qualidade do solo elevado (0,8 - 1,0). Tendo em vista os resultados deste trabalho, podemos comprovar que as áreas conduzidas com eucalipto pela empresa possuem elevada qualidade do solo, com perdas reduzidas para as variáveis densidade do solo, matéria orgânica, capacidade de água disponível 180 cm e fósforo remanescente.

Palavras-chave: índice de qualidade do solo, modelo e eucalipto.

ABSTRACT

JESUS, Murilo Figuerêdo Campos de, M.Sc., University of Viçosa, February, 2024.

Integration of ecophysiological modeling, principal component analysis, and boundary lines in the parameterization of soil quality model for eucalyptus.

Adviser: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-adviser: Júlio César Lima Neves.

Eucalyptus cultivation encompasses an important sector of the Brazilian economy, with Brazil being a world leader in the production of planted forests of this tree. Investments in productivity gains of eucalyptus have been associated with concerns about the relationship between crop management and soil quality in recent years. The present study aimed to propose a new parameterization procedure for soil quality models connected to productivity gains and planted forest sustainability. The scope of this study included sites with eucalyptus cultivation planted and managed by the company Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA) from 1990 to 2022 from 44 municipalities in Minas Gerais, Brazil. A company's database was used, where data from physical and chemical analyses of soils and the productivity of each plot through the forest inventory from the average annual increment (MAI) were available. The data from 825 soil profiles were divided into two groups: 70% of the data was used to compose the training group in the analyses of the soil quality model parameterization, and the remaining 30% made up the validation group. The frontier line method was used for 29 variables related to the annual relative productivity MAI/MAI 3-PG. The data were subjected to principal component analysis, and the variables were selected to avoid multicollinearity and by the loading values of 0.707, subsequently obtaining the composition of the Soil Quality Index (SQI) and the weights of each selected variable. The variables soil bulk density (Ds), soil organic matter (OM), available water capacity at 180 cm (AWC), and remaining phosphorus (P-rem) presented the higher influence on eucalyptus productivity and, consequently, have more stability due to their intrinsic characteristics to the site and less change on large scales of forest stands. The sampled areas show good soil quality among the analyzed variables, being 85.7 % (Ds), 70.9% (OM), 84.5 % (AWC), and 75.9% (P-rem), within the two better-identified categories. Moreover, 98.2% of the soils presented higher SQI (0.8 - 1.0). Considering the results of this work, we can prove that the areas managed with eucalyptus by the

company have high soil quality, with reduced losses for the variables bulk density, organic matter, available water capacity at 180cm, and remaining phosphorus.

Keywords: soil quality index, model and eucalyptus.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO DE LITERATURA	11
2.1 Eucalipto e o setor florestal nacional.....	11
2.2. Qualidade do solo	12
2.3. Parametrização de modelos preditivos.....	14
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
Modelos de linhas de fronteira para todas as variáveis	20
Análise de Componentes Principais (PCA).....	20
Linhas de fronteira superior.....	25
Validação dos modelos	27
Índice de qualidade do solo (IQS).....	30
5. CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS.....	34

1. INTRODUÇÃO

As florestas plantadas cada dia fazem mais parte da paisagem, tendo ocupado mais de 294 milhões de hectares no mundo (FAO, 2020). Especificamente no Brasil, a cultura do eucalipto envolve um importante setor da economia. Em 2021, o setor nacional de árvores plantadas obteve receita bruta de 244,6 bilhões de reais, com o gênero *Eucalyptus* alcançando produtividade média de 38,9 m³/ha/ano e uma área total de plantio de 7,53 milhões de hectares (IBÁ, 2022).

Nas últimas décadas tem se observado uma ampliação da área de floresta plantada com eucalipto no Brasil. Mesmo sendo originária da Austrália, Tasmânia e ilhas da Oceania, essa árvore encontrou no país condições favoráveis para o seu estabelecimento, e tem sido várias as iniciativas que buscam o melhor manejo da cultura, visando ganhos de produtividade e sustentabilidade.

A dinâmica de cultivo de longa permanência tornou-se uma realidade para os proprietários rurais que apostaram no eucalipto em busca de uma saída para o aumento da renda rural nas fazendas e tempo para dedicação a outras atividades.

Nos últimos anos, investimentos em ganhos de produtividade do eucalipto têm sido associados a preocupação da relação do manejo da cultura com a qualidade do solo. Sob a atuação das organizações na agenda *Environmental, Social and Governance* (ESG), o componente ambiental que, no caso da atividade florestal, é alicerçada na qualidade do solo que, conseqüentemente pode contribuir com outros serviços ecossistêmicos, como na mitigação das mudanças climáticas.

Neste cenário mais recente, pesquisas envolvendo atributos da qualidade do solo revelam-se necessárias para o aprimoramento do conhecimento envolvido e determinante para a sustentabilidade e produtividade do eucalipto, tendo proposições de modificações ou aperfeiçoamento de práticas de manejo em face às mudanças climáticas (SILVA et al., 2020), assunto que deve estar no radar de empresas florestais.

Diante da relação da qualidade do solo com a produtividade e produção de serviços ecossistêmicos para a sociedade, é relevante estudos que ampliem a discussão e o refinamento do conceito de qualidade, buscando uma aplicação mais prática e direta que possa ser inserida nas práticas de campo. Desta forma, pode-se permitir tomadas de decisão mais voltada para ganhos de produção e

sustentabilidade. A ligação entre a qualidade do solo e a produtividade é o primeiro passo, na busca de identificar parâmetros possíveis que favoreçam o uso otimizado do recurso solo e possam propiciar o olhar para as práticas de manejo que permitam no longo prazo a manutenção do cultivo de eucalipto nas áreas já implantadas, bem como orientar escolha de áreas para novos povoamentos.

Nessa perspectiva, o uso de modelos preditivos tem sido utilizado buscando evidenciar padrões, apontar tendências e predizer cenários futuros possíveis. A adoção de modelos tem o intuito de proporcionar maior eficiência do uso dos recursos disponíveis no presente e antecipar o emprego de formas promissoras de manejo dos atributos do solo, para uma melhor expectativa de produção vindoura e equilibrada.

A grande disponibilidade de dados de algumas empresas florestais pode permitir o uso de ferramentas mais modernas de avaliação. Como exemplo de modelos de mais recente aplicação, tem-se a Linha de Fronteira.

O método da Linha de Fronteira possibilita estabelecer linhas limites - superiores e inferiores, de variáveis associadas à produtividade em grandes povoamentos, por meio da análise numérica e visualização gráfica, permitindo assim inferências que podem ser úteis na tomada de decisão da empresa (WEBB, 1972). Desta forma, é possível estabelecer um padrão de ocorrência das variáveis de um povoamento, buscando identificar a variação de valores (padronizados) associadas à maiores produtividades. Essa é uma nova forma de definição de parametrização a partir de dados coletados em campo, sem a necessidade de se adotar funções de pontuação padronizadas nas equações das curvas de pontuação, comumente utilizadas na pesquisa.

Diante do exposto, o presente trabalho teve por objetivo propor uma nova modalidade para a parametrização de modelos de qualidade do solo de forma conectada com ganhos de produtividade da cultura do eucalipto e da sustentabilidade da produção florestal.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Eucalipto e o setor florestal nacional

As primeiras plantas de eucalipto chegaram no Brasil no início do século XIX. Os primeiros materiais foram inseridos no Jardim Botânico (1825) e no Museu Nacional do Rio de Janeiro (1868), e ainda no município de Amparo - SP (1861-1863) e no Rio Grande do Sul (1868) (EMBRAPA, 2019).

Conforme relatório da *Food and Agriculture Organization* - FAO (2020), as florestas plantadas somaram 294 milhões de hectares, enquanto o Brasil alcançou em 2021, 9,93 milhões de hectares plantados de eucalipto, pinus e demais espécies, que são capazes de absorver 1,79 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente da atmosfera, além de fornecer material para a produção de painéis de madeira, pisos laminados, celulose, papel, produção energética, biomassa, entre outros (IBÁ, 2022).

Segundo a Embrapa (2019), as pesquisas brasileiras com eucalipto datam de 1904 em Rio Claro-SP, pelo pioneirismo do pesquisador Edmundo Navarro de Andrade. A Lei de Incentivos Fiscais ao Reflorestamento de 1966 no Brasil, promoveu a expansão das áreas de florestas plantadas no país e o eucalipto se consolidou, como a espécie principal dos povoamentos, através da implantação do Plano Nacional de Desenvolvimento (II PND) em meados de 1970.

A produtividade do eucalipto depende do local de plantio, manejo adotado e insumos (EMBRAPA, 2019). Nesse sentido, primeiramente antes do plantio, a escolha do local é fundamental para projetar uma alta produtividade para a espécie, uma vez que o cultivo é de longo prazo. Além disso, o manejo e insumos utilizados adequadamente, favorecem o crescimento vegetal sem limitação nutricional.

2.2. Qualidade do solo

O conceito de sentido mais amplo de qualidade do solo, considera “a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens” (DORAN e PARKIN, 1994). Por sua vez, Vezzanni e Mielniczuk (2009) indicam que “qualidade do solo é a integração das propriedades biológicas, físicas e químicas do solo, que o habilita a exercer suas funções na plenitude”.

A produtividade do eucalipto tem no recurso natural solo um dos pilares, como já destacado em outros estudos. Exemplo disto foi a pesquisa realizada em diversas localidades do Brasil, no qual se constatou a melhoria no desempenho do *stand* de plantas conforme a pedosequência Entisols → Inceptisols → Latossolos (SILVA et al., 2020).

Atualmente, nas avaliações de qualidade do solo, os indicadores mais utilizados são os físicos e químicos (BONE et al., 2012; MONCADA et al., 2013). Outros estudos como o de Chaer e Tótola (2007), indicam ser mais sensíveis os indicadores biológicos e bioquímicos na avaliação do solo em áreas de eucalipto.

Segundo Cardoso et al. (2013), pH do solo, capacidade de troca catiônica, matéria orgânica do solo e disponibilidade de nutrientes, são os principais indicadores químicos na avaliação da qualidade do solo, de acordo com a resposta ao manejo adotado.

O manejo das espécies florestais pode contribuir com a qualidade do solo. Neste sentido, um experimento realizado em um Argissolo, em Santa Maria-RS, indicou a melhoria nos atributos da qualidade física do solo (aumento de porosidade e redução da densidade do solo) em resposta à deposição da serapilheira na superfície depois de seis anos de cultivo de *Eucalyptus grandis*, em diferentes métodos de preparo do solo (ROCHA et al., 2015). Outro estudo revelou que a mesma manutenção dos resíduos da colheita do eucalipto em campo é capaz de evitar o aumento de densidade do solo e da resistência do solo à penetração, na região da Formação Barreiras, no município de Entre Rios-BA (MELO et al., 2022).

As rotações sucessivas sem um manejo adequado podem impactar negativamente na qualidade do solo. Avaliando os potenciais impactos de cultivos

sucessivos sem a devida atenção no manejo, Wang et al. (2022) identificaram o efeito deteriorante de plantações florestais sucessivas de eucalipto em atributos do solo na China. O estudo mostrou que sucessivos plantios são associados ao aumento da densidade do solo, além da diminuição da porosidade e quantidade de macroagregados.

Em estudo de eucalipto com 1.750 árvores/ha, entre 2018 e 2021, na fazenda florestal estatal de Qipo, no condado de Shangsi, Região Autônoma de Guangxi, China, Zhu e Wu (2023) consideraram 20 indicadores de solo para a avaliação da qualidade de solo com fertilização e manutenção da serapilheira. Os dados foram submetidos a análise de componentes principais (PCA), onde foram selecionados apenas os CP's com autovalor > 1 , e foram utilizados para definição do conjunto mínimo de dados (MDS), os valores dos *loadings* de 0,7 como referência. Como resultado da PCA, foram alcançados percentuais de explicação em CP1 (44,73%) e CP2 (20,15%) da variação total dos dados, além de concluir que o tratamento com a manutenção da matéria orgânica (resíduos mantidos no solo) na área, melhorou as estruturas de porosidade, fornecimento de nutrientes e as reações bioquímicas estudadas, afetando positivamente o índice de qualidade do solo. Na pesquisa, foi encontrada interação positiva entre a adubação aplicada e a manutenção de resíduos no solo.

São José (2019) em estudo com povoamento de eucalipto após seis anos de instalação em solos arenosos, avaliou o impacto dos diferentes manejos dos resíduos da colheita nos indicadores químicos, físicos e biológicos de qualidade do solo. Neste trabalho foram analisados 17 indicadores de solo em 5 tratamentos de manejo de resíduos, após análise de componentes principais encontraram nos resultados o percentual de variância de CP1 (29,33%), CP2 (17,28%) e CP3 (17,06). Os indicadores do solo foram selecionados com base nos *loadings* acima de 0,7. A remoção dos resíduos da colheita do eucalipto não alterou os teores de nutrientes do solo ao final do ciclo da rotação (6 anos). Por outro lado, esta prática induziu a degradação física (aumento da densidade do solo) e biológica (redução da atividade microbiana) do solo. A remoção dos resíduos da colheita do eucalipto e da serapilheira (SRSS) causa grande impacto sobre a qualidade do solo reduzindo em cerca de 30% o índice de qualidade do solo (IQS) em relação às áreas com a manutenção dos resíduos da colheita do eucalipto (CR) em solos arenosos. Os componentes

associados à matéria orgânica e à atividade biológica do solo foram os que mais contribuíram para a redução do índice de qualidade do solo com a remoção dos resíduos vegetais da rotação anterior e exclusão da serapilheira da rotação atual. O IQS foi sensível ao manejo dos resíduos da colheita do eucalipto e pode ser uma ferramenta útil para monitorar a qualidade do solo em área de florestamento.

2.3. Parametrização de modelos preditivos

O potencial de produtividade pode ser estimado por meio de modelos baseados em processos, visando a adoção de técnicas no manejo da área plantada e focando na sua manutenção ou incremento, além de se buscar correlacioná-la com os atributos de qualidade do solo (MENEZES, 2005). Por outro lado, a preocupação com a qualidade do solo tem se incrementado nas empresas nas últimas décadas, muito em função da relação desse recurso natural com a sustentabilidade da atividade florestal. Neste cenário, verifica-se que os modelos de produtividade e de qualidade do solo não são integrados, sendo cada um voltado para seu objetivo final, mas sem a devida e necessária conexão, o que garantiria efetivamente uma produção em bases mais sustentáveis.

O método da Linha de Fronteira feito por Webb (1972), onde são estabelecidas linhas limítrofes, superior e inferior, tem sido adotado amplamente na área florestal e em outras culturas com grandes povoamentos. A definição de faixas de suficiência para a nutrição do eucalipto foi utilizada por Wadt et al. (2004), Oliveira (2010), Fernandes (2010) e Borges (2012), em teca (CARVALHO, 2016), assim como para algodão e soja (KURIHARA, 2001; SERRA et al., 2010), e no milho (WALWORTH et al., 1986). Desta forma, a adoção dessa metodologia permite diferenciar áreas com altas produtividades das áreas com baixas produtividade e com isso, realizar inferências, no intuito de melhor compreender as variações que ocorrem no campo.

Nesse sentido, os modelos preditivos podem fornecer uma previsão de cenários possíveis para as empresas, além de contribuir para correções de manejo de forma antecipada. Fernandes (2010) e Galdino (2015) estudaram a definição de faixas de suficiência para relacionar a nutrição de talhões com a produtividade através do uso da linha de fronteira.

Em estudo, com reforma de povoamento de eucalipto instalado em março de 1995 e com amostras coletadas aos 5,5 anos de crescimento das árvores em Botucatu-SP, Chaer (2001) avaliou sete diferentes métodos de preparo da área do solo em duas profundidades, compondo após análises um modelo de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e biológicos. No estudo, os valores dos indicadores de qualidade do modelo foram padronizados e geradas curvas de pontuação padronizada de acordo com a metodologia de Wymore (1993), os resultados obtidos mostraram que os indicadores biológicos, principalmente microbiológicos, foram mais sensíveis em comparação aos físicos e químicos.

A análise de componentes principais (PCA) é um método menos subjetivo na seleção de indicadores, o que pode ajudar a evitar redundância de dados. Por outro lado, o método de PCA requer um grande conjunto de dados e é menos “amigável ao usuário”, impondo assim barreiras à adoção prática para avaliações de IQS em escala agrícola ou regional (ANDREWS et al., 2002; MUKHERJEE e LAL, 2014).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de abrangência deste estudo compreendeu propriedades rurais com cultivo de eucalipto plantados e conduzidos, durante o período de 1990 a 2022, nos municípios das macrorregiões de Belo Oriente (Açucena, Belo Oriente, Braúnas, Coronel Fabriciano, Ferros, Governador Valadares, Ipatinga, Joanésia, Mesquita, Naque, Periquito e Santana do Paraíso), Guanhães (Coroaci, Divinolândia de Minas, Gonzaga, Guanhães, Materlândia, Paulistas, Peçanha, Sabinópolis, Santo Antônio do Itambé, São João Evangelista, Sardoá e Virginópolis), Ipaba (Bom Jesus do Galho, Bugre, Caratinga, Córrego Novo, Iapu, Ipaba e Pingo-D'Água) e Nova Era (Alvinópolis, Antônio Dias, Barão de Cocais, Bom Jesus do Amparo, Catas Altas, Itabira, Mariana, Nova Era, Rio Piracicaba, Santa Bárbara, São Domingos do Prata e São Gonçalo do Rio Abaixo), no estado de Minas Gerais, Brasil. As propriedades correspondem à área de atuação da empresa Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA).

O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen (1948), é do tipo Aw, que corresponde a um clima tropical com inverno seco. Este clima caracteriza-se por apresentar estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro, sendo julho o mês mais seco. A temperatura média do mês mais frio é superior a 18 °C. As precipitações são superiores a 750 mm anuais, podendo chegar até 1.800 mm.

Os talhões das áreas em estudo apresentavam, no momento da coleta dos dados, idades de cultivo de eucalipto entre 3 e 20 anos.

Para este estudo, o banco de dados da empresa foi utilizado. Neste banco estavam disponíveis dados das análises físicas e químicas de solos, unidades de mapeamento de solos e o incremento médio anual (IMA), produtividade de cada talhão pelo inventário florestal. Os dados climatológicos foram obtidos de estações de monitoramento da própria empresa ou de órgãos públicos dessas regiões. Todas as áreas de eucalipto, tinham pelo menos uma rotação.

Em uma fase inicial, considerada como padronização e ajustes, foram descartados talhões e variáveis que possuíam dados incompletos ou ausentes. Os dados foram organizados em um novo banco de dados, utilizado com o objetivo de remover valores grosseiramente discrepantes *outliers* antes das análises. Outro critério de inclusão no novo banco foi utilizar dados provenientes do horizonte A.

Em uma segunda fase, os dados dos 825 perfis de solo foram divididos em dois grupos. Um primeiro, formado pela escolha aleatória de 70% dos dados, foi usado para compor o grupo de treinamento nas análises de parametrização do modelo de qualidade do solo. Os 30% restantes compuseram o grupo de validação, procedimento executado em fase posterior.

Os 825 perfis de solo utilizados neste estudo integram as classes dos Latossolos (LA, LV, LVA), Argissolos (PA, PV), Cambissolos (CX), Neossolos (RU) e Plintossolos (FF, FX) (SiBCS, 2018). As quantidades de perfis identificados nos talhões de eucalipto por classe de solo são apresentadas na Tabela 1. As espessuras das camadas do primeiro horizonte dos perfis variaram entre 5 e 63 cm.

Os dados da capacidade de água disponível (CAD) foram estimados por classe de solo para todos os perfis até a profundidade de 180 cm, levando-se em consideração as equações utilizadas por Menezes (2005) de acordo com a média da soma dos teores de silte e argila do solo dos horizontes de cada sítio.

Neste estudo foi considerado que na região de origem dos dados é possível se alcançar a máxima eficiência de produção, não havendo restrição potencial à cultura do eucalipto na região.

Tabela 1. Número de perfis de cada classe de solo dos municípios avaliados nas quatro macroregiões

Classe de solo	Belo Oriente	Ipaba	Guanhães	Nova Era	Total
CX	110	37	79	117	343
FF e FX	-	1	3	4	8
LA	64	45	29	18	156
LV	15	1	81	24	121
LVA	46	12	41	22	121
PA e PV	3	2	1	2	8
RU	16	29	9	14	68
TOTAL	254	127	243	201	825

Na terceira fase, denominada de padronização inicial, para cada variável foi produzida uma curva de pontuação normalizada, utilizando-se a técnica da análise

numérica Linha de Fronteira (*boundary line analysis*) (WEBB, 1972). A padronização inicial visa relacionar individualmente a produtividade do talhão, variável dependente escolhida para este estudo, com os diferentes atributos do solo. Nesta fase são utilizados os 70% dos dados disponíveis, como indicado previamente.

Neste estudo foram apenas considerados os dados da linha de fronteira superior (LFS). Modelos de regressão foram ajustados para cada variável com o *software CurveExpert Professional* versão 2.7.3 e o modelo com melhor ajuste para expressar as relações foi escolhido.

Na avaliação foram utilizadas as seguintes variáveis: densidade do solo (Ds), capacidade de água disponível 180 cm (CAD), pH (água e KCl), matéria orgânica, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Mn, Na, P e K disponíveis, Cu, Fe, Zn, P-rem, soma e saturação por bases (SB, %), H + Al, CTC efetiva e potencial, areia fina e grossa, silte, argila, argila + silte, relação silte/argila, porosidade, e saturação por Al^{3+} (%). Todas essas variáveis foram analisadas no banco de dados original conforme Embrapa (2009) e Alvarez V. et al, (2000).

A variável dependente utilizada como produtividade foi a relação entre o incremento médio anual (IMA), aferido em campo, e o IMA calculado pelo modelo de estimativa da produtividade atingível, o 3-PG - *Physiological Principles in Predicting Growth* (LANDSBERG e WARING, 1997), ou seja, a razão IMA Real/IMA 3-PG. Nos valores estimados no modelo ecofisiológico 3-PG, foram considerados: os dados climatológicos disponíveis da empresa ou dos próprios municípios ou, na sua ausência, de municípios próximos por interpolação; a parametrização de Borges (2012); a textura do solo média (sl); a fertilidade ótima não limitante (FR=1) durante todo o ciclo; e os valores obtidos a cada ano, de acordo com o inventário do talhão.

Na sequência os dados foram submetidos a uma análise de componentes principais (PCA) para a seleção das variáveis, com a utilização do software R versão 4.3.2. O critério de seleção de variáveis para a continuidade da análise foi a multicolinearidade e, posteriormente, as variáveis com *loadings* superiores a 0,707, que garantem um R^2 superior a 0,50.

Posteriormente, as linhas de fronteiras das variáveis selecionadas foram validadas utilizando-se os 30% restantes dos dados.

O índice de qualidade do solo (IQS) composto é dado por meio de cada peso das quatro variáveis selecionadas, conforme equação abaixo:

$$\boxed{\text{IQS} = \text{peso} \times v_1 + \text{peso} \times v_2 + \text{peso} \times v_3 + \dots + \text{peso} \times v_n} \quad (\text{Equação 1})$$

em que:

IQS = índice de qualidade do solo (0-1);

peso = valor relativo de contribuição da variável selecionada para o índice IQS;

v_n = variáveis selecionadas na PCA.

O peso de cada variável do IQS foi calculado com os resultados da análise de componentes principais, pela equação abaixo:

$$\boxed{\text{Peso } v = (\textit{loading } v)^2 * \text{autovalor CP}} \quad (\text{Equação 2})$$

em que:

peso v = valor relativo da variável;

loading v = *loading* da variável;

autovalor CP = autovalor do componente principal.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelos de linhas de fronteira para todas as variáveis

Os resultados obtidos para a Linha de Fronteira Superior (LFS) de todas as variáveis são apresentados nas equações na Tabela 2.

Análise de Componentes Principais (PCA)

A análise de componentes principais, considerando apenas os componentes com autovalores > 1 (CP1 e CP2), e *loadings* como critério de corte na seleção dos indicadores de $R^2 = 0,50$, indicou como as variáveis mais explicativas a MO, CAD, t, P-rem e Ds. Esse critério é comumente utilizado em trabalhos com indicadores edáficos na avaliação da qualidade do solo quando se usa os componentes principais, e corresponde ao valor referencial de 0,707 para o *loading* das variáveis.

Os resultados dos autovalores, percentuais de explicação e explicação acumulada dos dados por componentes principais CP1 e CP2 são apresentados na Tabela 3. Os dados das variáveis Ds, MO, t, CAD e P-rem explicam 68% da variação do total de dados de CP1 e CP2. Valores próximos desse percentual explicativo são encontrados em pesquisas de avaliação da qualidade do solo. Por exemplo, o estudo realizado por Zhu e Wu (2023) com 20 variáveis de solo em nove grupos de experimentos ortogonais com fertilização e manejo de resíduos com povoamento de eucalipto na China, revelou um percentual de 64,88% de explicação da variação dos dados com os dois componentes CP1 e CP2.

Tabela 2. Equações ajustadas pelo *software CurveExpert* Profissional versão 2.7.3. e respectivo R-quadrado, dos valores obtidos nas análises da Linha de Fronteira Superior (LFS) para as variáveis dos municípios avaliados.

Variável	Equação	R ²
pH H ₂ O	$y = -4,475676870408344 + 2,189196118382906 * x - 0,2192951464940807 * x^2$	0,89
pH KCl	$y = -5,244869119463844 + 2,794095124944799 * x - 0,3114019103768513 * x^2$	0,85
Al ³⁺	$y = 0,8608211492355705 + 0,1493305871463805 * x - 0,06510551179505288 * x^2$	0,82
H + Al	$y = 0,5910938568878396 + 0,1012430117739028 * x - 0,006045468498351872 * x^2$	0,93
P	$y = 0,8732382174618465 + 0,06457309515952316 * x - 0,007511386990508136 * x^2$	0,91
K ⁺	$y = 0,8734384327076984 + 0,005760506704592292 * x - 0,00005629379017520544 * x^2$	0,97
Ca ²⁺	$y = 1,002451836718165 - 0,08061980278405977 * x$	0,90
Mg ²⁺	$y = 0,9718741382439969 * (1 - \exp(-9,008961836507151 * x))$	0,63
Na ⁺	$y = 0,9292818951783683 + 0,02450296216486982 * x - 0,002363713243795040 * x^2$	0,90
Fe	$y = 0,9915752170943242 + 0,0003463186160611860 * x - 0,000007861836130409333 * x^2$	0,99
Cu	$y = 0,9761827085673047 + 0,005955414730019982 * x - 0,0001062513226118174 * x^2$	0,85
Mn	$y = 0,9695064084997892 + 0,002658871797630261 * x - 0,00004772820948247729 * x^2$	0,82
Zn	$y = 0,8729772283430176 + 0,1541490490570644 * x - 0,03681246378217226 * x^2$	0,94
SB	$y = 0,9880526244288593 * (1 - \exp(-6,280508351453371 * x))$	0,61
t	$y = 0,6613620762929328 + 0,2731680090854118 * x - 0,05403831991207889 * x^2$	0,93
T	$y = -0,1434719099972115 + 0,2424601776574744 * x - 0,01230304662557205 * x^2$	0,95
m	$y = 0,9354595031636597 - 0,001183863266718309 * x$	0,72
V	$y = 0,8378764591408039 + 0,01491352004625960 * x - 0,0002636468677000309 * x^2$	0,89

Variável	Equação	R ²
P-rem	$y = 0,766617724135472 + 0,0351911814197337 * x - 0,00125242633478751 * x^2$	0,93
Ds	$y = 0,05902853199899 + 1,60983624970866 * x - 0,690792342896778 * x^2$	0,95
CAD (180cm)	$y = -0,0117 + 0,0128719746392621 * x - 0,0000367728760412699 * x^2$	0,93
Argila	$y = 0,3530722366128839 + 0,02001863675937090 * x - 0,0001505334485871236 * x^2$	0,93
Silte	$y = 0,8210331515682250 + 0,04027029358816118 * x - 0,002129796894317110 * x^2$	0,94
Areia Fina	$y = 0,3229713506093215 + 0,09932590664679199 * x - 0,003663928393133425 * x^2$	0,98
Areia Grossa	$y = 0,5824357659920959 + 0,02762814223755254 * x - 0,0004990086919354139 * x^2$	0,93
Silte + Argila	$y = 1,178934053156660E-01 + 2,563633764309063E-02 * x - 1,820980768205277E-04 * x^2$	0,86
Silte/Argila	$y = 1,001740282637106 * \exp(-0,04948063577901861 * x)$	0,53
Porosidade	$y = -1,626245678301711 + 0,08863898594113076 * x - 0,0007464685962477596 * x^2$	0,91
MO	$y = (0,345064011127049 + 0,23877095052491 * x) / (1 - 0,113323741722886 * x + 0,0478213356109326 * x^2)$	0,98

Tabela 3. Autovalores, percentuais de explicação e acumulada das variáveis densidade do solo (Ds), matéria orgânica (MO), CTC efetiva (t), capacidade de água disponível 180cm (CAD) e fósforo remanescente (P-rem), referente aos componentes principais CP1 e CP2 da análise de componentes principais (PCA).

	CP1	CP2
Autovalor	2,08	1,33
Explicação (%)	41,6	26,6
Explicação Acumulada (%)	41,6	68,2

A Tabela 4 apresenta os valores dos *loadings* das variáveis Ds, MO, t, CAD e P-rem por componentes principais CP1 e CP2 da análise de componentes principais (PCA). Todos apresentaram mais de 0,707 de *loading* em pelo menos um dos dois primeiros componentes. Estudos como o de São José et al. (2023) também consideraram este mesmo critério. No referido trabalho, dos 17 indicadores de solo avaliados em um experimento de manejo de resíduos da colheita de eucalipto em solos arenosos no Rio Grande do Sul, 13 obtiveram *loadings* superior a 0,7, que ao final garantiram um percentual de explicação acumulada de 63,67% na soma dos componentes CP1, CP2 e CP3.

Tabela 4. Valores dos *loadings* de densidade do solo (Ds), matéria orgânica (MO), CTC efetiva (t), capacidade de água disponível 180cm (CAD) e fósforo remanescente (P-rem), referente aos componentes principais CP1 e CP2 da análise de componentes principais (PCA).

	CP1	CP2
Densidade do solo (Ds)	0,7575*	-0,0717
Matéria orgânica (MO)	-0,8128*	-0,2444
CTC efetiva (t)	0,2948	-0,8296*
Capacidade de água disponível 180cm (CAD)	-0,3859	-0,7252*
P-remanescente	0,7812*	-0,2300

* Valores de *loadings* superiores a 0,707.

Os valores percentuais de contribuição das variáveis Ds, MO, t, CAD e P-rem por componentes principais CP1 e CP2 são apresentados na Tabela 5. Destaca-se a

importância, em ordem decrescente, da matéria orgânica (31,8%), P-remanescente (29,3%) e densidade do solo (27,6%) dentro do CP1. Essas variáveis sozinhas somadas representam 88,7% do total da variação total dos dados. No CP2, temos o percentual de contribuição de 51,7% da CTC efetiva e 39,5% da capacidade de água disponível 180 cm.

A importância relativa da variável matéria orgânica deste trabalho, difere da variável teor de matéria orgânica do estudo de Binoti et al. (2022) sobre o uso do método da perturbação na definição de importância relativa de variáveis preditoras na produtividade de povoamento de eucalipto ao final da rotação com uso de redes neurais artificiais, no qual as variáveis precipitação distribuída em várias idades e teor de argila do solo foram de maior importância na predição do volume de madeira.

Tabela 5. Percentual de contribuição de densidade do solo (Ds), matéria orgânica (MO), CTC efetiva (t), capacidade de água disponível 180 cm (CAD) e fósforo remanescente (P-rem), referente aos componentes principais CP1 e CP2.

	CP1 (%)	CP2 (%)
Densidade do solo (Ds)	27,6	0,4
Matéria orgânica (MO)	31,8	4,5
CTC efetiva (t)	4,2	51,7
Capacidade de água disponível 180 cm (CAD)	7,2	39,5
P-remanescente	29,3	4,0

Das cinco variáveis inicialmente selecionadas (Ds, MO, t, CAD e P-rem), optou-se por continuar a análise com as variáveis de maior estabilidade no solo, ou seja, que são intrínsecas às condições de sítio, não sofrendo facilmente alterações pelo manejo adotado em curto período de tempo. Desta forma, a variável CTC efetiva (t) foi excluída das análises seguintes com a produtividade, uma vez que é passível de alteração por práticas agrônômicas de fertilização, usadas comumente no manejo nas propriedades rurais. Vale salientar que, em culturas com fertilizações mais frequentes do nutriente fósforo, a variável P-rem sofre incremento de teores ao longo do tempo, não sendo, portanto, uma variável a ser considerada como de maior estabilidade. No caso da cultura do eucalipto, onde as adubações de manutenção não contam com a

aplicação de P, esse não seria um grande problema e, desta forma, optou-se por manter essa variável neste estudo.

Linhas de fronteira superior

As curvas com as linhas de fronteira superior das variáveis selecionadas previamente foram geradas, mostrando a relação das variáveis densidade do solo (Figura 1), matéria orgânica (Figura 2), capacidade de água disponível 180 cm (Figura 3) e fósforo remanescente (Figura 4) e a relação IMA/IMA-3-PG.

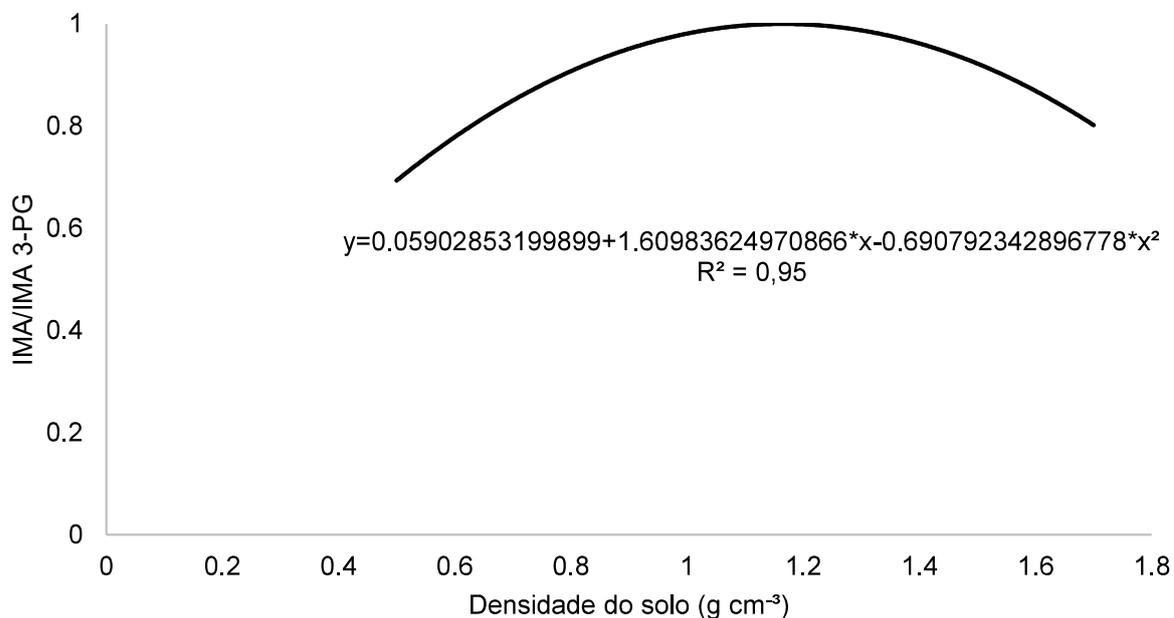


Figura 1. Variação dos valores de densidade do solo (Ds) em relação ao incremento médio anual/incremento médio anual do 3-PG (IMA/IMA 3-PG) dos municípios avaliados.

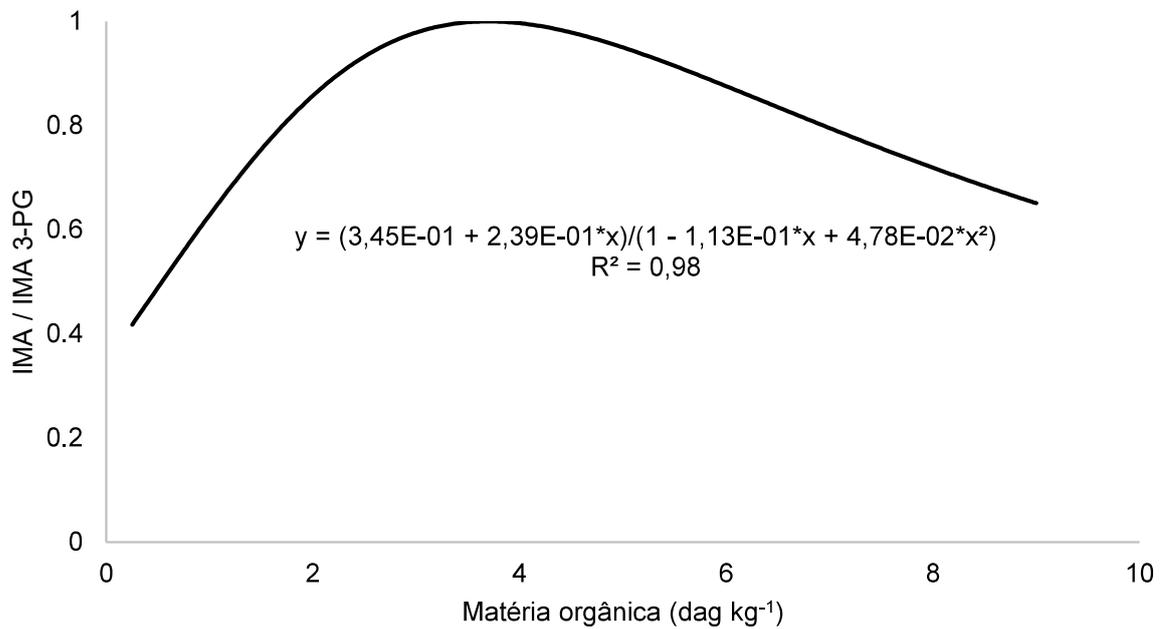


Figura 2. Variação dos valores de matéria orgânica em relação ao incremento médio anual/incremento médio anual do 3-PG (IMA/IMA 3-PG) dos municípios avaliados.

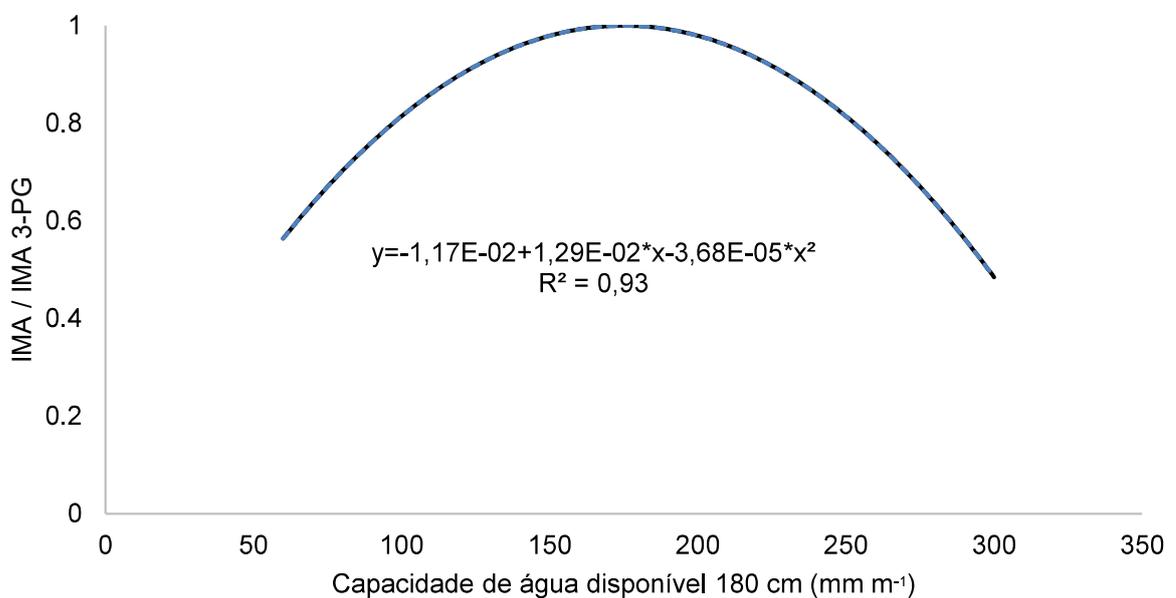


Figura 3. Variação dos valores de capacidade de água disponível 180cm (CAD) em relação ao incremento médio anual/incremento médio anual do 3-PG (IMA/IMA 3-PG) dos municípios avaliados.

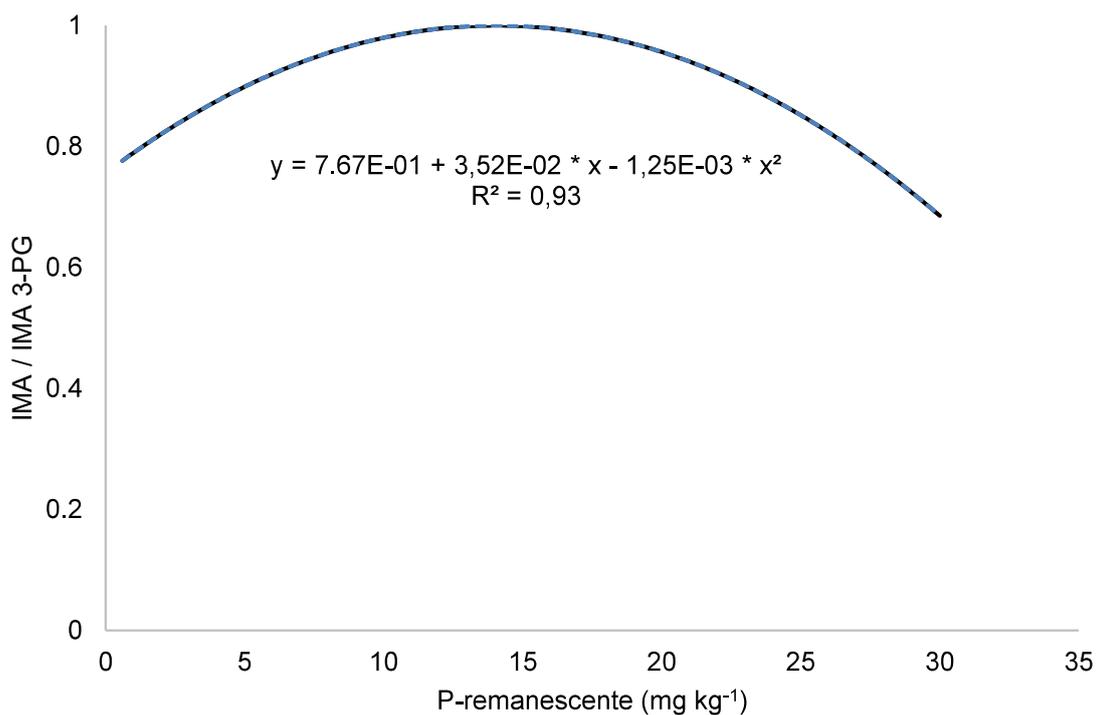


Figura 4. Variação dos valores de P-remanescente em relação ao incremento médio anual/incremento médio anual do 3-PG (IMA/IMA 3-PG) dos municípios avaliados.

Validação dos modelos

Os resultados da validação dos modelos, com a utilização dos 30% dos dados restantes, mostram a adequação da delimitação da linha de fronteira superior para o alcance da máxima produtividade potencial (relação IMA/IMA-3-PG) para as variáveis densidade do solo (Figura 5), matéria orgânica (Figura 6), capacidade de água disponível 180 cm (Figura 7) e fósforo remanescente (Figura 8).

Muitos poucos dos dados utilizados para a validação extrapolaram o limite definido pela linha de fronteira superior. Dos 243 dados utilizados, apenas três valores de D_s estiveram fora da linha de fronteira estabelecida, enquanto para as demais variáveis, esse valor foi um pouco maior: matéria orgânica (13), CAD 180 cm (16) e P-rem (12). De todos os modos, os dados obtidos refletem uma boa estimativa dos fatores limitantes das maiores produtividades atingíveis, uma vez que a validação comprovou que a linha de fronteira superior delimitou 99 % dos sites quando se analisa a D_s, 95 % quando se avalia MO e P-rem, e 93 % dos dados quando se consideram os valores de CAD 180 cm.

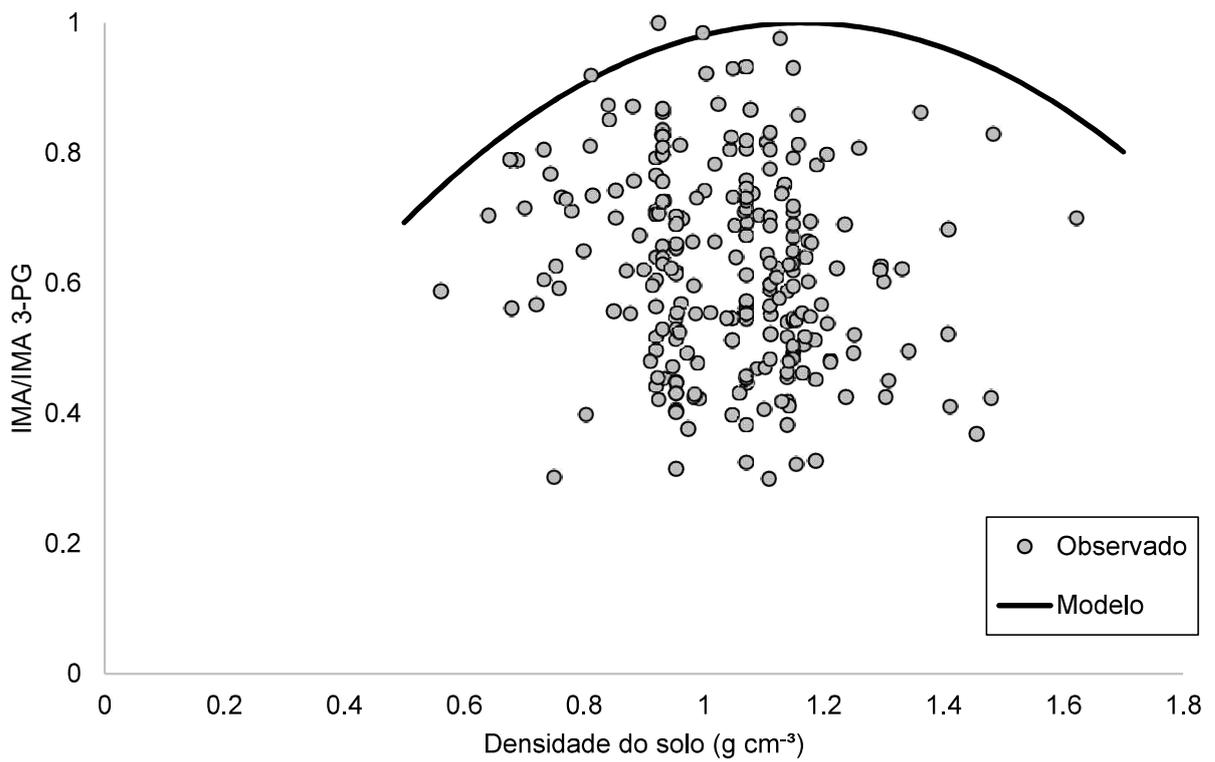


Figura 5. Densidade do solo (Ds) em relação ao incremento médio anual/incremento médio anual do 3-PG (IMA/IMA 3-PG) dos municípios avaliados.

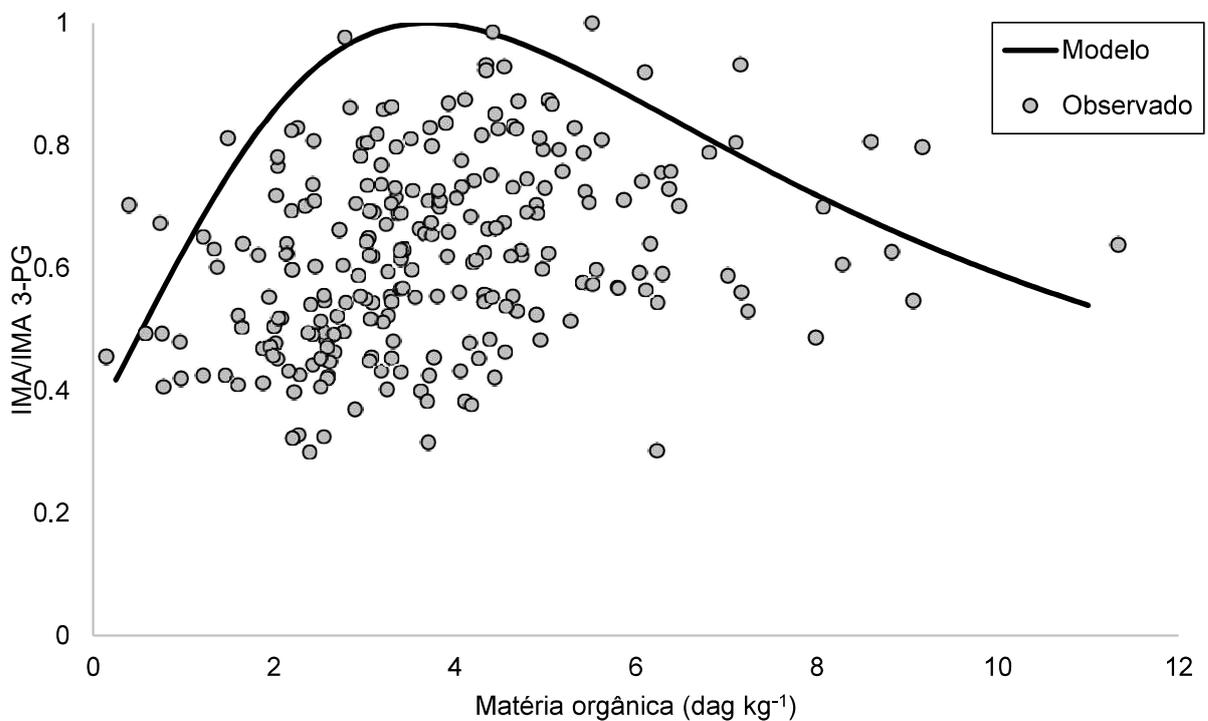


Figura 6. Matéria orgânica em relação ao incremento médio anual/incremento médio anual do 3-PG (IMA/IMA 3-PG) dos municípios avaliados.

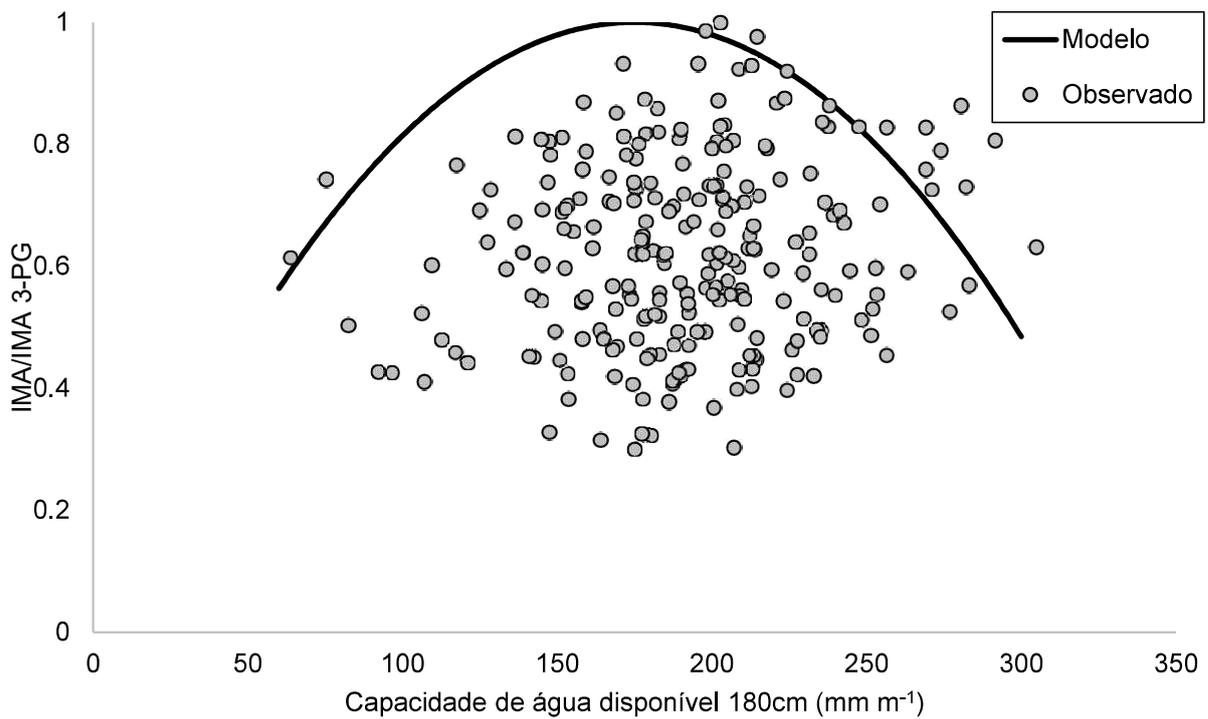


Figura 7. Capacidade de água disponível 180 cm (CAD) em relação ao incremento médio anual/incremento médio anual do 3-PG (IMA/IMA 3-PG) dos municípios avaliados.

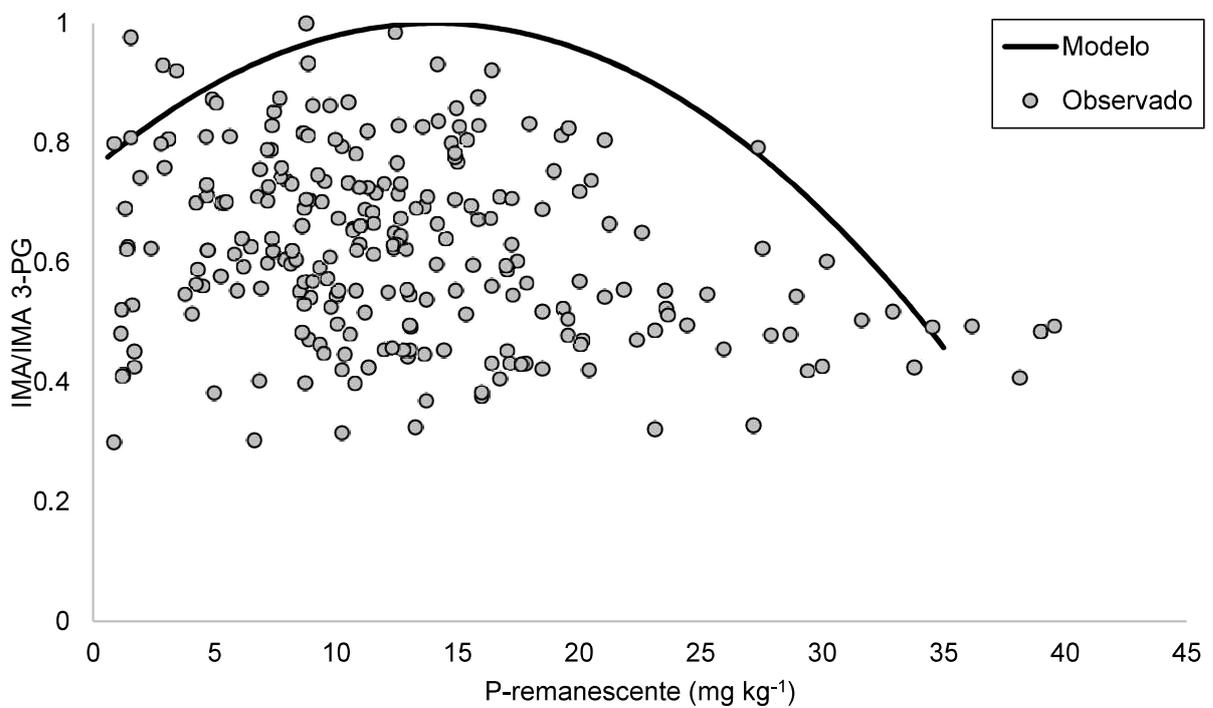


Figura 8. P-remanescente em relação ao incremento médio anual/incremento médio anual do 3-PG (IMA/IMA 3-PG) dos municípios avaliados.

A validação mostrada previamente assegura a aplicabilidade desse novo modelo de parametrização de curvas padronizadas de indicadores de qualidade do solo. Ao invés de se ter valores pré-definidos como se observa em curvas de pontuações padronizada, a presente proposta utiliza os próprios dados de campo para o estabelecimento da curva resposta da variável em relação à produtividade.

Índice de qualidade do solo (IQS)

A análise do índice de qualidade de solo foi iniciada com a avaliação individual de cada variável selecionada na PCA. De início, as curvas respostas da relação IMA/IMA 3-PG de cada variável apresentadas nas Figuras 2, 3, 4 e 5 foram aplicadas a 100 % dos dados. Com os resultados da relação ao incremento médio anual/incremento médio anual do 3-PG (IMA/IMA 3-PG) calculados com as curvas foram propostas classes de qualidade do solo para cada variável selecionada, ao redor de um ponto ótimo (classe boa), ficando três classes abaixo deste ótimo e outras acima. Desta forma, as sete classes de qualidade do solo finais ficaram assim definidas: muito pobre ($< 0,5$); pobre ($0,5 - 0,7$); regular ($0,7 - 0,9$); boa ($0,9 - 1,0$); boa, tendendo a regular ($1,0 - 0,9$); regular, tendendo a pobre ($0,9 - 0,7$); e pobre, tendendo a muito pobre ($< 0,7$).

A Tabela 6 apresenta os resultados da frequência absoluta e relativa das classes de qualidade do solo de cada variável selecionada na PCA.

Tabela 6. Frequência absoluta (n) e relativa (n, %) das classes de qualidade do solo propostas para cada variável, com base no IMA/IMA 3-PG (n=802)

Classe de qualidade do solo	Ds	MO	CAD	P-rem	Ds	MO	CAD	P-rem
	----- n -----				----- % -----			
Muito pobre	2	6	0	0	0,2	0,7	0,0	0,0
Pobre	12	17	2	0	1,5	2,1	0,2	0,0
Regular	73	124	23	115	9,1	15,5	2,9	14,3
Boa	404	301	227	371	50,4	37,5	28,3	46,3
Boa, tendendo a regular	283	268	451	237	35,3	33,4	56,2	29,6
Regular, tendendo a pobre	28	73	81	47	3,5	9,1	10,1	5,9
Pobre, tendendo a muito pobre	0	13	18	32	0,0	1,6	2,2	4,0

Conforme observado na Tabela 6, as áreas amostradas no estudo apresentam de boa a boa tendendo a regular no que se refere à qualidade do solo para as variáveis selecionadas. Dentro dessas duas classes predominaram 85,7% das áreas quando se considera Ds, 70,9% para MO, 84,5% para CAD e 75,9 % para P-rem, entre as categorias boa e regular.

Quando se pensa em qualidade do solo torna-se relevante não apenas avaliar o efeito individual de indicadores, mas a conexão e contribuição integrada de vários deles. Como a parte inicial deste estudo identificou os indicadores mais relevantes, o passo seguinte foi estimar o índice de qualidade do solo (IQS) a partir da equação proposta (Equação 1, página 19) considerando os pesos respectivos de cada variável (Equação 2). Ao se integrar as quatro variáveis selecionadas com os respectivos pesos alcançados pelos resultados na análise de componentes principais tem-se a equação consolidada do índice de qualidade do solo:

$$IQS = 0,2324 \times Ds + 0,2901 \times MO + 0,2179 \times CAD + 0,2597 \times P\text{-rem} \quad (\text{Equação 3})$$

em que:

IQS = índice de qualidade do solo;

Ds = densidade do solo (g cm^{-3});

MO = matéria orgânica (dag kg^{-1});

CAD = capacidade de água disponível 180 cm (mm m^{-1});

P-rem = fósforo remanescente (mg kg^{-1}).

Os resultados obtidos foram normalizados para a escala 0 a 1 e então foram divididos em três classes de índice de qualidade do solo. A Tabela 7 apresenta os resultados da frequência absoluta e relativa de cada classe obtida.

Tabela 7. Frequência absoluta (n) e relativa (n, %) das classes do índice de qualidade do solo (IQS) (n=802)

Índice de qualidade do solo (IQS)	n	n (%)	Média	CV (%)
< 0,80	14	1.7	0,77	3,1
0,80 - 0,90	118	14.7	0,86	3,2
0,90 - 1,00	670	83.6	0,96	2,7

As classes obtidas revelaram altos valores dos índices de qualidade do solo (Tabela 7), sendo que 98,3% das áreas do estudo apresentaram IQS entre 0,8 e 1,0. Desses resultados, pode-se inferir que as áreas de eucalipto conduzidas pela empresa possuem, em sua maior parte, boa qualidade do solo. Valores próximos a um, como o observado, indicam que perdas de produtividade associadas a variáveis mais explicativas (Ds, MO, CAD 180 cm e P-rem) são reduzidas nessas áreas. Vale salientar que, perdas de produtividade associadas aos efeitos da fisiografia não foram consideradas neste estudo, estando o mesmo limitado ao efeito do solo. As diferenças de produtividade e radiação foram identificadas pela alteração de relevo e posição na paisagem em estudos com eucalipto por Ortiz (2003), Facco (2004; 2009) e Rody et al., (2016).

O monitoramento das quatro variáveis que se mostraram como destaques para a qualidade do solo nas áreas estudadas é imprescindível para o acompanhamento e sustentabilidade de altas produtividades a longo prazo. Adicionalmente, essas mesmas variáveis reforçam a necessidade da adoção de práticas de manejo que favoreçam ganhos positivos nas condições de sítio, a exemplo da manutenção de resíduos da colheita, monitoramento e controle da densidade do solo e técnicas que garantam maior porosidade do solo. Para além dessas quatro variáveis indicadas, os demais atributos do solo, que são mais passíveis de alterações por meio de práticas agrônômicas, merecem também ser monitorados e mantidos em condições favoráveis para a sustentabilidade da produtividade do eucalipto.

5. CONCLUSÕES

As variáveis densidade do solo, matéria orgânica, CTC efetiva, capacidade de água disponível e fósforo-remanescente são determinantes para a maior produtividade atingível da cultura do eucalipto na região avaliada.

O modelo proposto de parametrização comprovou sua eficácia para definir curvas padronizadas de resposta de indicadores de qualidade do solo, com base em dados amostrais de povoamentos florestais.

A contribuição combinada das quatro variáveis selecionadas, em níveis adequados, proporciona sítios de elevada qualidade do solo.

REFERÊNCIAS

- Alvarez V., V.H.; Novais, R.F.; Dias, L.E.; Oliveira, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, p. 27- 33, 2000. (Boletim Informativo)
- Andrews, B.; Qian, M.; Valentine, J. Predicting depressive symptoms with a new measure of shame: The Experience of Shame Scale. **British Journal of Clinical Psychology**. Nova Jersey, v. 41, n. 1, p. 29-42, 2002. Doi: <http://dx.doi.org/10.1348/014466502163778>
- Binoti, D.H.B.; Leite, H.G.; Andrade, V.C.L. de; Conceição, M. da; Barros Filho, N. F. de; Pires, L.M.; Pinto, L.O.R.; Paes, T.F.A. Importância relativa das variáveis preditoras no processo de modelagem da produtividade florestal. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v. 9, n. 4, p. 1867-1873, 2022.
- Bone, J.; Barraclough, D.; Eggleton, P.; Head, M.; Jones, D.T.; Voulvoulis, N. Prioritising soil quality assessment through the screening of sites: the use of publicly collected data. **Land Degradation and Development**, Chichester, v. 25, n. 3, p. 251-266, 2012.
- Borges, J.S. **Modulador edáfico para uso em modelo ecofisiológico e produtividade potencial de povoamentos de eucalipto**. Viçosa, UFV, 2012, 81p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 2012.
- Cardoso, D.P.; Silva, M.L.N. Carvalho, G.J.; Freitas, D.A.F. de; Avanzi, J.C. Espécies de plantas de cobertura no condicionamento químico e físico do solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 8, p. 375-382, 2013.
- Carvalho, M.B. de. **Curvas de resposta potencial e faixas de suficiência nutricional para teca (*Tectona grandis* L. f.) no estado do Mato Grosso**. Viçosa, UFV, 2016, 50p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 2016.
- Chaer, G.M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos**. Viçosa, UFV, 2001, 90p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 2001.

- Chaer, G.M.; Tótola, M. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma plantios eucalipto sobre indicadores qualidade solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1381-1396, 2007.
- Doran, J.W. e Parkin, T.B. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F.; Stewart, B.A., eds. **Defining soil quality for a sustainable environment**, Madison, SSSA, p. 1-20, 1994.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Eucalipto. Paraná: EMBRAPA, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto>. Acesso em 11 dez. 2022.
- Facco, A.G. **Modelagem e simulação geoespacial dos componentes do balanço hídrico para plantios de eucalipto em área de relevo ondulado**. Viçosa: UFV, 2004, 111p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2004.
- Facco, A.G.; Ribeiro, A.; Sediyaama, G.C.; Leite, F.P.; Barros, N.F. de. Saldo de radiação em plantios de eucalipto em áreas de relevo ondulado, **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 471-480, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000300009>
- Fernandes, L.V. **Normas e determinação de faixas de suficiência para diagnose foliar com base no crescimento relativo de eucalipto**. Viçosa: UFV, 2010, 97p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 2010.
- Galdino, M.P. **Valores de referência e faixas de suficiência para avaliação do estado nutricional da cultura do eucalipto no Brasil**. Viçosa: UFV, 2015, 66p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 2015.
- Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. Relatório anual IBÁ 2022. Brasília: IBÁ, 2022. 96p. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2022.

- Köppen, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 479p.
- Kurihara, C.H. **Demanda de nutrientes pela soja e diagnose de seu estado nutricional**. Viçosa: UFV, 2004, 113p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 2004.
- Landsberg, J.J.; Waring, R.H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 95, n. 3, p. 209-228, 1997.
- Melo, R.O.; Fonseca, A.A.; Barros, N.F.; Fernandes, R.B.A.; Teixeira, R.S.; Melo, I.N.M.; Martins, R.P. Retention of eucalyptus harvest residues reduces soil compaction caused by deep subsoiling. **Journal of Forestry Research**, v. 33, p. 643-651, 2022.
- Menezes, A.A. **Produtividade do eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo**. Viçosa: UFV, 2005, 110p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 2005.
- Moncada, M.P.; Gabriels, D.; Cornelis, W. Lobo, D. Comparing aggregate stability tests for soil physical quality indicators. **Land Degradation and Development**, Chichester, v. 26, n. 8, p. 843-852, 2013.
- Mukherjee, A.; Lal, R. The biochar dilemma. **Australian Journal of Soil Research**, Australia, v. 52, 217-230, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1071/SR13359>
- Oliveira, A.P. **Índice “S” e suas relações com características físicas de solos e com a produtividade de eucalipto**. Viçosa: UFV, 2010, 64p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 2010.
- Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura - FAO. 2020. Global Forest Resources Assessment 2020 - Key findings. Rome: [s.n.]. Disponível em: <https://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020/en/>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- Ortiz, J.L. **Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2003, 220p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” / Universidade de São Paulo, 2003.

- Rocha, S.P.; Prevedello, J.; Reinert, D.J.; Fleig, F.D.; Vogelmann, E.S.; Soares, J.C.W.; Heinz, B.B. Propriedades físicas do solo e crescimento de eucalipto implantado em diferentes métodos de preparo do solo. **Scientia Forestalis**, São Paulo, v. 43, p. 965-977, 2015.
- Rody, Y.P.; Ribeiro, A.; Oliveira, A.S. de; Leite, F.P. Modeling and simulation of relief influence on eucalyptus: interaction between solar irradiance and productivity, **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 2, p. 319-327, 2016. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622016000200014>
- Santos, H.G. dos et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.
- São José, J.F.B. **Indicadores de qualidade de solo arenoso, matéria orgânica e emissões de gases de efeito estufa afetados pelo manejo dos resíduos da colheita do eucalipto**. Porto Alegre, UFRGS, 2019. 147p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- São José, J.F.B.; Cherubin, M. R.; Vargas, L.K.; Lisboa, B.B.; Zanatta, J.A.; Araújo, E.F.; Bayer, C. A soil quality index for subtropical sandy soils under different Eucalyptus harvest residue managements. **Journal of Forestry Research**, v. 34, p. 243-255, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01507-z>
- Serra, A. P.; Marchetti, M. E.; Vitorino, A. C. T.; Novelino, J. O.; Camacho, M. A. Determinação de faixas normais de nutrientes no algodoeiro pelos métodos ChM, CND e Dris. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 105-113, 2010.
- Silva, V.E.; Nogueira, T.A.R.; Abreu-Junior, C.H.; He, Z.; Buzettic, S.; Laclau, J.P.; Teixeira Filho, M.C.M.; Grilli, E.; Murgia, I.; Capra, G.F. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian Eucalyptus plantations. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v. 455, p. 117-134, jan./mar. 2020.
- Vezzani, F.M.; Mielniczuk, J. Revisão de Literatura: uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 743-755, 2009.
- Wadt, P.G.S. Nutritional status of Eucalyptus grandis clones evaluated by critical level and DRIS methods. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 15-20, 2004.

- Walworth, J. L.; Letzsch, W. S.; Sumner, M. E. Use of boundary lines in establishing diagnostic norms. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50; p. 123-128. 1986.
- Wang, J.; Deng, Y.; Li, D.; Liu, Z.; Wen, L.; Huang, Z.; Jiang, D. e Lu, Y. Soil aggregate stability and its response to overland flow in successive Eucalyptus plantations in subtropical China. **Science of The Total Environment**, v. 807, p. 12, fev. 2022.
- Webb, R.A. Use of the boundary line in the analysis of biological data. **Journal of Horticultural Sciences**, v. 47, p. 309-319, 1972. Doi:10.1080/00221589.1972.11514472
- Wymore, A.W. **Model-based systems engineering: an introduction to the mathematical theory of discrete systems and to the tricotyledon theory of system design**. 1. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993. 710p.
- Zhu, Z.; Wu, L. Fertilization and residue management improved soil quality of eucalyptus plantations. **Forests**, Suíça, v. 14, n. 1570, p. 1-16, 2023. Doi: <https://doi.org/10.3390/f14081570>