

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

**DANIEL PENA PEREIRA**

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL  
DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM  
POVOAMENTO DE EUCALIPTO**

ALEGRE  
2014

DANIEL PENA PEREIRA

**VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL  
DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM  
POVOAMENTO DE EUCALIPTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal, na linha de pesquisa Solos e Nutrição de Plantas.  
Orientador: Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima.

ALEGRE  
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

P436v Pereira, Daniel Pena, 1970-  
Variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo em povoamento de eucalipto / Daniel Pena Pereira. – 2014.  
106 f. : il.

Orientador: Julião Soares de Souza Lima.  
Coorientadores: Nilton Cesar Fiedler; Alexandre Cândido Xavier.  
Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Geologia – métodos estatísticos. 2. Interpolação. 3. Solos – fertilidade. 4. Produtividade florestal. 5. Eucalipto. I. Lima, Julião Soares de Souza. II. Fiedler, Nilton Cesar. III. Xavier, Alexandre Cândido. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. V. Título.

CDU: 63

---

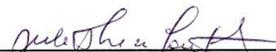
DANIEL PENA PEREIRA

VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO  
SOLO EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal, na área de concentração Solos e Nutrição de Plantas.

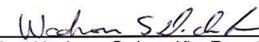
Aprovada em 05 de fevereiro de 2014

COMISSÃO EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima  
Centro de Ciências Agrárias/UFES  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Renato Ribeiro Passos  
Centro de Ciências Agrárias/UFES

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler  
Centro de Ciências Agrárias/UFES

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Wadson Sebastião Duarte da Rocha  
(EMBRAPA Gado de Leite)

À minha família,  
Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Outro sonho se realizou. Sê bendito Deus! Muito obrigado. Pela tortuosidade do caminho, mas, sobretudo pela fé e confiança em sua benevolência, misericórdia e bondade para a superação dos obstáculos e também dos meus erros e imperfeições!

Aos meus pais, Antônio e Teresa, pela dádiva e oportunidade da edificação da vida; pelo suor do seu trabalho, pelo bem querer e pelas longas horas de vigília em nossas vidas. Aos meus irmãos de sangue e de caminhada, Ivan, Antônio Carlos (*in memoriam*), Estevão, Maria Teresa, Agnes e Ângelo pela coparticipação na minha educação e, aos três últimos, pelo esforço de estarem presentes na minha defesa.

À minha família terrena e do coração, Cátia, Rafael e Talita, que suportou todo esse tempo com tolerância minhas intempestividades, muito obrigado e perdão pelas faltas, desde o ingresso nos programas do mestrado até aqui, no doutorado.

Ao meu lado desde os idos do mestrado, agradeço ao Prof. Julião Soares de Souza Lima, pela bela orientação, sempre com boa vontade; pelo acolhimento nos momentos de dificuldade; pelo entendimento e direcionamento na estruturação e desenvolvimento do pensamento que culminou na escrita desta tese.

Também, ao Prof. Nilton Cesar Fiedler, como orientador de outras épocas e agora como coorientador, agradeço pela confiança e presteza na condução dos nossos trabalhos. Pelo apoio incondicional, agradeço aos professores Edvaldo Fialho dos Reis e Marcelo Antônio Tomaz. Aos membros da banca examinadora, o Prof. Renato Ribeiro Passos e o pesquisador Wadson Sebastião D. da Rocha. À secretaria do PPGPV, pela atenção e pelos “cafés” da Madalena e Alessandra.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), professores e funcionários, gratidão pela oportunidade do estudo e formação profissional tanto no mestrado quanto no doutorado. À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao amigo Rafael C. Rodrigues pela oportunidade de ter trabalhado na Aracruz Celulose S.A. e por toda ajuda pessoal nos momentos de dificuldade.

À Fibria Celulose S.A. pelo auxílio financeiro e operacional para a coleta e análise de amostras de solos e à Cristiane C. Meneguzzi pela realização dos inventários florestais.

Que Maria, mãe de Jesus, nos ilumine e que o Divino Mestre nos abençoe sempre!

## DEUS

O Universo é obra inteligentíssima, obra que transcende a mais genial inteligência humana. E, como todo efeito inteligente tem uma causa inteligente, é forçoso inferir que a do Universo é superior a toda inteligência. É a inteligência das inteligências, a causa das causas, a lei das leis, o princípio dos princípios, a razão das razões, a consciência das consciências; é Deus! Deus!... nome mil vezes santo, que Isaac

Newton jamais pronunciava sem descobrir-se!...

É Deus! Deus, que vos revelais pela natureza, vossa filha e nossa mãe. Reconheço-vos eu, Senhor, na poesia da criação, na criança que sorri, no ancião que tropeça, no mendigo que implora, na mão que assiste, na mãe que vela, no pai que instrui, no apóstolo que evangeliza!

Deus! Reconheço-vos eu, Senhor, no amor da esposa, no afeto do filho, na estima da irmã, na justiça do justo, na misericórdia do indulgente, na fé do pio, na esperança dos povos, na caridade dos bons, na inteireza dos íntegros!

Deus! Reconheço-vos eu, Senhor, no estro do vale, na eloquência do orador, na inspiração do artista, na santidade do moralista, na sabedoria do filósofo, nos fogos do gênio!

Deus! Reconheço-vos eu, Senhor, na flor dos vergéis, na relva dos vales, no matiz dos campos, na brisa dos prados, no perfume das campinas, no murmúrio das fontes, no rumorejo das franças, na música dos bosques, na placidez dos lagos, na altivez dos montes, na amplidão dos oceanos, na majestade do firmamento!

Deus! Reconheço-vos eu, Senhor, nos lindos antélios, no íris multicolor, nas auroras polares, no argênteo da Lua, no brilho do Sol, na fulgência das estrelas, no fulgor das constelações!

Deus! Reconheço-vos eu, Senhor, na formação das nebulosas, na origem dos mundos, na gênese dos sóis, no berço das humanidades; na maravilha, no esplendor, no sublime do Infinito!

Deus! Reconheço-vos eu, Senhor, com Jesus quando ora: "Pai nosso que estais nos céus..." ou com os anjos, quando cantam: "Glória a Deus nas Alturas..."

Aleluia!...

*Eurípedes Barsanulpho*  
*Sacramento, 18 de janeiro de 1914*

## RESUMO

Nos anos mais recentes, observa-se aumento na adoção das técnicas de silvicultura de precisão em florestas plantadas no Brasil. Os plantios de eucalipto ocorrem preferencialmente em áreas com baixa fertilidade de solo e conseqüentemente baixa produtividade. Logo, para otimizar ao máximo a produção, é necessário saber o quanto essa cultura pode produzir em cada local (sítio). Objetivou-se aplicar uma metodologia que utiliza técnicas de estatística, geoestatística e geoprocessamento, no mapeamento da variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo cultivado com eucalipto, em área de 10,09 ha, situada no sul do estado do Espírito Santo. Os atributos químicos da fertilidade do solo estudados foram: fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), no ano da implantação do povoamento do eucalipto, em 2008, e três anos após, em 2011. O solo foi amostrado em duas profundidades, 0-0,2 m e 0,2-0,4 m, nos 94 pontos de uma malha regular, com extensão de 33 x 33 m. Os dados foram analisados pela estatística descritiva e, em seguida, pela geoestatística, por meio do ajuste de semivariogramas. Diferentes métodos de interpolação foram testados para produzir mapas temáticos mais precisos e facilitar as operações algébricas utilizadas. Com o auxílio de índices quantitativos, realizou-se uma análise geral da fertilidade do solo, por meio da álgebra de mapas. A metodologia utilizada neste estudo possibilitou mapear a variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo. A análise variográfica mostrou que todos os atributos estudados apresentaram-se estruturados espacialmente, exceto para o atributo P, no Ano Zero (camada 0-0,2 m) e no Ano Três (ambas as camadas). Os melhores métodos de interpolação para o mapeamento de cada atributo químico do solo foram identificados com a ajuda gráfica do Diagrama de Taylor. Mereceram destaque, os modelos esférico e exponencial nas interpolações para a maioria dos atributos químicos do solo avaliados. Apesar de a variação espacial e temporal dos atributos estudados apresentar-se, em média, com pequena variação negativa, a metodologia usada mostrou variações positivas na fertilidade do solo em várias partes da área de estudo. Além disso, os resultados demonstram que os efeitos observados são majoritariamente em função da cultura, uma vez que não foram coletadas amostras de solo em locais adubados. A produtividade do sítio florestal apresentou-se com

tendências semelhantes às variações ocorridas na fertilidade do solo, exceto para o magnésio, que se mostrou com tendências espaciais para suporte de elevadas produtividades, de até  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Além de mostrar claramente as tendências observadas para as variações na fertilidade do solo, a metodologia utilizada confirma um caminho operacional acessível para empresas e produtores florestais para o manejo nutricional em florestas plantadas. O uso dos mapas facilita a mobilização de recursos para melhorar a aplicação de fertilizantes e corretivos necessários.

Palavras-chave: Geoestatística. Métodos de interpolação. Fertilidade do solo. Produtividade florestal. Eucalipto.

## ABSTRACT

In recent years, increased adoption of precision forestry techniques in planted forests in Brazil were observed. The eucalyptus plantations occur preferentially in areas with low soil fertility and hence low productivity. Therefore, to achieve the maximum production, it is necessary to know how this culture can produce at each site. The objective was to apply a methodology that uses statistical techniques, geostatistics and GIS, mapping of spatial and temporal variability of chemical attributes of soil under eucalyptus crop. The chemical attributes of soil studied were: phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg), in the year of the implementation of the stand of eucalyptus, in 2008, and three years later, in 2011. The soil was sampled at two depths, 0-0.2 m and 0.2-0.4 m, at 94 points of a regular grid, with a length of 33 x 33 m. Data were analyzed using descriptive statistics and then geostatistics, by fitting semivariograms. Different interpolation methods were tested to produce thematic maps more accurate and to facilitate algebraic operations used. With the aid of quantitative indices, it has been done a general analysis of soil fertility through the algebra maps. The methodology used in this study allow to map the spatial and temporal variability of soil chemical attributes. Geostatistical analysis showed that all attributes studied presented spatially structured, except for the P attributed in Year Zero (0-0.2 m layer) and in Year Three (both layers). The best interpolation methods for each chemical attribute mapping soil were identified with the help of the Taylor's Diagram. Was highlighted, the spherical and the exponential models in interpolations for most chemical soil attributes evaluated. Despite the spatial and temporal variation of the studied attributes presented, on average, with small negative change, the methodology used showed positive changes in soil fertility in many parts of the study area. Furthermore, the results demonstrate that the observed effects are mainly due to culture, since no soil samples were collected from fertilized sites. The forest site productivity performed with similar trends to change in soil fertility, except for magnesium, which showed good spatial trends to support high yields, up to  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ . In addition to clearly show the trends observed for variations in soil fertility, the methodology used confirms affordable way for businesses operating and forestry producers to nutrient management in planted

forests. The use of maps facilitates the mobilization of resources to improving the application of fertilizers required.

Keywords: Geostatistics. Interpolation methods. Soil fertility. Forest productivity. Eucalyptus.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Comportamento do semivariograma perto da origem e tipos de semivariogramas (Adaptado de Andriotti, 2010).....	21
Figura 2 -	Representação geométrica da relação das estatísticas $E'$ , $\sigma_f$ , $\sigma_r$ e $R$ na aplicação da lei dos cossenos.....	30
Figura 3 -	Construção do Diagrama de Taylor.....	31
Figura 4 -	Mapa de localização da área de estudo no sul do estado, em São José do Calçado, ES.....	39
Figura 5 -	Projeção da área de estudo sobre ortofoto (2007) mostrando a área em pasto (delimitada em laranja). Fonte: Geobases (2013).....	40
Figura 6 -	Projeção da área de estudo sobre imagem (16/2/2010) mostrando o povoamento de eucalipto em destaque. Fonte: Google Earth (2013).....	40
Figura 7 -	Modelo digital de elevação demonstrando os limites da parcela experimental em estudo.....	41
Figura 8 -	Representação gráfica da distribuição anual da precipitação (legenda esquerda) e da temperatura (legenda direita) na área do estudo, em São José do Calçado, ES.....	42
Figura 9 -	Balanço Hídrico calculado para a área experimental, segundo Thornthwaite e Mather (1955), em São José do Calçado, ES; Latitude 20°56'S, Longitude 40°36'W, Altitude 580 m.....	43
Figura 10 -	Pontos de amostragem de solo na área de estudo, em grade regular de 33 m x 33 m, em São José do Calçado, ES.....	45
Figura 11 -	Gráficos boxplot para verificação da ocorrência de <i>outliers</i> dos atributos (dados originais): Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio; gerados para as idades de zero (implantação) e três anos de idade do povoamento de eucalipto. (A): profundidade de 0-0,2 m e (B): profundidade de 0,2-0,4 m.....	58
Figura 12 -	Diagrama de Taylor para o atributo Cálcio na profundidade de 0,2-0,4 m e no Ano Três, demonstrando a possibilidade para escolha gráfica do melhor método de interpolação, dentre os 15 testados. ....	69

Figura 13 - Conferência gráfica do <i>bias</i> para o resultado da análise dos interpoladores, no ambiente Matlab, para o atributo Cálcio (camada 0,2-0,4 m) no Ano Três.....	70
Figura 14 - Diagrama de Taylor para os atributos: Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio; Ano Zero. ( <b>A</b> ): profundidade de 0-0,2 m e ( <b>B</b> ): profundidade de 0,2-0,4 m.....	71
Figura 15 - Diagrama de Taylor para os atributos: Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio; Ano Três. ( <b>A</b> ): profundidade de 0-0,2 m e ( <b>B</b> ): profundidade de 0,2-0,4 m.....	72
Figura 16 - Gráficos <i>boxplot</i> para checar ocorrência de <i>outliers</i> dos atributos (dados interpolados): Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio; gerados para as idades de zero (implantação) e três anos de idade do povoamento de eucalipto. ( <b>A</b> ): profundidade de 0-0,2 m e ( <b>B</b> ): profundidade de 0,2-0,4 m.....	74
Figura 17 - Mapas temáticos sobrepostos para o atributo P: Anos Zero e Três na profundidade 0-0,4 m (valores médios).....	76
Figura 18 - Mapas temáticos sobrepostos para o atributo K: Anos Zero e Três na profundidade 0-0,4 m (valores médios).....	76
Figura 19 - Mapas temáticos sobrepostos para o atributo Ca: Anos Zero e Três na profundidade 0-0,4 m (valores médios).....	78
Figura 20 - Mapas temáticos sobrepostos para o atributo Mg: Anos Zero e Três na profundidade 0-0,4 m (valores médios).....	78
Figura 21 - Mapas temáticos dos níveis de fertilidade do solo (NF) das camadas 0-0,2 m (figura superior) e 0,2-0,4 m.....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Idade, profundidade do sistema radicular (Z) e CAD respectivo.....	43
Tabela 2 -	Valores dos níveis críticos de implantação (plantio) e de manutenção para P, K, Ca e Mg no solo para a produtividade do eucalipto.....	53
Tabela 3 -	Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do solo na área de estudo nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto, dados originais de 94 amostras, na profundidade 0-0,2 m.....	55
Tabela 4 -	Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do solo na área de estudo nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto, dados originais de 94 amostras, na profundidade 0,2-0,4 m.....	56
Tabela 5 -	Estatística descritiva dos atributos químicos do solo avaliados (sem <i>outliers</i> ): Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio, nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto, na profundidade de 0-0,2 m.....	60
Tabela 6 -	Estatística descritiva dos atributos químicos do solo avaliados (sem <i>outliers</i> ): Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio, nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto, na profundidade de 0,2-0,4 m.....	
Tabela 7 -	Resumo descritivo das alterações percentuais das médias dos atributos químicos do solo, três anos após a implantação do povoamento de eucalipto em área de pastagem, em duas camadas de solo (0-0,2 m e 0,2-0,4 m).....	63
Tabela 8 -	Modelos e parâmetros estimados pelos semivariogramas experimentais dos atributos: Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio, nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto e na profundidade de 0-0,2 m.....	65
Tabela 9 -	Modelos e parâmetros estimados pelos semivariogramas experimentais dos atributos: Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio, nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto e na profundidade de 0,2-0,4 m.....	65
Tabela 10 -	Distribuição espacial dos nutrientes P, K, Ca e Mg, na área de estudo (camada 0-0,4 m), conforme níveis críticos relacionados à produtividade sugeridos por Novais <i>et al.</i> (1986), em área e percentuais para o Ano 0 (2008) e Ano 3 (2011).....	84

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 -	Esquema de fertilização e aporte de Ca e Mg feito pelo Programa Nutricalc e para atender demanda de produtividade de $30 \text{ m}^{-3} \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .....	100
Anexo 2 -	Semivariogramas escalonados para o fósforo: (A) = Profundidade 0-0,2 m; (B) = Profundidade 0,2-0,4 m.....	101
Anexo 3 -	Semivariogramas escalonados para o potássio: (A) = Profundidade 0-0,2 m; (B) = Profundidade 0,2-0,4 m.....	102
Anexo 4 -	Semivariogramas escalonados para o cálcio: (A) = Profundidade 0-0,2 m; (B) = Profundidade 0,2-0,4 m.....	103
Anexo 5 -	Semivariogramas escalonados para o magnésio: (A) = Profundidade 0-0,2 m; (B) = Profundidade 0,2-0,4 m.....	104
Anexo 6 -	Modelos interpolados e respectivos parâmetros estatísticos gerados pelos Softwares GS+ e Matlab para os atributos: Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio, nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto, na profundidade de 0-0,2 m.....	105
Anexo 7 -	Modelos interpolados e respectivos parâmetros estatísticos gerados pelos Softwares GS+ e Matlab para os atributos: Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio, nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto, na profundidade de 0,2-0,4 m.....	106

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1. OBJETIVO GERAL.....	18
1.1.1. Objetivos Específicos.....	18
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	19
2.1. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA.....	19
<b>2.1.1. Modelos de semivariogramas</b> .....	21
<b>2.1.2. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo</b> .....	23
2.2. TÉCNICAS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL.....	24
2.2.1. Diagrama de Taylor.....	29
2.3. PRODUTIVIDADE DO SÍTIO.....	32
<b>2.3.1. Atributos químicos do solo em plantios florestais</b> .....	34
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	37
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE COLETA DE DADOS.....	39
3.2. ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO.....	44
<b>3.2.1. Análise Geoestatística</b> .....	47
<b>3.2.2. Análise do desempenho de interpoladores</b> .....	48
<b>3.2.3. Escolha do melhor método de interpolação</b> .....	49
3.3. TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO E ÁLGEBRA DE MAPAS.....	50
<b>3.3.1. Níveis de fertilidade do solo</b> .....	51
<b>3.3.2. Índice de fertilidade do solo</b> .....	52
3.4. PRODUTIVIDADE DO SÍTIO EM FUNÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO.....	53
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	54
4.1. ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO.....	54
<b>4.1.1. Análise geoestatística</b> .....	64
<b>4.1.2. Análise do desempenho de interpoladores</b> .....	68
<b>4.1.3. Escolha do melhor método de interpolação</b> .....	70
4.2. TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO E ÁLGEBRA DE MAPAS.....	75
4.2.1. Níveis de fertilidade do solo.....	75
4.2.2. Índice de fertilidade do solo.....	82
4.3. PRODUTIVIDADE DO SÍTIO EM FUNÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO.....	83
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	87
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	88
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	89
<b>8. ANEXOS</b> .....	99

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil já tem reflorestado cerca de 7.185.943 ha, com várias espécies florestais, sendo que desta área, 70,8 % ou 5.105.246 ha foram plantados com espécies de *Eucalyptus* (ABRAF, 2013). Esse ilustre visitante, introduzido no país desde 1903, surgiu com intenções sustentáveis para suprir necessidade do setor ferroviário e industrial (ANDRADE, 1911). Entretanto, associou-se ao gênero *Eucalyptus*, desde então, ideias antagônicas sempre foram formadas e disseminadas à esmo.

Opiniões prós e contra sempre se fizeram presentes ao redor do cultivo do eucalipto. Sobre esse assunto, foi feita revisão recente a fim de se verificar se o cultivo do eucalipto contribui (ou não) para a melhoria dos atributos químicos dos solos. Foi mostrado que há fatos favoráveis e contrários relacionados ao cultivo do eucalipto e que cumpre agir com cautela e embasamento técnico em discussões acaloradas ou não, proporcionando maior clareza dos desafios que a abordagem sobre o cultivo do eucalipto necessita.

Plantações de eucalipto têm sido avaliadas em relação ao seu impacto nos atributos químicos do solo. Apesar de acreditar que as plantações de eucalipto trazem diminuição desses atributos, podem ser esperadas contribuições positivas em alguns nutrientes do solo. Entretanto, dependendo do uso do solo anterior (floresta nativa ou pastagem) e do tempo de uso, o conteúdo de nutrientes no solo deverá ter comportamentos diferentes.

Nos anos mais recentes, a tendência formada envolve aspectos sobre a silvicultura de precisão (BRANDELERO et al, 2007). Sistemas de informação geográfica (SIG) e técnicas de modelagem estão se tornando ferramentas poderosas no planejamento agroflorestal (BOGNOLA et al., 2010) e em medições dendrométricas (ROSA FILHO et al., 2011). Como essas atividades são inerentes à silvicultura de precisão, dados espaciais contínuos de variáveis específicas estão cada vez mais requisitados. Portanto, a silvicultura de precisão pode contar com facilidades computacionais, permitindo abranger seu planejamento a grandes regiões com agilidade e precisão.

Técnicas de interpolação espacial são essenciais para estimação de valores em lugares não medidos (SILVA et al., 2013). Diversos métodos de interpolação

espacial têm sido desenvolvidos e aplicados a vários campos da ciência do solo, trazendo competitividade e sustentabilidade à atividade rural, podendo-se citar a definição de zonas de manejo de acordo com os nutrientes do solo dentro da área de produção (MORAL et al., 2010; SILVA et al., 2010b; AGGELOPOOULOU et al., 2013). Mas, não basta produzir mapas temáticos, deve haver acurácia nas informações produzidas pela interpolação espacial de modo a garantir que a tomada de decisão esteja baseada em fatos bem representativos.

A variabilidade espacial da fertilidade, devido a atributos químicos, em solos de áreas florestais com eucalipto influencia a produção de madeira. O mapeamento dessas áreas, feito por meio de técnica de interpolação espacial, permite a identificação de sítios de alto e baixo potencial produtivo. Esse mapeamento traz benefícios à silvicultura de precisão, pela adoção de estratégias de manejo localizado, necessárias para melhorar o crescimento das plantas, sem ocasionar impactos negativos aos solos em áreas de produção de eucalipto.

## 1.1. OBJETIVO GERAL

Aplicar uma metodologia que utiliza técnicas de estatística, geoestatística e geoprocessamento, no mapeamento da variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo cultivado com eucalipto, no período que compreende a escolha da área ocupada com pastagem e três anos após a implantação da cultura.

### 1.1.1. Objetivos Específicos

- a) Determinar a variabilidade espacial dos atributos químicos: fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg).
- b) Avaliar e identificar métodos de interpolação no mapeamento dos atributos do solo.

- c) Determinar o nível de fertilidade do solo (NF) e o índice de fertilidade global do (IFS), para a área com uso de pastagem (“Ano Zero”) e com eucalipto (“Ano Três”) considerando álgebra de mapas.
- d) Definir a produtividade do sítio em função do incremento médio anual (IMA) e da fertilidade do solo, considerando os teores de P, K, Ca e Mg, de acordo com os limites propostos por Novais et al. (1986).

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Métodos clássicos de análise estatística de dados geralmente supõem que as realizações das variáveis aleatórias são independentes entre si. Esses métodos assumem a análise da variância e que os dados tenham distribuição normal. A grande maioria dos ensaios de manejo e fertilidade do solo utiliza o método de delineamentos experimentais, considerando independência entre as amostras (VIEIRA et al., 1983).

Geoestatística usa a dependência espacial entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Para problemas que tem capacidade infinita de dispersão, como é o caso de atributos químicos do solo, a geoestatística usa uma restrição estacionária, chamada hipótese intrínseca. Essa hipótese requer apenas a existência e estacionaridade do variograma, sem nenhuma restrição quanto à existência de variância finita (VIEIRA, 2000).

A teoria dos procedimentos adotada em geoestatística está amplamente discutida em Vieira et al. (1983) e Vieira (2000), baseando-se na teoria das variáveis regionalizadas e nos modelos de semivariogramas ( $\gamma$ ). Pela geoestatística, é

possível estudar a distribuição espacial de um determinado elemento ou depósito mineral. Por essa técnica, é possível estimar um teor desconhecido de um elemento na posição  $x$  e em uma distância  $h$  ( $x + h$ ) pela referência de um valor no ponto dado em  $x$ .

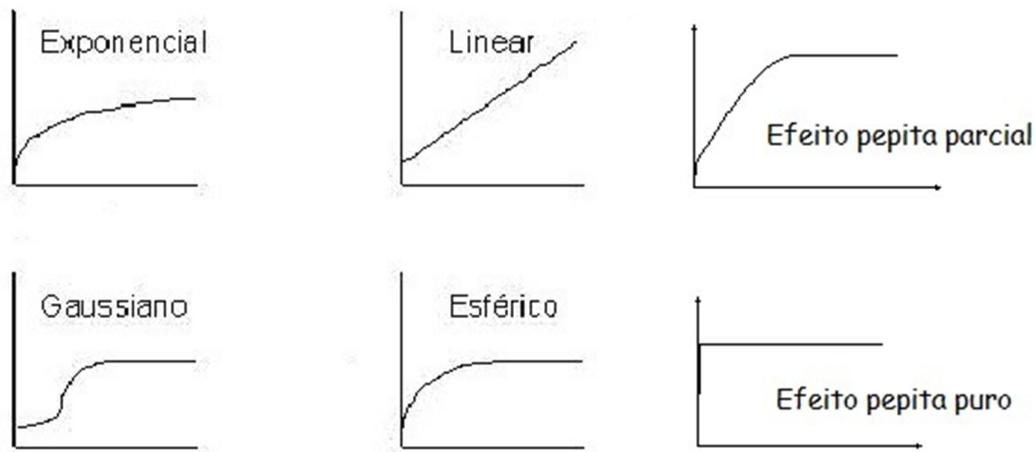
No semivariograma, a distância na qual o valor da semivariância atinge o patamar é chamada de alcance, recebe o símbolo de  $a$ : é a distância limite de dependência espacial entre as amostras de determinado atributo. Medições localizadas a distâncias maiores que  $a$ , tem distribuição espacial aleatória e por isso são independentes entre si. Nos casos em que a semivariância não aumenta com o aumento da distância entre os pontos amostrais, tem-se ausência de dependência espacial, ou seja, o fato conhecido como efeito pepita puro (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989). Para esses dados, tem-se uma distribuição espacial completamente aleatória e a única estatística aplicável é a clássica e o valor médio é a estatística a considerar.

O semivariograma é uma ferramenta utilizada para analisar o grau de dependência espacial das amostras e define os parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados, utilizando a interpolação por Krigagem. O semivariograma experimental -  $\gamma(h)$  - é o valor médio do quadrado das diferenças entre todos os pares de pontos presentes de um determinado atributo na área estudada, tomados a uma distância  $h$  uns dos outros, e não depende dos pontos amostrados, mas do espaçamento entre eles (VIEIRA, 2000).

Quando atributos apresentarem dependência espacial, por outro lado, as amostras separadas por distâncias menores que  $a$ , são correlacionadas umas as outras. Nesse caso, a geoestatística é usada para a análise da variabilidade espacial de determinado elemento e a construção do semivariograma. Uma vez verificada a dependência espacial, a interpolação pela krigagem é realizada para estimar valores para os locais não amostrados, sem viés e com variância mínima (MOTOMIYA, et al., 2011).

É importante conhecer o comportamento dos semivariogramas para valores situados perto da origem, pois existe forte relação entre seu comportamento nessa região e a continuidade e regularidade espacial da variável aleatória representada

(ANDRIOTTI, 2010). Diferentes tipos de semivariogramas são apresentados na Figura 1.



**Figura 1** – Comportamento do semivariograma perto da origem e tipos de semivariogramas (Adaptado de Andriotti, 2010).

### 2.1.1. Modelos de semivariogramas

O semivariograma é, por definição:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (1)$$

e pode ser estimado por meio de:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

em que  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i+h)$ , separados por um vetor  $h$ . O gráfico  $\gamma^*(h)$  versus os valores correspondentes de  $h$ , chamado semivariograma, é uma função do vetor  $h$  (VIEIRA, 2000).

Definindo  $C_0$ : como efeito pepita,  $C_0 + C$ : como patamar e  $a$ : como alcance e  $h$ : como a distância que separa as amostras, basicamente, são quatro funções teóricas que se ajustam aos modelos de semivariograma (VIEIRA et al., 1983):

a) Modelo exponencial

A equação do modelo exponencial é:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - e^{-3\left(\frac{h}{a}\right)} \right] \quad 0 < h < d \quad (3)$$

em que,

$d$  = máxima distância na qual o semivariograma é definido.

O modelo exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto que o modelo esférico o atinge no valor do alcance;

b) Modelo esférico

A equação do modelo esférico é:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 \leq h \leq a \quad (4)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad h > a \quad (4.1)$$

O modelo esférico é aproximadamente linear até cerca de  $1/3 a$ . Passa, então, a uma reta que intercepta o eixo  $y$  em  $C_0$ . Essa reta cruzará o patamar ( $C + C_0$ ) à distância de  $a' = 2/3 a$ ;

c) Modelo linear

A equação do modelo linear é:

$$\gamma(h) = C_0 + \frac{C}{a} h \quad 0 \leq h \leq a \quad (5)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad h > a \quad (5.1)$$

em que,

$C/a$  = coeficiente angular para  $0 \leq h \leq a$ , determinado pela inclinação da reta que passa pelos primeiros pontos de  $\gamma(h)$ ;

$C_0$  = efeito pepita, determinado pela interseção da reta no eixo  $\gamma(h)$ ; e

d) Modelo gaussiano

A equação do modelo gaussiano é:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[ 1 - e^{-3 \left( \frac{h}{a} \right)^2} \right] \quad 0 \leq h \leq d \quad (6)$$

Esse modelo se caracteriza pelo comportamento parabólico próximo à origem e, igualmente no modelo exponencial, atinge o patamar assintoticamente.

### 2.1.2. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo

Em face do conhecimento incipiente sobre tal assunto, no início do século XX, a aceitação dessas hipóteses de independência entre amostras foi grande, sem a necessária verificação. Diante dos conhecimentos estatísticos e recursos computacionais disponíveis na atualidade, o rigor e a precisão científica possibilitam que se conheça profundamente o meio em estudo. A hipótese de independência entre as amostras apenas é satisfeita e verificada na prática, se a amostragem contiver informações geográficas para possibilitar análises geoestatísticas (VIEIRA, 1997).

Existem ferramentas geoestatísticas que podem ser úteis na análise de variabilidade espacial de dados para os quais não existe independência entre amostras (VIEIRA, 2000). Embora os efeitos da variabilidade espacial de atributos do solo sejam uma preocupação antiga (MONTGOMERY, 1913; ROBINSON e LLOYD, 1915; WAYNICK, 1918; WAYNICK e SHARP, 1919; HARRIS, 1920 *apud* VIEIRA et al.,

1983), vários pesquisadores, ainda hoje, dedicam-se a pesquisá-los (GOOVAERTS, 1999; SUN et al., 2003; GALLARDO, 2003; CERRI et al., 2004; CORÁ et al., 2004; LÓPEZ-GRANADOS et al., 2005; GREGO et al., 2006; SOUZA et al., 2009;; MOTOMIYA et al., 2011; BOTTEGA et al., 2013; DALCHIAVON et al., 2013; LIMA et al., 2013a).

Todos os trabalhos, citados anteriormente, tiveram consenso na aplicabilidade da geoestatística no campo da Ciência do Solo. A geoestatística trata o solo como um meio heterogêneo, pois frequentemente o solo apresenta variabilidade espacial em seus atributos. Logo, as análises clássicas, em que as observações são consideradas aleatórias e independentes espacialmente e que tratam o solo como um meio homogêneo, devem ser complementadas por análises espaciais, que levam em consideração as relações entre observações vizinhas e que tratam o solo como um meio diverso (MOULIN e SILVA JÚNIOR, 2003).

É possível notar que uma amostragem ao acaso falharia em apresentar as variações espaciais encontradas. Dessa maneira, quando se amostra ao acaso, esconde-se uma variação que existe e deve ser considerada. Assim, a amplitude de variação revela os problemas que podem ocorrer quando se usa a média dos valores para o manejo da fertilidade do solo relacionada a atributos químicos: em alguns locais da área, a aplicação de fertilizantes, por exemplo, poderá ser inferior à dosagem necessária; em outros, a aplicação poderá ser condizente com as necessidades e, em outros, poderá haver aplicação excessiva como observado por Oliveira et al. (2008).

## 2.2. TÉCNICAS DE INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

A agricultura de precisão, como uma ferramenta para melhor gerenciar o processo produtivo, tem como objetivo o aumento da rentabilidade ao produtor e a redução de impactos ambientais, assegurando competitividade e sustentabilidade à atividade rural. Baseia-se na construção de mapas temáticos que descrevem o

comportamento georreferenciado de variáveis, estimando valores para aqueles locais onde o atributo não foi amostrado.

Essa técnica vem sendo utilizada nas mais diferentes áreas, podendo-se citar: mapeamento e distribuição espacial de pragas (SOARES et al., 2008); mapeamento da produtividade (ROBINSON e METTERNICHT, 2006); controle e aplicação de fertilizantes (FERRAZ et al., 2012; SANCHEZ et al., 2012); aplicação de pesticida (MEROTTO JR et al., 2012); e definição de zonas de manejo (MORAL et al., 2010; SILVA et al., 2010b; AGGELOPOOULOU et al., 2013).

Para o uso de métodos de interpolação, alguns preceitos devem ser levados em consideração: (a) necessidade de amostragem da variável de interesse; (b) com a finalidade de torná-la contínua, faz-se a interpolação, segundo um determinado método; (c) criam-se mapas temáticos em cores ou escalas de cinza ou linhas de contorno (LI e HEAP, 2008). Os variados métodos de interpolação a serem aplicados oferecem diferentes resultados e seu desempenho vai depender de vários fatores, como por exemplo: as características dos dados, o conhecimento técnico e a disponibilidade de *softwares*.

Com grande importância no contexto agrícola, a distribuição espacial dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo afeta o tipo e a eficiência do manejo adotado (REZENDE et al., 2012; SANCHEZ et al., 2012), bem como a intensidade das amostragens do solo, conforme comentado por Coelho et al. (2009). Os atributos químicos do solo são parâmetros adotados para a avaliação da produtividade de sítio das culturas. Em alguns casos, pode ser considerado fator limitante a diversos cultivos, inclusive a silvicultura. No entanto, Robinson e Metternicht (2006) notaram que a eficácia da agricultura de precisão depende da acurácia da interpolação espacial utilizada para definir a variabilidade espacial dos atributos do solo.

Os interpoladores normalmente aplicados na espacialização das variáveis de solo são: os interpoladores geoestatísticos (krigagem), inverso da distância (INV) e *splines* (ROBINSON e METTERNICHT, 2006; SOUZA et al., 2010; OMRAN, 2012). Esses métodos são considerados métodos acurados para interpolação de atributos do solo. Entretanto, ao longo do tempo, não há um único interpolador que possa produzir resultados ímpares para a geração de mapas contínuos de atributos de solos (ROBINSON e METTERNICHT, 2006).

Krigagem é um método de regressão usado em geoestatística para estimar valores de atributos em locais não medidos (VIEIRA, 2000). A teoria da Krigagem foi desenvolvida a partir dos trabalhos de Daniel G. Krige e pelo matemático Matheron, no começo dos anos sessenta. Ela é um processo em que se estimam valores de atributos espacialmente distribuídos, a partir de valores adjacentes interdependentes (VIEIRA et al., 1983).

A krigagem assume que os modelos ajustados aos semivariogramas não são tendenciosos (sem *viés*) e com mínima variância (VIEIRA, 2000). Na krigagem ordinária, para cada ponto o qual não se tem amostra, é estimado um valor usando uma combinação linear ponderada das amostras disponíveis numa dada área de vizinhança determinada. Várias equações lineares são utilizadas para minimizar a variância usando todos os pontos amostrados na vizinhança local do ponto a ser estimado. Levam-se em conta os modelos ajustados nos semivariogramas, as quantidades medidas nos pontos amostrados e a distância entre esses e entre o ponto a ser estimado (GARBIN, 2005).

Os primeiros estudos sobre *splines* foram feitos por Euler (1707-1783), mas no início do século XX Courant (1943) e Shoemberg (1946) formularam estudos mais detalhados (*apud* MENEZES et al., 2010). A interpolação por *splines* é muitas vezes referida como uma interpolação polinomial porque produz resultados semelhantes. Essa técnica é hoje aplicada em áreas tais como: geologia, solos e geofísica.

O desempenho da técnica *splines* tem despertado atenção devido ao fato de seus resultados apresentarem-se bastante suaves. *Splines*, mais comumente usadas, são as cúbicas, ou seja, de ordem 3 (KASTANEK e NIELSEN, 2001). Além disso, são bastante viáveis computacionalmente porque não exigem a resolução de sistemas lineares muito grandes e também evitam certas oscilações indesejadas, que é o que ocorre quando se utilizam polinômios de graus maiores para efetuar a interpolação (COLNAGO e MESSIAS, 2005).

A definição geral de uma função *splines* cúbica segundo Oliveira (1997) é obtida por:

$$J = p_i(\eta) \quad \eta_i < \eta < \eta_{i+1} \quad (7)$$

em que  $J$  (representando o teor de determinado atributo no solo) é uma polinomial de terceiro grau definida por:

$$J = A_i \cdot \left( \eta_i^3 - \eta_i^2 \right) + B_i \cdot \left( \eta_i^2 - \eta_i^1 \right) + C_i \cdot \eta_i + \eta_i \cdot D_i \quad (7.1)$$

Nessa definição, o uso de polinômio de 3ª ordem garante continuidade de função e de continuidade da derivada primeira e da derivada segunda (OLIVEIRA, 1997).

O inverso da distância (INV) é um interpolador local de médias ponderadas. De acordo com esse método, quanto mais distante um ponto observado estiver do estimado, menor será seu peso, ou seja, menor será sua influência sobre o valor de inferência. O INV é considerado simples e de fácil aplicação, no entanto menos acurado que a krigagem, uma vez que não considera o padrão da estrutura da dependência espacial (SILVA et al., 2010a).

$$X_{ip} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^k} x_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^k} \right)} \quad (8)$$

em que:  $x_{ip}$  = atributo interpolado;  $x_i$  = valor do atributo do  $i$ -ésimo ponto de amostragem;  $d_i$  = distância euclidiana entre o  $i$ -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado;  $k$  = potência; e  $n$  = número de amostras.

Estes outros modelos também estão disponíveis com possibilidade de uso na Ciência do Solo: (a) Vizinho mais próximo ou Thiessen; e (b) Regressão Polinomial.

#### a) Vizinho mais próximo: Thiessen

Thiessen é o mapa de vizinhos mais próximo de uma série de pontos, também chamado de Diagrama de Voronoi (BURROUGH e MCDONNELL, 2006). Em casos de falta de casualidade e a correlação espacial entre parcelas experimentais, esse interpolador pode ser usado como opção. O método de análise do vizinho mais próximo é usado, então, para minimizar possíveis interferências da pouca variabilidade do solo na interpretação dos dados (BURROUGH e MCDONNELL, 2006).

$$\hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (9)$$

em que,  $\hat{y}$  = valor estimado.  $n$  = número de pontos.  $y_i$  = a distância do vizinho mais próximo para o ponto  $i$ ; e

#### b) Regressão Polinomial

Regressão polinomial é uma forma de regressão linear em que a relação entre a variável independente  $x$  e a variável dependente  $y$  é modelada como um polinômio de ordem  $n$  (BURROUGH e MCDONNELL, 2006). A interpolação polinomial é a interpolação de um conjunto de dados por um polinômio: dado alguns pontos, encontra-se um polinômio que passa exatamente por esses pontos. Pode ser dos tipos:

##### b.1. Linear

Na regressão linear simples ou de ordem 1, este modelo:

$$y = a_0 + a_1x + \varepsilon \quad (10)$$

em que:  $\varepsilon$  é um erro aleatório não observado com média zero. Nesse modelo, para cada aumento de uma unidade no valor de  $x$ , há a esperança condicional de aumento em  $y$  também por uma unidade;

##### b.2. Quadrática

Em muitas situações, uma relação linear não consegue explicar o fenômeno. Nesse caso, podemos propor um modelo quadrático, ou de ordem 2, desta forma:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \varepsilon \quad (11)$$

Nesse modelo, quando a variável dependente aumenta a partir de  $x$  para  $x + 1$  unidades, as alterações esperadas em  $y$  serão determinadas por  $a_1 + 2a_2$ ; e

##### b.3. Cúbica

Para modelar o valor esperado de  $y$  como um polinômio de ordem 3 ou cúbico, produz-se este modelo de regressão polinomial:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \varepsilon \quad (12)$$

Para avaliar o desempenho de interpoladores é necessário realizar uma validação dos resultados. Uma ou mais estatísticas dos dados são obtidas pelos

procedimentos da tabulação cruzada ou *jack-knifing* para verificar o erro de estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados (VIEIRA, 2000). O procedimento da validação cruzada consiste em eliminar cada um dos pontos amostrados e estimar, por meio de cada método de interpolação, o valor para o local amostrado, com base nos demais pontos.

Quanto à forma, a demonstração e comparação de resultados em formas de longas tabelas e figuras têm sido a apresentação mais comum entre os pesquisadores (BABAK e DEUTSCH, 2009; OMRAN, 2012). Quanto ao conteúdo, analisam-se o desempenho de interpoladores usando basicamente desde somente o resíduo médio (MAZZINI e SCHETTINI, 2009) e o coeficiente de correlação (MAILLARD e COSTA-PEREIRA, 2011); o grau de dependência espacial e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), para o caso de análise geoestatística (LIMA et al., 2008; SANCHEZ et al., 2012); o erro médio, o erro médio quadrático, a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) e a eficiência do modelo (PAVÃO et al., 2012); até análises mais elaboradas usando a média, o desvio-padrão, o RMSE e o coeficiente de correlação (AMORIM et al., 2008; MCROBERTS, 2012).

### **2.2.1. Diagrama de Taylor**

Taylor (2001) criou um simples diagrama para comparação de modelos que estimavam variáveis meteorológicas. Esse diagrama fornece visualmente um resumo destas estatísticas: desvio-padrão, correlação e a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças centralizadas dos dados observados e modelados. O Diagrama de Taylor aumentou a qualidade da discussão sobre o desempenho e a escolha de um determinado modelo, pois, é possível analisar gráfica e simultaneamente uma série de estatísticas dos dados observados e estimados.

Desde sua criação, Taylor (2001) já foi citado em aproximadamente 746 trabalhos científicos (WEB OF SCIENCE, 2014) majoritariamente nas áreas de climatologia, meteorologia e dinâmicas atmosféricas (LAMBERT e BOER, 2001; QUADRO et al., 2012), mas também em topografia (BINGHAM e HAINES, 2006), sensoriamento

remoto (ALBERGEL et al., 2012), hidrologia (GULDEN et al., 2007), agricultura (CHALLINOR et al., 2004) e silvicultura (CÔTÉ et al., 2012).

O Diagrama de Taylor foi a ferramenta utilizada para realizar as comparações entre os diferentes métodos de interpolação testados no *Software Matlab*. Para a construção do Diagrama de Taylor, foram considerados os dados da tabulação cruzada de cada método, ou seja, os dados observados ( $r$ ) e os estimados ( $f$ ). Uma das estatísticas mais utilizadas para observar a qualidade do modelo é a comparação entre duas variáveis ( $f$ ,  $r$ ) pela raiz quadrada da média do quadrado das diferenças ( $E$ ) dado por:

$$E = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_n - r_n)^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

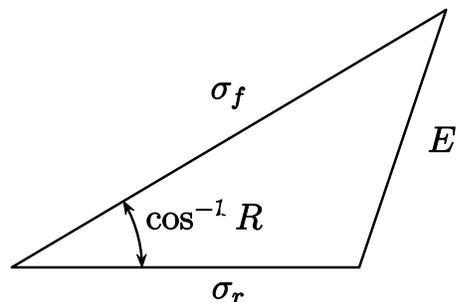
sendo:  $f$ ,  $r$ , os dados estimados e observados; e  $n$  o número de observações.

A raiz quadrada da média do quadrado das diferenças centralizadas ( $E'$ ) corresponde a segunda parte da Equação 13:

$$E'^2 = \sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f\sigma_r R \quad (14)$$

sendo:  $\sigma_f$ , e  $\sigma_r$  os desvios-padrão dos dados estimados e observados, respectivamente;  $R$  o coeficiente de correlação.

A Figura 2 é a representação geométrica da relação das estatísticas  $E'$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_r$  e  $R$  na aplicação da lei dos cossenos pela Equação 14.

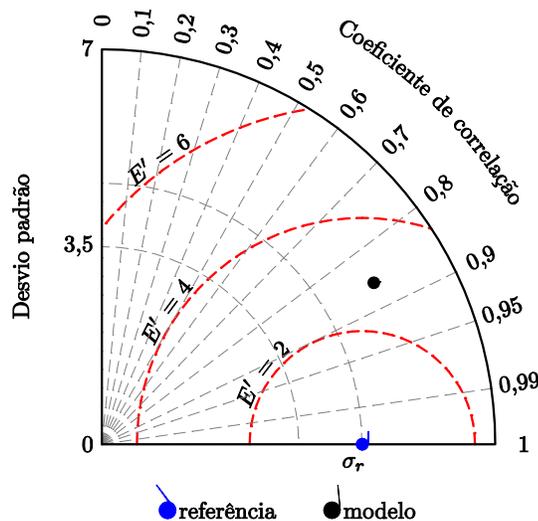


**Figura 2** – Representação geométrica da relação das estatísticas  $E'$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_r$  e  $R$  na aplicação da lei dos cossenos.

Nesta última Equação, encontram-se quatro estatísticas ( $E', \sigma_f, \sigma_r, R$ ) que são utilizadas para estudar o padrão da relação entre  $f$  e  $r$  de forma a orientar se o modelo é um bom estimador (Figura 2). Taylor (2001) propõe a construção de um diagrama que contenha estas quatro estatísticas. Parte-se da similaridade da Equação 14 com a equação da lei dos cossenos, que relaciona um ângulo interno de um triângulo com seus lados ( $a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos \theta$ ).

A construção do Diagrama de Taylor se dá pela representação de  $\frac{1}{2}$  ou  $\frac{1}{4}$  de círculo, sendo este último o mais comum. Os eixos  $x$  e  $y$  têm as medidas do desvio-padrão, sendo que sobre o eixo  $x$  é colocado o valor de ( $\sigma_r$ ). A distância radial da origem à posição representando o modelo é o  $\sigma_f$ . O azimute da origem ao ponto onde se encontra o modelo no gráfico é proporcional a  $R$ . A distância entre o ponto de referência no diagrama ao ponto do modelo é o valor de  $E'$ . Circunferências, com a origem em ( $\sigma_r, 0$ ) e diferentes raios ( $E'$ ) são construídas para apresentar a magnitude de  $E'$ .

A construção desse diagrama é exemplificada na Figura 3.



**Figura 3** – Construção do Diagrama de Taylor, mostrando as quatro estatísticas utilizadas dos dados estimados e observados.

### 2.3. PRODUTIVIDADE DO SÍTIO

A determinação da produtividade dos sítios florestais (local de produção) é um fator básico na condução de povoamentos e no planejamento da produção madeireira de uma empresa florestal (SELLE, 2008). A produtividade de um povoamento florestal é função de uma série de fatores, tais como: capacidade produtiva do material genético, potencial produtivo do lugar (características ambientais), idade e tratos culturais.

A determinação da capacidade produtiva de cada local recebe o nome de classificação de sítios florestais. Para proceder a essa classificação, existem vários métodos já descritos, sejam, por exemplo, o que utiliza o índice de local (CAMPOS e LEITE, 2002), a altura das árvores dominantes, correlacionada com a idade (SELLE et al., 2008) ou a fertilidade do solo (BENATTI, 2013). Assim, a capacidade produtiva dos sítios florestais é um parâmetro mensurável e que possibilita estimar essa capacidade (SELLE, 2008).

Segundo Campos e Leite (2002), os critérios para avaliação dessa qualidade produtiva podem ser definidos em três categorias: (a) avaliação da capacidade produtiva pela vegetação indicadora; (b) por meio da relação da altura dominante e idade, constituindo-se no índice de local; e (c) avaliação por características ambientais locais (aspectos climáticos, edáficos, fisiográficos e bióticos). Dentro dessa última categoria, a fertilidade do solo, devido a atributos químicos, pode representar um método direto de classificação, conforme demonstrado em Novais et al. (1986).

Novais et al. (1986) notaram que a produtividade esperada de plantios de eucalipto se relaciona diretamente com a fertilidade do solo. A produtividade do sítio é refletida em níveis críticos dos nutrientes P, K, Ca e Mg para implantação e manutenção de produtividades entre 10 e 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. A partir do conhecimento dos níveis críticos e dos teores dos nutrientes disponíveis no solo, consegue-se prever a produtividade futura e a adubação necessária para atingir a meta estabelecida.

Barros et al. (1997) e Gava (1997) estudaram a relação do potássio (K) com a biomassa de povoamentos de eucalipto. Eles notaram que o acúmulo de K na biomassa da parte aérea de povoamentos de *Eucalyptus grandis* é crescente, em

função da idade. Além disso, esse nutriente, no solo, afeta diretamente o crescimento do eucalipto devido a essa cultura apresentar maiores respostas de crescimento em função de adubações de manutenção.

Em relação aos teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) no solo, a cultura do eucalipto também tem suas exigências. Conforme descrito em Novais et al. (1986), para Ca e Mg, a situação é semelhante à do K e o acúmulo desses nutrientes na biomassa da parte aérea do eucalipto também cresce com a idade do povoamento. Logo, é necessário propor níveis críticos de manutenção para K, Ca e Mg, além dos exigidos para a implantação, pois os seus teores iniciais no solo podem ser insuficientes para sustentar o crescimento das plantas, à medida que há exaustão desses elementos no solo.

Para fósforo (P), a teoria é mais extensa conforme descrito amplamente por Novais (1999). Esse nutriente é provavelmente o mais estudado em condições tropicais devido aos seus baixos teores trocáveis (abaixo de  $5 \text{ mg dm}^{-3}$ ) na maioria dos solos brasileiros e à elevada capacidade de adsorção de P pelo solo. Entretanto, o fósforo difere em exigências para o eucalipto, havendo grande necessidade durante a implantação e mostrando queda exponencial do seu nível crítico de manutenção ao longo do tempo (NOVAIS et al., 1986).

A sustentabilidade da produtividade de uma floresta é determinada, dentre outros fatores, pelo balanço de nutrientes no sistema solo-planta. Esse balanço representa o reflexo da retirada de nutrientes do solo pelas árvores. Com a intensificação das técnicas de manejo de plantações de eucalipto, e o uso de materiais genéticos melhorados, ocorre elevada demanda de nutrientes pelos sistemas florestais (SANTANA et al., 2002; SANTANA et al., 2008). Logo, exige-se fertilização balanceada, boas práticas de conservação e preparo de solo e manejo apropriado dos resíduos culturais (SILVA et al., 2009; LEITE et al., 2010; LONDERO et al., 2011).

Interessante observar o comportamento diferencial de espécies ou clones frente à capacidade em usar os nutrientes do sistema e convertê-los em produção. Esse comportamento tem explicação em termos fisiológicos e o melhor crescimento de um genótipo pode ser decorrente de sua maior capacidade de absorção de nutrientes do

solo ou de sua maior eficiência em utilizar o nutriente absorvido na produção de matéria seca (GRESPLAN, 1997; BARROS et al., 1990).

Gresplan (1997) observou esse comportamento diferencial de clones ao avaliar a eficiência nutricional de clones de eucalipto no norte do Espírito Santo. Os materiais genéticos com maior produtividade necessitam de um aporte maior de nutrientes, mas o autor encontrou igualmente clones com a mesma extração de nutrientes e que armazenavam grande parte deles na casca, sem refletir em ganhos em produtividade.

Segundo Barros et al. (1990), cada clone tem uma habilidade diferente de uso de um ou outro nutriente absorvido, de acordo com cada parte da planta considerada. A implicação disso é que, no manejo florestal, essa informação permite decidir locais de plantio por clone segundo a capacidade do sítio e o tipo de exploração a ser feito, preservando o máximo de nutrientes no sistema.

Há necessidade, portanto, do gerenciamento dos níveis críticos de nutrientes no solo *versus* a demanda nutricional da espécie para sítios que proporcionam diferentes capacidades produtivas. De qualquer forma, deve-se levar em conta o conteúdo de nutrientes da planta, sabendo-se que, a depender do material genético (ou clone), a maior proporção dos nutrientes do sistema está imobilizada na biomassa da parte aérea das árvores. Assim, a qualidade do local e a produtividade decrescem rapidamente se as técnicas de uso do solo são extrativistas ou inadequadas.

### **2.3.1. Atributos químicos do solo em plantios florestais**

Pesquisadores estudaram a interação de reflorestamentos com eucalipto e o solo, a fim de obter informações sobre possíveis influências desses reflorestamentos no balanço de nutrientes no solo (OLIVEIRA et al., 2008; SILVA et al., 2009; BARRETO et al., 2010; LEITE et al., 2010; EFFGEN et al., 2012). As interações eucalipto-solo mostraram-se com variações distintas para o teor de nutrientes do solo, com reflexos negativos no balanço entrada-saída para o pH e os nutrientes K, Ca e Mg e COM reflexos positivos para P disponível e a matéria orgânica (LEITE et al., 2010).

O reflexo negativo no balanço (entrada-saída) de nutrientes reflete extração e exportação de nutrientes maior do que a preservação ou enriquecimento de nutrientes no sistema. Esse impacto negativo pode ser devido ao comportamento dos materiais genéticos e/ou à reposição insatisfatória de nutrientes pela adubação. Leite et al. (2010) destacam ainda a redução maior no solo do teor de cálcio, corroborando a grande extração desse elemento pelo eucalipto, também detectada nos trabalhos de Santana et al. (2008) e Turner e Lambert (2008).

A exaustão de nutrientes no solo causada por espécies florestais é um problema que pode ocorrer em plantações comerciais. A ciclagem de nutrientes e a reposição desses via adubação estão intimamente ligadas ao manejo na disponibilidade de nutrientes no solo e na produtividade dos povoamentos florestais (MORO et al., 2008). Em povoamentos de *Pinus*, pesquisadores têm relatado processos de declínio e morte de plantas, por causa da redução drástica de nutrientes no solo e da ausência de correções nutricionais ao longo do ciclo (CHAVES e CORRÊA, 2003; CHAVES e CORRÊA, 2005; SILVA et al., 2009).

A dinâmica de absorção de nutrientes do solo por povoamentos de eucalipto é influenciada também pela sua taxa de crescimento. Normalmente, a taxa de absorção é maior nas idades mais jovens do povoamento, atingindo um pico máximo que coincide com a máxima acumulação de biomassa foliar. Após esse período, ocorre redução na taxa de acúmulo de nutrientes, decorrente dos processos de ciclagem de nutrientes ou da tendência de exaustão desses no solo (REIS e BARROS, 1990).

Segundo Lima (1996), apesar de sua característica esclerofítica, adaptado a condições de baixa fertilidade de solo, o eucalipto possui um mecanismo bem desenvolvido de conservação de nutrientes na biomassa. Esse mecanismo é representado pelos grandes ciclos de nutrientes: o geoquímico (entrada e saída no ambiente), o biogeoquímico (sistema solo-planta) e o bioquímico (REIS e BARROS, 1990). Assim, considerando ciclos de cultivo em longo prazo, a manutenção da produtividade de sítios está relacionada com a ciclagem de nutrientes: ocorre fluxo constante de deposição de nutrientes no solo pelo aporte e contribuição de galhos, folhas e cascas das árvores e sua nova assimilação pelas raízes.

Zen et al. (1995) encontraram que, em áreas com reflorestamento com eucalipto, a biomassa que recobre o solo após a colheita aos sete anos foi de 34 a 44 ton ha<sup>-1</sup>, composto pela serrapilheira (20 a 30 ton ha<sup>-1</sup>) e a copa mais o ponteiro das árvores com diâmetro menor que 5 cm (14 ton ha<sup>-1</sup>). A permanência dos restos culturais provenientes da colheita da floresta e a maior quantidade de serrapilheira presentes em locais com cultivo mínimo levam a maiores teores de P, K, Ca e Mg no solo (GATTO et al., 2003). Segundo esses autores, a serrapilheira representou o principal componente de plantações comerciais de eucalipto na manutenção de nutrientes na área.

Alguns autores demonstraram comportamentos diferentes dos nutrientes no solo sob diferentes idades de cultivo com eucalipto sucedendo pastagem (LEITE et al., 2010; EFFGEN et al., 2012). Foi observado que o uso do eucalipto sucedendo pastagem, em longo prazo e em média da camada 0-0,4 m, denotou tendência definida para:

- a) ligeira acidificação;
- b) aumento do teor de fósforo, entretanto com diminuição ao longo do tempo;
- c) quedas nos teores de K, Ca e Mg, refletindo negativamente na soma de cátions básicos (SB) e na saturação de cátions básicos (V); e
- d) incrementos na matéria orgânica.

Com o aumento do teor de MO, espera-se aumentos na acidez (queda de pH) e na CTC (eleva o transporte de cátions pela lixiviação). Paciullo et al. (2014) verificaram resultado parecido, comparando o solo sob a copa de árvores com o solo sob fora da faixa de árvores, em sistemas silvipastoris. Nesse experimento, observou-se que as árvores reduziram as perdas de nutrientes causados por processos, como lixiviação e erosão e aumentaram a disponibilidade de nutrientes pela sua maior liberação na matéria orgânica do solo.

Outros pesquisadores também mostraram comportamentos diferentes dos nutrientes do solo, mas sob usos com diferentes essências florestais (SILVA et al., 2009; LEITE et al., 2010). Nos plantios florestais comparados por eles, houve esquema de adubação proposto, entretanto, conforme ressaltado por Leite et al. (2010), as quantidades não foram suficientes para repor a exportação de nutrientes pela colheita. Observou-se que o uso eucalipto sucedendo formações nativas, em longo

prazo e em média da camada 0-0,1 m, denotou a mesma tendência definida em relação à pastagem para:

- a) ligeira acidificação; e
- b) aumento do teor de fósforo.

Houve decréscimos no teor de matéria orgânica (MO), em relação a áreas naturais não perturbadas (SILVA et al., 2009; LEITE et al., 2010). Esse resultado pode estar relacionado tipo dos resíduos vegetais (serrapilheira), retornados ao solo pelo eucalipto. Entretanto, o preparo de solo e o cultivo de espécies florestais comerciais (plantados) consomem a matéria orgânica original do solo, num primeiro momento, mas, no longo prazo, não consegue estabelecer uma contribuição que suplante a oferta diversa e em grande quantidade de serrapilheira por sistemas florestais nativas, sem intervenção (SILVA et al., 2009).

Os teores de cátions básicos (K, Ca e Mg), que por sua vez influenciaram a CTC e V, mostraram variações diferentes (SILVA et al., 2009; LEITE et al., 2010). Os ambientes nativos possuem características próprias, como no caso do K, em que no cerrado sua presença é muito menor do que em florestas mais exuberantes do bioma Mata Atlântica. Com isso, as variações ocasionadas por plantios de eucalipto sobre esses cátions básicos foram mais positivas em comparação com o Cerrado *strictu sensu* (SILVA et al., 2009) e mais negativas, em comparação com a Mata Atlântica (LEITE et al., 2010).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado a partir de uma área de implantação de contrato de fomento florestal da Fibria Celulose S.A. A espécie plantada nesse contrato foi desenvolvida pela Fibria, procedente de híbridos *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, com mudas clonais (clone 6061). Elas foram cultivadas em espaçamento de 3 x 3 m, totalizando 1.111 plantas por ha, no

preparo manual de solo; no mecanizado, 3,5 x 2,15 m, totalizando 1.333 plantas por ha. O plantio foi feito em dezembro de 2008.

O material genético (clone) selecionado é um clone exigente em termos nutricionais. Logo, foi considerado sensível para responder aos efeitos dos tratamentos usados no estudo anterior (PEREIRA, 2010). O clone 6061 possui comportamento diferencial para ter bom desempenho em condições ótimas de fertilidade do sítio; também, em sentido inverso, responde pouco a condições insatisfatórias ao seu crescimento.

A área de plantio usada na propriedade, para o contrato de fomento, apresentava 17,62 hectares, sendo destes usados 10,09 ha para este estudo. O esquema de fertilização e correção de solo foi calculado segundo estimativa de produtividade de  $30 \text{ m}^{-3} \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  pelo programa Nutricalc e está descrito no Anexo 1. As covas foram feitas manualmente com enxadão e a área com preparo mecanizado, subsolada à profundidade de 0,5 m e com deposição simultânea de fosfato natural reativo.

As adubações de plantio foram feitas distintamente: (a) no plantio nas áreas com preparo de solo manual, o adubo foi misturado à terra da cova no mínimo cinco dias antes do plantio das mudas; e (b) no plantio nas áreas com preparo de solo mecanizado, o adubo foi colocado em duas covetas laterais, distantes 0,15 m das mudas de eucalipto.

As adubações de cobertura foram aplicadas em forma de  $\frac{1}{2}$  lua, no lado de cima das mudas e afastadas cerca de 0,5 m do colo dessas. O calcário foi aplicado a lanço em área total, distribuído homogeneamente.

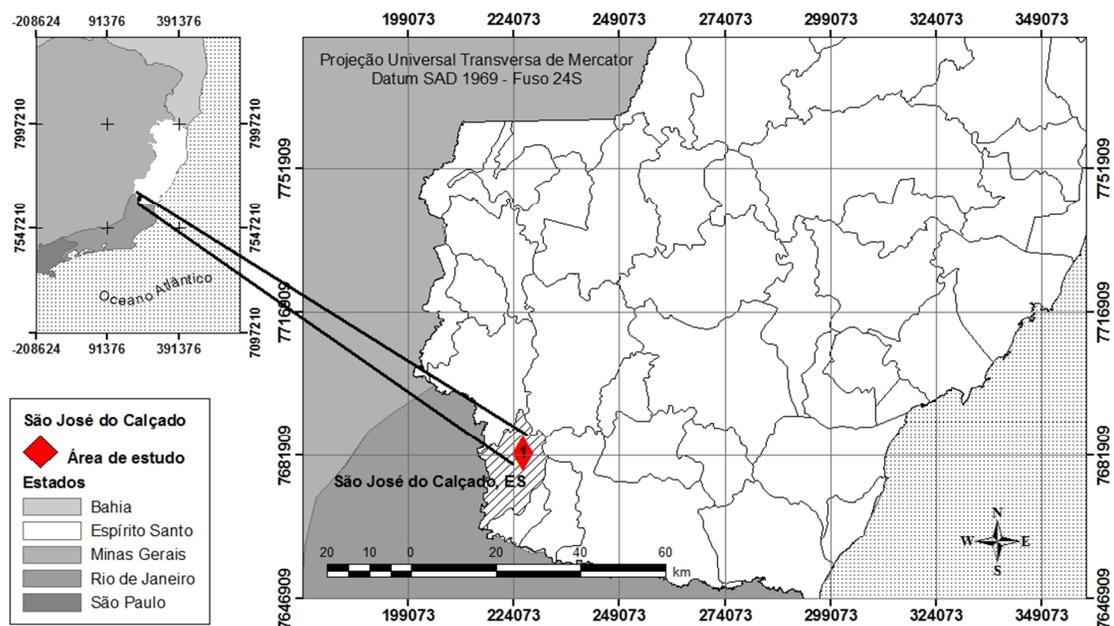
As operações de implantação e manutenção florestal seguiram recomendações técnicas do Programa Produtor Florestal da Fibria, complementadas por Paiva (2007) e Dalbem et al. (2008). Foram incluídos alguns itens com vistas a reduzir custos e impactos ao meio ambiente, tais como aplicação de herbicida em faixas e dose reduzida de herbicida por hectare (ZANUNCIO et al., 1995; PEREIRA et al., 2009).

### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE COLETA DE DADOS

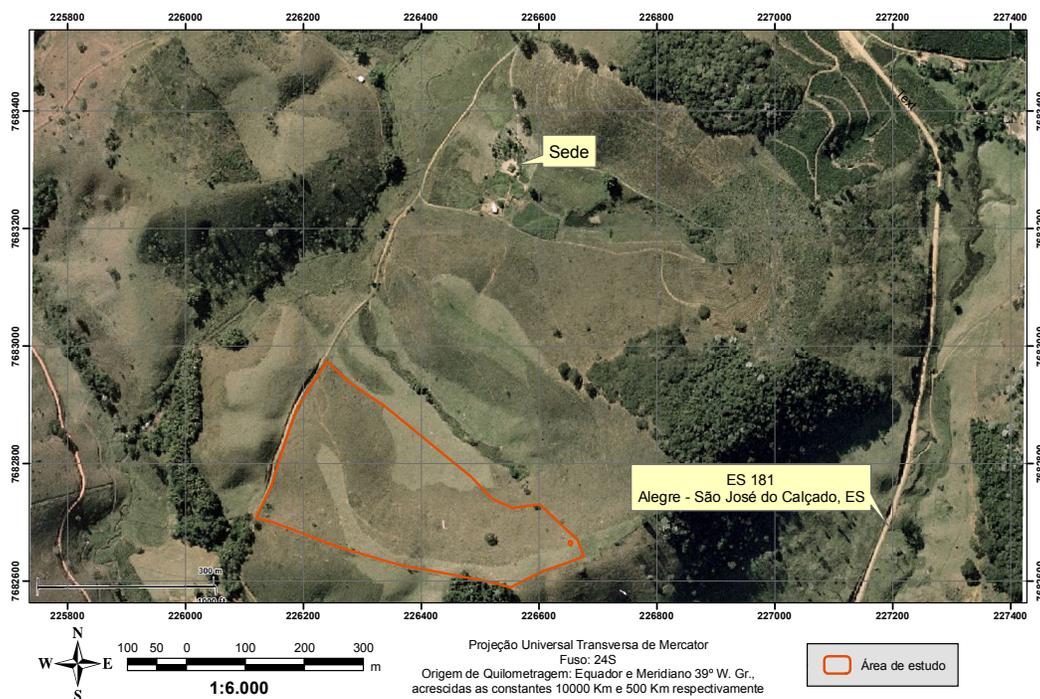
A área de estudo está localizada na metade oeste no sul do Estado do Espírito Santo, município de São José do Calçado e na zona considerada como de terras de temperaturas amenas (LANI, 2008):

- Norte = 7.682.974 m;
- Sul = 7.682.588 m;
- Leste = 226.675 m; e
- Oeste = 226.119 m.

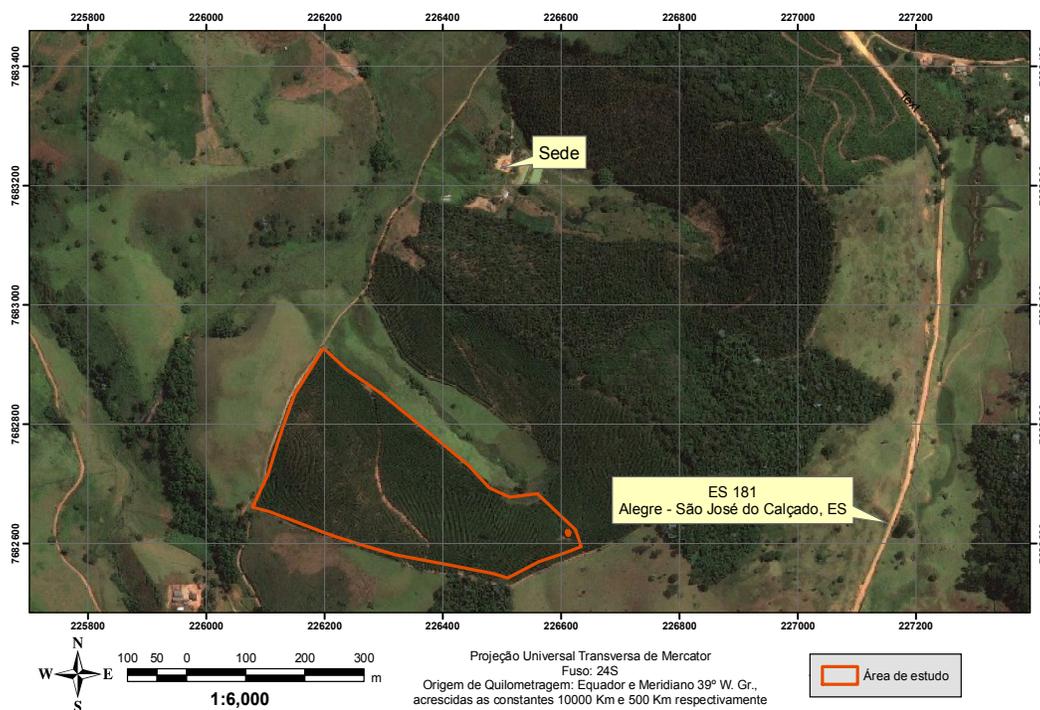
Nas Figuras 4 a 6, é vista a localização da área de estudo em esquema gráfico e com imagens.



**Figura 4** – Mapa de localização da área de estudo no sul do estado, em São José do Calçado, ES.



**Figura 5** – Projeção da área de estudo sobre ortofoto (2007) mostrando a área em pasto (delimitada em laranja). Fonte: Geobases (2013).

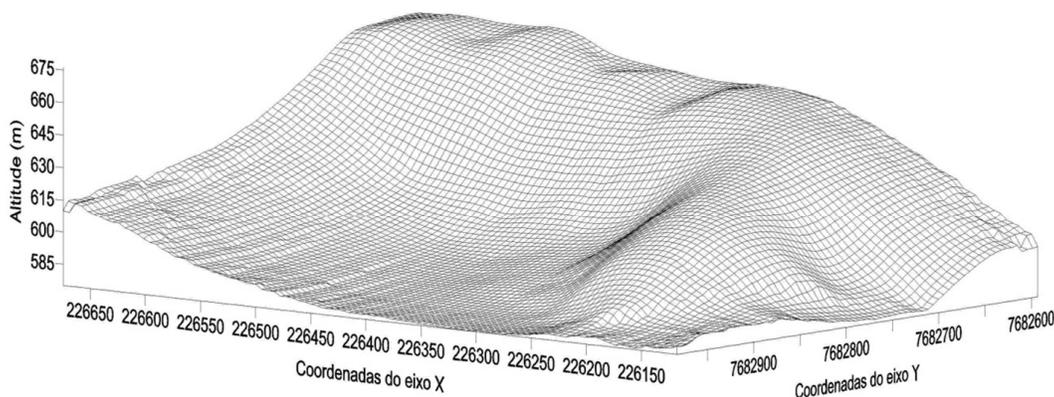


**Figura 6** – Projeção da área de estudo sobre imagem (16/2/2010) mostrando o povoamento de eucalipto em destaque. Fonte: Google Earth (2013).

À época da implantação do povoamento de eucalipto, a área de estudo tinha como principal uso a pastagem. Essa pastagem tinha predominância de gramíneas das espécies *Brachiaria brizantha* Hochst Stapf (capim-braquiária) e *Melinis minutiflora* P. Beauv. (capim-gordura).

Grande parte da área, segundo Pereira (2010), tem face de exposição para o norte (47,2 %). A topografia varia de plana, nas baixadas, a montanhosa nas encostas, com predominância do relevo fortemente ondulado (51,2 %) e montanhoso (34,9 %). O talhão de estudo possui declividade média de 36,7 % e a altitude varia de 577 m a 675 m.

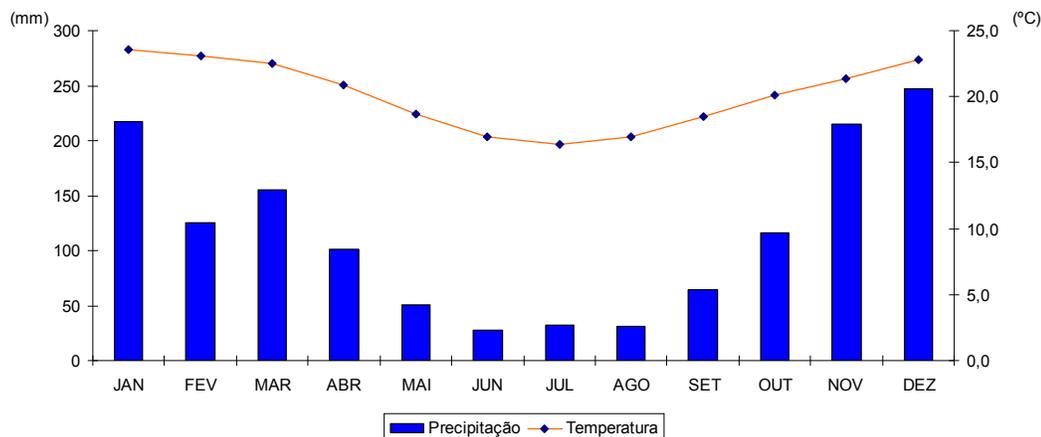
O modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo é apresentado pela Figura 7.



**Figura 7** – Modelo digital de elevação demonstrando os limites da parcela experimental em estudo.

Utilizaram-se os métodos de Köppen e de Thorthwaite e Mather (1955) para caracterizar o clima e a disponibilidade hídrica da região (VIANELLO e ALVES, 1991). Obtiveram-se os valores médios da região do estudo, conforme obtido por Pereira (2010), a partir dos dados climatológicos em bases mensais, oriundos do banco de dados dos postos pluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA), com periodicidade mínima de 20 anos.

A Figura 8 ilustra a distribuição mensal, em termos da média histórica da pluviosidade e da temperatura estimadas para o local da pesquisa.



**Figura 8** – Representação gráfica da distribuição anual da precipitação (legenda esquerda) e da temperatura (legenda direita) na área do estudo, em São José do Calçado, ES.

Pelo método de Köppen, a região de estudo é caracterizada pelo tipo climático *Cwa* – descrito a seguir: C = mesotérmico; w = chuvas nos verões e seca no inverno; a = temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C. A distribuição mensal, em termos da média histórica da pluviosidade (P) e da temperatura (T) do local da pesquisa, apresentou os seguintes dados médios: P = 1380 mm por ano e T = 20,1°C (Figura 8).

Utilizou-se o Modelo de Thornthwaite (1955), aplicado ao balanço hídrico, considerando profundidade de raízes variando com a idade do povoamento e a capacidade de água disponível (CAD) média para solos de textura média = 1,4 mm/cm (PEREIRA et al., 2002). Optou-se por adotar a CAD para o 3º ano, estratificando melhor o crescimento das raízes das árvores, conforme o modelo de Richards usado por Maestri (2003):

$$Z = 287,31 \times \left(1 - e^{-0,19483 \times I}\right)^{1,0219} \quad (15)$$

em que,

Z = profundidade de raízes, cm;

I = idade do povoamento, anos.

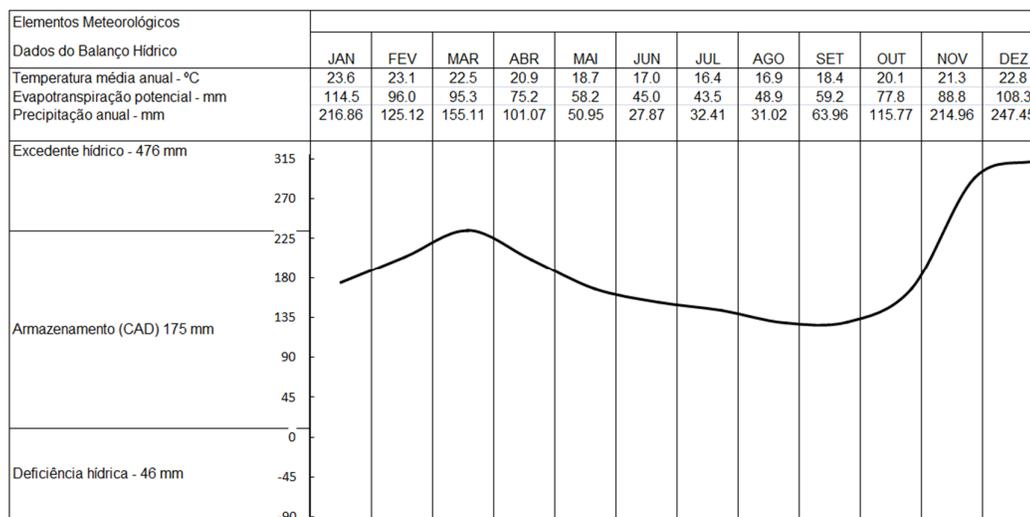
Dessa forma, a profundidade explorada pelas raízes do eucalipto afeta a água armazenada disponível para as mesmas; e a capacidade de armazenamento de água (CAD) foi calculada considerando volume de 1,4 mm/cm de solo (Tabela 1).

**Tabela 1** – Idade, profundidade do sistema radicular (Z) e CAD respectivo

Idade (anos)	Z (cm)*	CAD (mm)**
1	49	68,6
2	90	126
3	125	175

Fonte: \* Maestri (2003); \*\* Pereira et al. (2002).

A Figura 9 ilustra a disponibilidade hídrica do solo, em termos da média histórica da pluviosidade estimada para o local da pesquisa.



**Figura 9** – Balanço Hídrico calculado para a área experimental, segundo Thornthwaite e Mather (1955), em São José do Calçado, ES; Latitude 20°56'S, Longitude 40°36'W, Altitude 580 m.

Conforme o balanço hídrico calculado, o solo apresentou deficiência hídrica média anual de 46 mm e excedente de 476 mm, para a idade de três anos do eucalipto. Entretanto, praticamente não houve estresse hídrico para a cultura. Uma vez que a CAD permaneceu com inexpressiva variação ao longo do ano, não ocorreram períodos com deficiência hídrica acentuada (Figura 9).

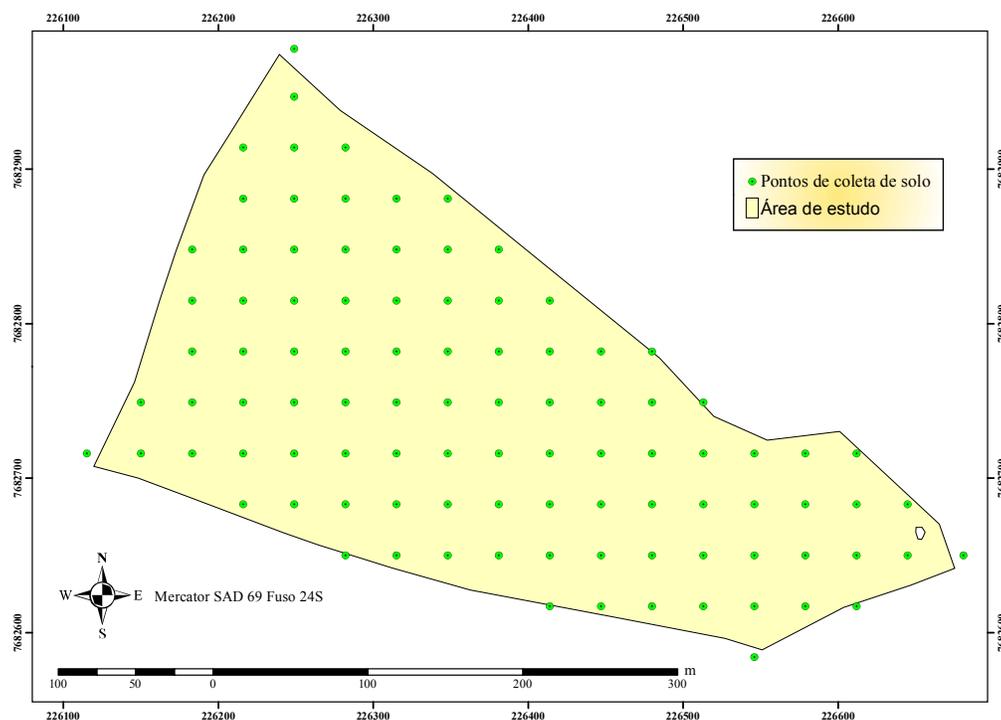
De acordo com a classificação de Thornthwaite e Mather (1955), o clima do local de estudo é:  $B_2 r B'_3 a'$ . Essa classificação significa clima úmido, com pequena deficiência hídrica (nos meses de maio a agosto); mesotérmico, com evapotranspiração potencial anual de 910 mm; e concentração da evapotranspiração potencial no verão (meses de dezembro a fevereiro) igual a 35 %.

Segundo o Mapa geral de solos do Espírito Santo, baseado no mapa exploratório de solos do Projeto RADAMBRASIL (LANI, 2008), o solo predominante é o Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), comumente encontrado na parte montanhosa do Espírito Santo. Esse solo é caracterizado por um horizonte A moderado, profundo, com baixo teor de nutrientes e muito rico em alumínio. As argilas desses solos LVA são de baixa atividade, o que os tornam ainda mais pobres em nutrientes.

### 3.2. ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Dentro da área de estudo, foram demarcados os pontos de amostragem de solo, com auxílio do GPS (Global Position System), distribuídos em grade regular de 33 m x 33 m. Essa grade amostral totalizou 94 pontos e com densidade de 9,6 pontos/ha. Foram coletadas amostras de solo nos anos de 2008 (Ano Zero – uso pastagem) e 2011 (Ano Três – uso eucalipto) para caracterização espacial e temporal de atributos químicos do solo.

A Figura 10 mostra a localização dos pontos de amostragem de solo na área de estudo.



**Figura 10** – Pontos de amostragem de solo na área de estudo, em grade regular de 33 m x 33 m, em São José do Calçado, ES.

Para o Ano Zero, a área na época com uso exclusivo com pastagem, a coleta foi realizada em cada ponto em novembro de 2008, antes do plantio, conforme definido no arranjo da grade regular, criada com auxílio da planilha eletrônica do *Software Excel*<sup>®</sup> e espacializada em *Software SIG*. As amostras foram retiradas nas profundidades de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m, com auxílio de um trado holandês. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e enviadas ao laboratório para análise de fertilidade do solo e análise textural.

Para Ano Três, na área alterada com uso exclusivo para eucalipto, em dezembro do ano 2011, as coletas foram feitas novamente nos mesmos pontos, com auxílio de GPS, nas mesmas profundidades e procedimentos de coleta, analisando-se somente a fertilidade do solo. Houve cuidado, no ponto amostrado, de se evitar locais onde teve deposição de adubos de cobertura. Dessa forma, o efeito observado nas variações da fertilidade do solo será atribuído ao efeito do uso do solo com o eucalipto.

As análises texturais e da fertilidade do solo foram realizadas no Laboratório da Universidade Federal do Espírito Santo, em Alegre-ES (Ano Zero) e no Laboratório Fullin, no município de Linhares-ES, (Ano Três). Para extração e análise dos teores de atributos químicos (pH em água, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), H+Al, capacidade de troca catiônica potencial (CTC), soma de cátions básicos (SB), matéria orgânica (MO), condutividade elétrica (EC), saturação de cátions básicos (V), saturação de alumínio (m)) e da textura (método da pipeta) foram utilizadas as metodologias propostas pela EMBRAPA (1997). Incluiu-se a análise da condutividade elétrica, para que fosse estudada, posteriormente, sua correlação com atributos químicos e/ou físicos. Logo, verificar-se a dependência espacial entre duas ou mais propriedades no espaço.

As análises exploratórias dos dados, análises estatísticas e geoestatísticas foram feitas utilizando o *Software Excel*, o *Software GS+* e o *Software Matlab*. Preliminarmente, foram apresentados todos os dados de fertilidade do solo originais, caracterizando o solo da área de estudo, nos Anos Zero e Três, visualizando-se as medidas de dispersão: média, mediana, mínimo, máximo, desvio-padrão e coeficiente de variação (CV).

Devido à ocorrência de possíveis problemas de amostragem, foi feita análise de *outliers* dos atributos a serem estudados: P, K Ca e Mg, por meio de gráficos *boxplot*, com o objetivo de se verificar se há ou não tendência dos dados e retirá-los quando constatados, utilizando-se o *Software Matlab*. Para visualização de todos os atributos no mesmo gráfico, dividiu-se a matriz de cada atributo pelo valor do desvio-padrão respectivo, para escalonar as unidades e permitir comparações diretas. *Outliers* são aquelas observações atípicas de um atributo plotados 1,5 vezes a diferença interquartílica acima do terceiro quartil e 1,5 vezes a diferença interquartílica abaixo do primeiro quartil. Havendo essa ocorrência, o valor foi retirado dos dados.

Após esse procedimento, procedeu-se à análise exploratória inicial dos dados para cada profundidade e nos Anos Zero e Três (sem *outliers*) – que se constituiu na visualização das medidas de dispersão (média, mediana, mínimo, máximo, desvio-padrão, coeficiente de variação (CV), número de dados válidos, teste t e teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (KS) a 5 % de significância, assimetria e

curtose) para checar as características dos dados amostrais estudados. A proximidade entre as medidas média e mediana foi avaliada segundo a expressão abaixo, em que se considerou proximidade entre as medidas quando  $DIF \leq 10\%$ :

$$DIF_{njh} = \frac{\bar{X}_{njh} - med_{njh}}{\bar{X}_{njh}} \times 100 \quad (16)$$

em que,

$DIF_{njh}$  = diferença percentual entre média e mediana de um determinado atributo “n”, na profundidade “j”, no ano “h”;

$\bar{X}_{njh}$  = média do atributo “n”, na profundidade “j”, no ano “h”; e

$Med_{njh}$  = mediana do mesmo atributo, na profundidade “j”, no ano “h”.

O teste KS permitiu comparar a distribuição dos valores do atributo “a” à distribuição normal. A hipótese nula é que “n” tem uma distribuição normal padrão. A hipótese alternativa é que “n” não tem essa distribuição. O resultado é significativo (sem aderência dos dados à distribuição normal), se o teste rejeita a hipótese nula ao nível de significância de 5 %.

### 3.2.1. Análise Geoestatística

A existência da dependência espacial dos elementos químicos foi verificada pelo semivariograma experimental utilizando o *Software* GS<sup>+</sup>. Esse *Software* realiza ajuste teórico dos semivariogramas pelo método dos mínimos quadrados.

Os estimadores utilizados, o modelo do semivariograma ajustado e a decisão sobre o modelo adotado, ou seja, todo o processo de modelagem foi testado pela validação cruzada (VIEIRA, 2000). Os pontos foram analisados por meio da validação cruzada e geração de dados para análise de regressão entre os dados observados e estimados, ao nível de 99 % de confiança ( $P < 0,01$ ), utilizando-se o *Software* Matlab.

Além dos parâmetros e do coeficiente de determinação do semivariograma ( $R^2$ ), outros indicadores também foram extraídos, tais como: número de pares do primeiro ponto no semivariograma, soma de quadrados do resíduo e dados da validação cruzada (coeficiente de correlação e p-valor). No caso da ocorrência de efeito pepita puro, o atributo não apresenta dependência espacial e as amostras são consideradas independentes, podendo-se atribuir o valor da média para a explicação de sua distribuição na área de estudo.

Os semivariogramas de cada atributo foram escalonados pela variância dos seus respectivos dados para padronização da escala da semivariância (VIEIRA et al., 1991). Dessa maneira, o patamar dos semivariogramas será próximo a 1,0. O escalonamento permitiu comparar semivariogramas de diferentes atributos e nas distintas camadas de solo e anos avaliados. Além disso, por meio da visualização dos semivariogramas, verificou-se ocorrência de similaridade nos padrões de distribuição espacial dos atributos estudados (VIEIRA et al., 1997).

Os semivariogramas foram observados pelos modelos da distribuição isotrópica. Por isotropia, considera-se a variabilidade espacial sendo a mesma em todas as direções da malha experimental.

### **3.2.2. Análise do desempenho de interpoladores**

Após a etapa anterior de verificação de dependência espacial e na tentativa de melhor estimar os atributos químicos para geração de mapas temáticos, foi realizado teste com os seguintes interpoladores normalmente empregados em Ciência do Solo:

- a) Inverso da distância (INV) usando potências de 1 a 6 (BURROUGH e MCDONNELL, 2006);
- b) Análise geoestatística por krigagem ordinária e considerando para a modelagem da semivariância os modelos linear, esférico, exponencial e gaussiano (VIEIRA et al., 1983);

c) Splines (SANDWELL, 1987; AMORIM et al., 2008);

d) Vizinho mais próximo (MCROBERTS, 2012); e

e) Regressão simples usando os modelos polinomiais linear, quadrático e cúbico e tendo como variáveis independentes as coordenadas UTM-SAD69 (fuso 24S) x e y (BURROUGH e MCDONNELL, 2006).

No total, foram 15 métodos de interpolação utilizados, no *Software* Matlab, para avaliar o melhor método de interpolação para cada atributo estudado (P, K, Ca e Mg), em cada profundidade de solo (0-0,2 m e 0,2-0,4 m) e em cada ano avaliado (0 e 3). No caso dos modelos geoestatísticos testados nesse *Software*, o método de ajuste do modelo aos dados (nuvem de pontos) no semivariograma foi feito conforme detalhado em Xavier et al (2010).

Constatando-se a ocorrência de valores atípicos nos valores interpolados, por meio de gráficos *boxplot*, os mesmos foram retirados nesta ordem: (i) valores negativos e (ii) *outliers*, conforme descrito anteriormente no item 3.2, para a matriz gerada de cada atributo. Com esse passo, evitou-se a ocorrência de valores negativos e/ou discrepantes. No caso das amostras serem independentes (valores adotados como a média), para visualização no *boxplot*, não foi feita divisão pelo seu desvio-padrão.

Para dar consistência às operações algébricas realizadas no tópico adiante (Item 3.3), foi adicionado o valor interpolado do atributo, após a retirada dos valores negativos e *outliers*, por meio do método do vizinho mais próximo, no *Software* Matlab (comando *griddata 'nearest'*).

### 3.2.3. Escolha do melhor método de interpolação

O Diagrama de Taylor aumenta a qualidade da discussão sobre o desempenho e a escolha de um determinado modelo, pois, é possível analisar simultaneamente uma série de estatísticas dos dados observados e estimados.

A análise do diagrama de Taylor permite, ainda, flexibilidade na escolha do interpolador que será utilizado. Por exemplo, quando um método não apresentar

todos os melhores resultados nas estatísticas analisadas, esse método será utilizado para espacialização do atributo por ter desvio-padrão menor. Isso garante resultados menos tendenciosos.

No final, constatada a dependência espacial conforme disposto no item 3.2.1 partiu-se para a definição do método de espacialização de cada atributo para ser trabalhado nas etapas seguintes (Item 3.3), comparando-se as estatísticas geradas nos *Softwares* GS<sup>+</sup> e Matlab, na forma de gráficos, escolhendo-se o modelo preferencialmente pelo menor  $\sigma_f$  (desvio-padrão interpolado).

### 3.3. TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO E ÁLGEBRA DE MAPAS

O diagnóstico quantitativo dos atributos da área foi realizado com recursos de geoprocessamento (*Softwares* Matlab e SIG): a álgebra de mapas. Isso possibilitou determinar o grau e a extensão das alterações ocorridas nos atributos químicos do solo estudados (P, K, Ca e Mg), desde a implantação até decorridos os três anos de idade (variabilidade espacial e temporal). A partir desse ponto, foram utilizados os mapas gerados pelo melhor método de espacialização do atributo, definido no item anterior (3.3.3).

No *Software* Matlab, foram feitas as operações algébricas, utilizando-se o formato de matrizes de cada atributo (25230 x 3). Em cada matriz, as duas primeiras colunas foram as coordenadas x e y (UTM SAD69 Fuso 24S) e a terceira, valores do atributo. Para tanto, foram extraídos os resultados das interpolações em uma grade regular com espaçamento de 2 x 2 m, gerando 25.230 pontos com seus respectivos valores de cada atributo: quatro matrizes para cada atributo (camadas 0-0,2 m e 0,2-0,4 m e Anos Zero e Três).

No caso das interpolações feitas no *Software* GS<sup>+</sup> por meio da krigagem por *Point Kriging* com 16 vizinhos e intervalo 1 x 1 m, o mapa interpolado foi exportado no formato *ArctInfo AsciiGrid (.asc)*. Depois desse passo, no SIG foram geradas as matrizes citadas no parágrafo anterior.

### 3.3.1. Níveis de fertilidade do solo

A partir dos dados de distribuição espacial e temporal dos atributos de solo (P, K, Ca e Mg), obtidos pelo melhor método de interpolação, foram geradas matrizes de perdas ou ganhos (MPG) para cada atributo químico do solo entre os Anos Zero e Três, conforme equações adaptadas de Costa (2011), para cada profundidade.

Antes de executar as operações algébricas, o teor de cada nutriente foi conferido percentualmente junto às exigências nutricionais (EN) do eucalipto para atingir o incremento médio anual (IMA 30) de  $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (NOVAIS et al., 1986) e usado na equação. Por exemplo, se o teor de fósforo em uma área de estudo era de  $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$  no tempo zero e passou para  $5,0 \text{ mg dm}^{-3}$  determinado tempo depois, houve aumento de 400 % no seu teor. Entretanto, conforme Novais et al. (1986) e esse exemplo fictício, o aumento de  $4 \text{ mg dm}^{-3}$  satisfaz apenas 5,5 % para as exigências nutricionais em fósforo para a cultura do eucalipto.

$$MPG_{aj} = \left( \frac{Ma_{3j} - Ma_{0j}}{EN} \times 100 \right) \quad (17)$$

em que,

$MPG_{aj}$  = matriz percentual de perdas e ganhos de um determinado atributo “a”, na profundidade “j”;

$Ma_{3j}$  = matriz de variabilidade espacial do atributo “a”, na profundidade “j”, no Ano Três,  $\text{mg dm}^{-3}$  ou  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ;

$Ma_{0j}$  = matriz de variabilidade espacial do mesmo atributo, na profundidade “j”, no Ano Zero,  $\text{mg dm}^{-3}$  ou  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ; e

EN = exigência nutricional acumulada para o eucalipto,  $\text{mg dm}^{-3}$  ou  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e para IMA 30 (NOVAIS et al., 1986).

Em seguida, as informações de perdas e ganhos dos atributos estudados (P, K, Ca e Mg) foram reunidas em uma única matriz, com o valor da soma (Equação 18). Utilizaram-se operações algébricas entre os dados de perdas e ganhos (MPG), obtidos segundo a equação 17, para determinar o grau percentual das alterações nos níveis químicos de fertilidade do solo:

$$NF_j = \sum_{i=1}^n MPG_j \quad (18)$$

em que,

NF = somatório das matrizes de perdas e ganhos (MPG) dos atributos químicos do solo (%), na profundidade “j”, em relação à EN;

MPG = matrizes de perdas e ganhos dos atributos químicos do solo: P, K, Ca e Mg (%), na profundidade “j”, em relação à EN; e

n = número de matrizes utilizadas.

Para criar mapa temático do NF, houve a definição da amplitude de classes, utilizando-se a fórmula interna do comando *reclassify* do SIG denominada *Quantile*, em que cada classe contém um número aproximado de *pixels*. No caso do MPG, os mapas temáticos foram gerados no Matlab e sobrepostos, considerando-se a camada de solo de 0-0,4 m e as variações entre os anos Zero e Três.

### 3.3.2. Índice de fertilidade do solo

Este índice foi calculado em ambiente SIG, utilizando a extensão de área dos respectivos níveis dos mapas (imagens *raster*) de NF (camadas 0-0,2 m e 0,2-0,4 m), gerados pelas matrizes da Equação 2. Utilizou-se o comando *Raster interpolation/NaturalNeighbor* (vizinho mais próximo), para tornar as matrizes em imagem *raster*, com *pixel* (tamanho de célula) de 2 m<sup>2</sup>.

Adotou-se o valor do NF de cada célula ou *pixel* de 2 m<sup>2</sup> para o cálculo do índice de fertilidade do solo (IFS), devido aos atributos químicos, em cada profundidade, entre os diferentes anos estudados, de acordo com a equação abaixo:

$$IFS_j = \frac{\sum_{i=1}^n Vp_i \times A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (19)$$

em que,

IFS = índice de fertilidade do solo, na profundidade “j”, %;

$Vp_i$  = Valor do *pixel* “i” do nível de fertilidade do solo dos mapas, %;

$A_i$  = área do *pixel* “i” do nível de fertilidade do solo, na profundidade “j”, m<sup>2</sup>; e

n = área total do mapa, m<sup>2</sup>.

Assim, o IFS foi calculado *pixel a pixel* e representa o resumo da intensidade ou a extensão com que o conjunto dos valores dos atributos químicos estudados (NF) variou em cada profundidade, ilustrando sua variação global da fertilidade do solo, três anos após a implantação do povoamento do eucalipto na área de pastagem.

### 3.4. PRODUTIVIDADE DO SÍTIO EM FUNÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO

Para atender tecnicamente a recomendação de macronutrientes para a adubação do eucalipto, analisou-se a variabilidade espacial e temporal dos atributos P, K, Ca e Mg. Essa análise foi feita em função das exigências nutricionais do eucalipto para atingir determinados níveis de produtividade (Tabela 2).

**Tabela 2** – Valores dos níveis críticos de implantação (plantio) e de manutenção para P, K, Ca e Mg no solo para a produtividade do eucalipto

Elemento	Nível crítico de implantação	Nível crítico de manutenção				
		Incremento médio anual (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )				
		10	20	30	40	50
P (mg dm <sup>-3</sup> )	60	4,1	4,3	4,3	4,4	4,5
K (mg dm <sup>-3</sup> )	10	30	45	60	75	90
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,2	0,30	0,45	0,60	0,70	0,80
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,05	0,07	0,10	0,13	0,16	0,19

Fonte: Novais *et al.* (1986).

Para o cálculo da quantidade suprida pelo solo, considerou-se que a profundidade efetiva da maioria das raízes absorventes está concentrada na camada 0-0,4 m

(WITSCHORECK et al., 2003; NEVES, 2000). Esse cálculo foi obtido pela média aritmética simples entre os níveis de fertilidade (NF) encontrados nas duas camadas de solo amostradas. O P disponível no Ano Zero, por exemplo, será a média da quantidade de P da primeira camada (0-0,2 m) + P da segunda camada (0,2-0,4 m).

Assim, podem ser percebidas as áreas com níveis de nutrientes em condições para suportar determinadas produtividades. Pode ser verificado, por exemplo, em que classe de produtividade encontra-se a área de estudo e, com isso, determinar a necessidade de adubação a ser realizada para elevá-la a uma classe de produtividade desejada.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO**

Os resultados de análise de solo demonstram que o local de estudo possui baixo teor de nutrientes e com elevado teor de alumínio (Tabelas 3 e 4).

**Tabela 3** – Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do solo na área de estudo nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto, dados originais de 94 amostras, na profundidade 0-0,2 m

Parâmetros	pH	P	K	Ca	Mg	Al	CTC	SB	MO	CE	V	m	Argila	Silte	Areia
<i>Ano Zero</i>	<i>H<sub>2</sub>O</i>	<i>mg dm<sup>-3</sup></i>		<i>cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup></i>					<i>dag dm<sup>-3</sup></i>	<i>dS m<sup>-1</sup></i>	<i>%</i>				
Média	4,8	1,7	17,0	0,36	0,17	1,13	7,78	0,58	2,8	-	7,7	67,5	51,0	5,0	44,0
Mediana	4,75	1,67	16,0	0,27	0,14	1,15	7,75	0,47	2,76	-	6,31	70,7	51,0	5,5	43,6
Mínimo	4,2	1,2	9,0	0,1	0,0	0,5	5,14	0,15	1,8	-	2,2	23,7	31,0	0,0	20,0
Máximo	5,4	2,3	38,0	1,51	0,55	1,6	10,39	1,94	3,7	-	29,0	87,0	75,0	15,0	65,0
Desvio-padrão	0,3	0,2	5,5	0,25	0,12	0,22	1,05	0,34	0,4	-	5,0	13,8	8,0	4,0	8,0
CV (%)	5,3	12,6	32,5	68,2	71,2	20,0	13,5	58,3	14,4	-	64,5	20,5	15,0	73,0	18,0
Parâmetros	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	CTC	SB	MO	CE	V	m	Argila	Silte	Areia
<i>Ano Três</i>	<i>H<sub>2</sub>O</i>	<i>mg dm<sup>-3</sup></i>		<i>cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup></i>					<i>dag dm<sup>-3</sup></i>	<i>dS m<sup>-1</sup></i>	<i>%</i>				
Média	4,8	3,7	20,7	0,27	0,16	6,2	6,7	0,48	2,7	0,16	7,5	-	51,0	5,0	44,0
Mediana	4,8	4,0	19,6	0,18	0,13	6,79	6,71	0,31	2,75	0,15	5,66	-	51,0	5,5	43,6
Mínimo	4,5	2,0	11,7	0,1	0,04	3,1	3,54	0,17	1,7	0,1	1,7	-	31,0	0,0	20,0
Máximo	5,1	6,0	74,3	1,06	0,55	10,4	10,53	1,67	3,7	0,28	28,3	-	75,0	15,0	65,0
Desvio-padrão	0,1	0,8	11,2	0,21	0,12	1,3	1,17	0,3	0,4	0,04	5,4	-	8,0	4,0	8,0
CV (%)	2,4	21,8	54,2	77,6	72,8	20,2	17,5	67,6	14,1	25,1	71,6	-	15,0	73,0	18,0

Nota: pH (acidez ativa); P (fósforo); K (potássio); Ca (cálcio); Mg (magnésio); H+Al (acidez potencial); CTC (capacidade de troca de cátions potencial); SB (soma de cátions básicos); MO (matéria orgânica); CE (condutividade elétrica); V (saturação de cátions básicos); m (saturação de alumínio).

**Tabela 4** – Estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do solo na área de estudo nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto, dados originais de 94 amostras, na profundidade 0,2-0,4 m

<b>Parâmetros</b>	<b>pH</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>CTC</b>	<b>SB</b>	<b>MO</b>	<b>CE</b>	<b>V</b>	<b>m</b>	<b>Argila</b>	<b>Silte</b>	<b>Areia</b>
<b>Ano Zero</b>	<i>H<sub>2</sub>O</i>	---- mg dm <sup>-3</sup> ----		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					dag dm <sup>-3</sup>	dS m <sup>-1</sup>		----- % -----			
Média	4,8	1,4	12,84	0,25	0,07	1,05	7,16	0,37	2,0	-	5,3	75,1	57,0	6,0	37,0
Mediana	4,78	1,39	12,0	0,22	0,06	1,05	6,98	0,33	1,94	-	4,55	76,5	58,1	5,6	36,0
Mínimo	4,3	0,9	6,0	0,0	0,0	0,5	4,45	0,04	1,4	-	0,8	22,6	42,0	0,0	24,0
Máximo	5,5	2,3	37,0	1,25	0,44	1,6	11,35	1,71	3,0	-	28,7	94,1	70,0	17,0	54,0
Desvio-padrão	0,2	0,3	5,37	0,19	0,07	0,21	1,32	0,23	0,3	-	3,8	11,5	6,0	4,0	7,0
CV (%)	4,2	18	41,8	74,8	96,9	20,0	18,4	61,5	16,3	-	70,7	15,3	10,0	67,0	18,0
<b>Parâmetros</b>	<b>pH</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>H+Al</b>	<b>CTC</b>	<b>SB</b>	<b>MO</b>	<b>CE</b>	<b>V</b>	<b>m</b>	<b>Argila</b>	<b>Silte</b>	<b>Areia</b>
<b>Ano Três</b>	<i>H<sub>2</sub>O</i>	---- mg dm <sup>-3</sup> ----		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					dag dm <sup>-3</sup>	dS m <sup>-1</sup>		----- % -----			
Média	4,7	2,3	14,8	0,12	0,08	6,9	7,16	0,24	1,9	0,1	3,6	-	57,0	6,0	37,0
Mediana	4,7	2,0	13,69	0,09	0,07	6,11	7,03	0,19	1,9	0,09	2,77	-	58,1	5,6	36,0
Mínimo	4,5	1,0	7,8	0,01	0,03	4,0	4,25	0,07	1,2	0,04	0,7	-	42,0	0,0	24,0
Máximo	4,9	4,0	50,8	0,48	0,23	10,4	10,47	0,76	2,8	0,17	11,1	-	70,0	17,0	54,0
Desvio-padrão	0,1	0,6	7,4	0,09	0,05	1,3	1,23	0,14	0,3	0,03	2,3	-	6,0	4,0	7,0
CV (%)	2,0	25,1	49,8	77,2	55,1	18,6	17,2	57,7	16,4	28,3	64,6	-	10,0	67,0	18,0

Nota: pH (acidez ativa); P (fósforo); K (potássio); Ca (cálcio); Mg (magnésio); Al (alumínio); H+Al (acidez potencial); CTC (capacidade de troca de cátions potencial); SB (soma de cátions básicos); MO (matéria orgânica); CE (condutividade elétrica); V (saturação de cátions básicos); m (saturação de alumínio).

O solo da área de estudo apresenta camada superficial (0-0,2 m) de textura argilosa, sendo as frações argila, silte e areia com 51 %, 5 % e 44 %, respectivamente (Tabela 3). A camada subsuperficial (0,2-0,4 m) igualmente apresenta textura argilosa, sendo as frações argila, silte e areia com 57 %, 6 % e 37 %, respectivamente (Tabela 4).

Os dados de textura foram repetidos no Ano Três por se considerar que se tratam de características intrínsecas do solo (pouco mutáveis), conforme também adotado por Sanchez et al. (2009). Esses autores relatam que a distribuição de atributos granulométricos está associada ao sistema deposicional de sedimentos, à gênese do solo e aos sistemas de preparo do solo, com alta variabilidade ao longo da vertente, mas baixa ao longo do tempo.

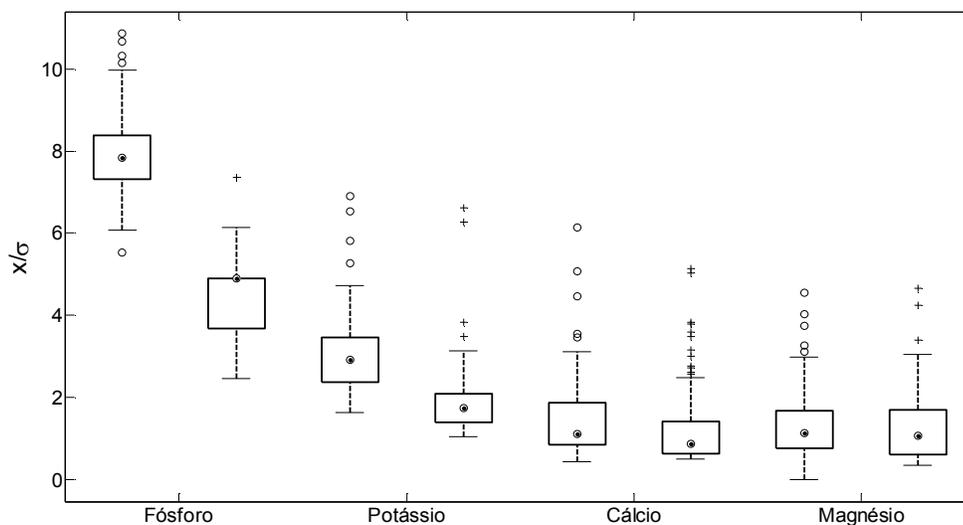
Pelos valores médios das Tabelas 3 e 4, vê-se que, no Ano Zero, o solo apresentou baixo teor de nutrientes de modo geral. Limites críticos do solo ao crescimento das plantas foi indicado por valores médios de MO e de CTC, muito baixos de V(%) e acidez elevada com pH muito baixo entre 4,5 e 5,0 (VENEGAS et al., 1999).

A MO não variou entre os anos avaliados (Ano Zero e Ano Três) e provavelmente esse teor (média de 2,75 e 1,95 dag dm<sup>-3</sup> para as camadas 0-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente) seja efeito das raízes das gramíneas da pastagem (Tabelas 3 e 4). Logo, nesse espaço de tempo, em trabalhos futuros não há necessidade de repetição de sua análise. O eucalipto não afetou negativamente esse atributo e espera-se que, ao longo do tempo, a cultura cause aumento na MO, devido à deposição de folhas e galhos.

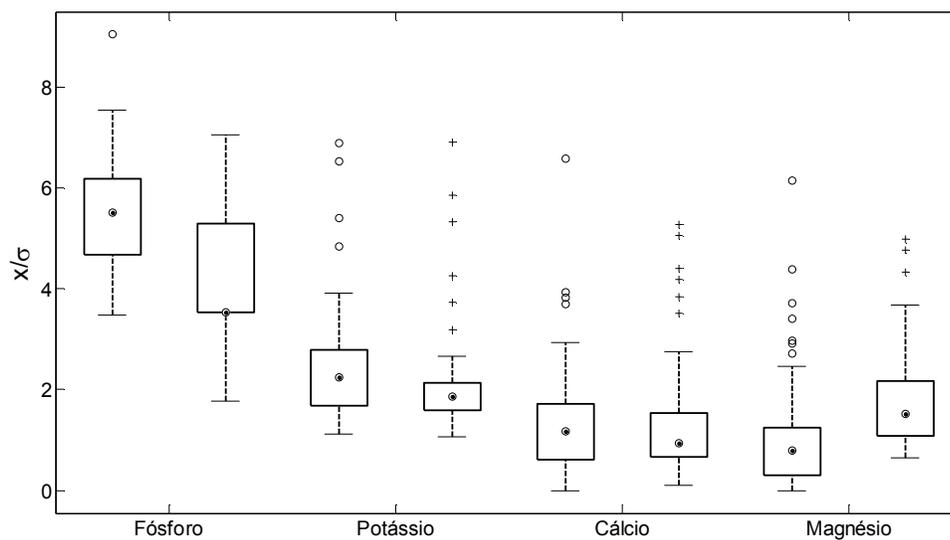
Nota-se que o teor de alumínio, no Ano Zero (1,05 a 1,13 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), foi muito alto em ambas as camadas. O eucalipto é tolerante ao alumínio e cresce bem em solos ácidos, com teor relativamente baixo de cálcio (NEVES et al., 1982). Assim, em condições de campo, os teores encontrados estão abaixo do limite de 88 % da saturação de Al (m), considerado crítico para o eucalipto (SILVA et al., 2004).

A presença de *outliers* afetou fortemente a estatística descritiva. As medidas de posição e dispersão são bastante sensíveis à presença de *outliers*. Logo, a verificação de ocorrência desses deve preceder às demais etapas da análise de variabilidade (MELO FILHO e LIBARDI, 2005; JUNQUEIRA JÚNIOR et al., 2008; SOUZA, 2009).

Por meio da visualização de gráficos *boxplot*, verificou-se a ocorrência de *outliers* para os atributos estudados: P, K Ca e Mg (Figura 11).



(A)



(B)

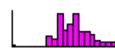
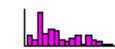
Nota para *outliers*: 'o' Ano Zero e '+' Ano Três; '⊙' = mediana.  $X/\sigma$  = Valor do atributo dividido pelo desvio-padrão respectivo.

**Figura 11** – Gráficos *boxplot* para verificação da ocorrência de *outliers* dos atributos do solo (dados originais): Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio; gerados para as idades de zero (implantação) e três anos de idade do povoamento de eucalipto. (A): profundidade de 0-0,2 m e (B): profundidade de 0,2-0,4 m.

Todos os *outliers* estiveram unilaterais com tendências acima do limite do 3º quartil, exceto o P no Ano Zero e na profundidade 0-0,2 m que apresentou um valor abaixo do Q1 (Figura 11). Souza (2009) também encontrou valores de *outliers* unilaterais acima do Q3 para atributos químicos do solo em área de pastagem e essas ocorrências influenciaram tanto as medidas de posição quanto as de dispersão. Esse fato é corroborado por Silva (2010) em que a presença de *outliers* resultou em maior amplitude dos dados estudados, influenciando análises posteriores.

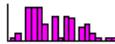
Os resultados dos teores de P, K, Ca e Mg, sem *outliers*, são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

**Tabela 5** – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo avaliados (sem *outliers*): Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio, nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto, na profundidade de 0-0,2 m

Parâmetros	Fósforo		Potássio		Cálcio		Magnésio	
	Ano Zero	Ano Três	Ano Zero	Ano Três	Ano Zero	Ano Três	Ano Zero	Ano Três
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----				----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			
<b>Média</b>	1,67 <sup>b</sup>	3,71 <sup>a</sup>	15,84 <sup>b</sup>	17,47 <sup>a</sup>	0,28 <sup>a</sup>	0,18 <sup>b</sup>	0,13 <sup>a</sup>	0,14 <sup>a</sup>
<b>Mediana</b>	1,63	4,0	15,5	19,55	0,25	0,15	0,12	0,12
<b>DIF (%)</b>	2	-8	2	-12	12	15	5	16
<b>Mínimo</b>	1,29	2,0	0,0	11,73	0,11	0,1	0	0,04
<b>Máximo</b>	2,12	5,0	26,0	23,46	0,58	0,35	0,3	0,36
<b>Desvio-padrão</b>	0,175	0,778	4,232	3,914	0,121	0,061	0,068	0,088
<b>CV (%)</b>	10,5	21,0	26,7	22,4	42,8	34,8	54,1	61,2
<b>Nº de dados</b>	89	92	90	81	81	75	79	89
<b>Frequência</b>								
<b>KS (p&lt;0,05)</b>	ns	*	ns	*	*	*	ns	*
<b>Assimetria</b>	0,42	0,28	-0,14	-0,07	0,79	0,89	0,48	0,99
<b>Curtose</b>	0,08	-0,82	1,37	-1,06	-0,21	-0,09	0,04	0,09

Nota: As médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha, para o mesmo atributo, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste t (P< 0,05). DIF = diferença percentual entre média e mediana (Eq. 14). KS (teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov): \* = P < 0,05; ns = não significativo (aderência à normalidade).

**Tabela 6** – Estatística descritiva dos atributos químicos do solo avaliados (sem *outliers*): Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio, nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto, na profundidade de 0,2-0,4 m

Parâmetros	Fósforo		Potássio		Cálcio		Magnésio	
	Ano Zero	Ano Três	Ano Zero	Ano Três	Ano Zero	Ano Três	Ano Zero	Ano Três
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----				----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			
<b>Média</b>	1,38 <sup>b</sup>	2,26 <sup>a</sup>	12,0 <sup>a</sup>	12,88 <sup>a</sup>	0,23 <sup>a</sup>	0,09 <sup>b</sup>	0,06 <sup>b</sup>	0,08 <sup>a</sup>
<b>Mediana</b>	1,37	2,0	11,0	11,73	0,22	0,08	0,05	0,07
<b>DIF (%)</b>	1	11	8	10	3	15	14	10
<b>Mínimo</b>	0,88	1,0	6,0	7,0	0	0,01	0	0,03
<b>Máximo</b>	1,9	4,0	21,0	19,0	0,56	0,21	0,17	0,17
<b>Desvio-padrão</b>	0,235	0,567	3,525	3,611	0,136	0,047	0,040	0,038
<b>CV (%)</b>	17,0	25,1	29,4	28,0	59,7	50,0	68,5	48,6
<b>Nº de dados</b>	93	94	90	85	90	85	87	90
<b>Frequência</b>								
<b>KS (p&lt;0,05)</b>	*	*	*	*	ns	*	ns	*
<b>Assimetria</b>	0,22	0,69	0,47	0,02	0,5	0,85	0,67	0,95
<b>Curtose</b>	-0,94	0,8	-0,78	-0,96	-0,41	0,04	-0,14	-0,03

Nota: As médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha, para o mesmo atributo, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste t (P < 0,05). DIF = diferença percentual entre média e mediana (Eq. 14). KS (teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov): \* = P < 0,05; ns = não significativo (aderência à normalidade).

Após a retirada dos *outliers*, não houve diferenças em relação à classificação segundo a avaliação de resultados de análises de solo. Em relação aos macronutrientes, continuaram muito baixos teores de P e de Ca e baixos a muito baixos os teores de K e de Mg, de acordo com Venegas et al. (1999). Assim, o solo foi considerado com teores baixos de nutrientes, necessitando de reposições químicas adequadas ao crescimento de cultivos agroflorestais (Tabelas 5 e 6).

Houve forte impacto nas medidas de posição tanto quanto as medidas de dispersão, quando se comparam as Tabelas de 3 a 6. O Mg, por exemplo, apresentava nos dados originais no Ano Zero e na camada 0-0,2 m (Tabela 3), valores da média e mediana 31 e 17 % acima dos valores sem *outliers*, respectivamente (Tabela 5). Já o Ca, 29 e 8 % acima, respectivamente.

A semelhança entre as medidas de posição (média e mediana) dos atributos, também expressa simetria na distribuição dos dados. Por outro lado, valores da média e mediana quando bem próximos, mostram distribuições suficientemente simétricas e com caudas não alongadas para a utilização das técnicas geoestatísticas (JUNQUEIRA JÚNIOR et al., 2008).

Visualiza-se, pela Tabela 5, na camada 0-0,2 m, que os atributos P (Anos Zero e Três), K e Mg (Ano Zero) apresentaram proximidade entre essas medidas, com diferenças menores que 10 % (DIF). Apesar disso, poucos atributos avaliados apresentaram aderência à distribuição normal segundo o KS (não significativo). Ainda assim, baixo CV e a proximidade entre média e mediana, indicativos de simetria em distribuição de dados, não a refletiram para este trabalho, exceto para P no Ano Zero (0-0,2 m).

Em termos médios, houve diferença significativa pelo teste t ( $P < 0,05$ ) para os atributos P, K e Ca, mas o Mg não variou, considerando-se a variação entre os Anos Zero e Três na camada 0-0,2 m (Tabela 5). Com a implantação do povoamento de eucalipto, o solo apresentou alterações, principalmente com reduções nos teores médios para Ca e aumentos para P e K na camada 0-0,2 m. Essas alterações foram devidas ao efeito da cultura sobre os teores de nutrientes do solo, uma vez que as coletas de solo foram feitas fora de áreas com deposição de adubo.

O coeficiente de variação (CV) é adimensional e permite apenas a comparação de valores entre diferentes atributos do solo, fornecendo a dispersão relativa dos dados

em relação à sua média. Entretanto, para o P com baixo CV (Tabelas 5 e 6), houve tendência para que a análise variográfica e interpolação demonstrassem que sua distribuição na área de estudo fosse explicada pela média (visto nos itens 4.2.1 e 4.2.2).

A Tabela 7 ilustra o resumo percentual feito a partir dos teores de nutrientes do solo, desde a implantação do povoamento de eucalipto e três anos após.

**Tabela 7** – Resumo descritivo das alterações percentuais\* das médias dos atributos químicos do solo, três anos após a implantação do povoamento de eucalipto em área de pastagem, em duas camadas de solo (0-0,2 m e 0,2-0,4 m)

<b>Parâmetros</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>
<i>Camada de solo</i>	<i>%</i>			
<i>0-0,2 m</i>	122,2	10,3	-35,7	<i>ns</i>
<i>0,2-0,4 m</i>	63,8	<i>ns**</i>	-60,9	-33,3

Nota: \* [Médias(Ano Três-Ano Zero)/Ano Zero]x100. \*\* indicadas pelo teste t (P < 0,05); *ns* = não significativo. P (fósforo); K (potássio); Ca (cálcio); Mg (magnésio). Fonte: O autor.

Percebe-se que quando houve alterações positivas, elas ocorreram para os atributos P e K. Para o Ca e Mg, foram negativas (Tabela 7), ou seja, a extração de Ca e Mg foi maior que o fornecimento pelo solo e/ou pela reposição ocorrida por meio do calcário aplicado. Entretanto, sob a ótica da ciclagem de nutrientes, o período de tempo avaliado é considerado pequeno para validar as variações ocorridas, inclusive para a mineralização do calcário, aplicado em 2010.

A extração dos nutrientes do solo pelas plantas de eucalipto provocou reduções para Ca e Mg (Tabela 7). Leite et al. (2010) encontraram diminuição nas frações trocáveis de K, Ca e Mg em solos cultivados com eucalipto em comparação com aqueles em pastagem, ao longo de 20 anos. Logo, isso reflete que houve saldo negativo entre a entrada e a saída desses nutrientes no sistema solo-planta, por efeito da cultura do eucalipto (Tabela 7).

Por outro lado, a concentração de P disponível aumentou nas áreas de eucalipto, devido à ciclagem de nutrientes, levando a um saldo positivo de importação e exportação de P no sistema solo-planta. Leite et al. (2010) também relataram incrementos positivos para P, em relação às áreas com pastagem. Logo, programas

de manejo em áreas florestais devem ter atenção nas saídas (colheita) e entradas (ciclagem e adubação) de nutrientes no sistema para garantir produtividade e evitar a exaustão de nutrientes no solo.

Assimetria e curtose indicam a proximidade entre a distribuição de frequências dos dados e a distribuição normal cujos valores são, respectivamente, zero e três (VIEIRA et al., 1997) ou zero para ambas, como é o caso do *software* GS+. Logo, esses dois coeficientes são utilizados, em conjunto, para inferências sobre a função de distribuição normal da variável em estudo. Os atributos químicos do solo estudados tiveram esses coeficientes próximos de zero.

Vale ressaltar, contudo, que uma vez comprovada não aderência à distribuição normal, reforça-se o uso da geoestatística para complementar a estatística clássica. Assim, caso isso ocorra, mas a distribuição seja razoavelmente simétrica, são admitidas as hipóteses necessárias à análise geoestatística. De acordo com Vieira e Lombardi Neto (1995), os cálculos adotados na geoestatística não requerem a análise da distribuição de frequências dos dados estudados, o que necessita é a distribuição não apresentar cauda alongada.

#### **4.1.1. Análise geoestatística**

Os resultados da análise variográfica mostraram que todos os atributos químicos do solo apresentaram dependência espacial nas camadas de solo e anos avaliados, exceção para o atributo fósforo na camada 0-0,2 m e no Ano Três da camada 0,2-0,4 m (Tabelas 8 e 9).

**Tabela 8** – Modelos e parâmetros estimados pelos semivariogramas experimentais dos atributos do solo: Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio, nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto e na profundidade de 0-0,2 m\*

Atributo	Ano	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> + C	a (m)	R <sup>2</sup>	C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> + C) (%)	Npar <sup>1</sup>	SQR	Validação cruzada	
										r	p-valor
Fósforo	0	Efeito pepita puro	1,0	1,0	-	-	-	-	-	-	0,26
	3	Efeito pepita puro	1,0	1,0	-	-	-	-	-	-	0,04
Potássio	0	Esférico	0,39	0,85	80	0,84	46	296	1,85	0,35	***
	3	Esférico	0,31	0,73	83	0,95	42	126	0,05	0,61	***
Cálcio	0	Esférico	0,02	1,0	53	0,56	2	125	9x10 <sup>-7</sup>	0,29	P<0,01
	3	Esférico	0,01	0,90	52	0,51	1	109	2x10 <sup>-7</sup>	0,30	P<0,01
Magnésio	0	Esférico	0,02	1,0	59	0,90	2	124	2x10 <sup>-7</sup>	0,41	***
	3	Esférico	0,02	1,0	55	0,83	2	147	5x10 <sup>-7</sup>	0,43	***

\* Nota: C<sub>0</sub>: efeito pepita; C<sub>0</sub>+C: patamar; a: alcance; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação do semivariograma; Npar<sup>1</sup>: número de pares no primeiro ponto do semivariograma; SQR: soma de quadrados dos desvios; r: coeficiente de correlação. \*\*\* = P<0,001.

**Tabela 9** – Modelos e parâmetros estimados pelos semivariogramas experimentais dos atributos do solo: Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio, nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto e na profundidade de 0,2-0,4 m\*

Atributo	Ano	Modelo	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> + C	a (m)	R <sup>2</sup>	C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> + C) (%)	Npar <sup>1</sup>	SQR	Validação cruzada	
										r	p-valor
Fósforo	0	Exponencial	0,001	1,0	140	0,91	0	304	3x10 <sup>-6</sup>	0,69	***
	3	Efeito pepita puro	1,0	1,0	-	-	-	-	-	-	0,83
Potássio	0	Exponencial	0,24	1,0	62	0,60	24	297	0,629	0,34	***
	3	Exponencial	0,24	0,80	228	0,94	30	265	0,291	0,73	***
Cálcio	0	Exponencial	0,01	1,20	95	1,0	1	289	7x10 <sup>-8</sup>	0,57	***
	3	Exponencial	0,05	1,0	94	1,0	5	257	2x10 <sup>-8</sup>	0,46	***
Magnésio	0	Exponencial	0,33	1,40	520	0,98	24	143	7x10 <sup>-9</sup>	0,55	***
	3	Exponencial	0,58	1,20	311	0,90	48	290	3x10 <sup>-9</sup>	0,40	***

\* Nota: C<sub>0</sub>: efeito pepita; C<sub>0</sub>+C: patamar; a: alcance; R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação do semivariograma; Npar<sup>1</sup>: número de pares no primeiro ponto do semivariograma; SQR: soma de quadrados dos desvios; r: coeficiente de correlação. \*\*\* = P<0,001.

Observou-se que o ajuste dos modelos permitiu construir semivariogramas com patamares bem definidos. Dessa forma, a hipótese intrínseca, que é exigência mínima para a análise geoestatística, foi atendida. Os semivariogramas estão dispostos nos Anexos 2 a 5.

Os valores de  $N_{par}$  demonstram que foi atendido o número suficiente de pares no cálculo do semivariograma, adotado como o mínimo de 30 pares (LANDIM, 2003). Logo, pelas Tabelas 8 e 9, observa-se que o atributo que teve menor  $N_{par}$  foi o Ca no Ano Três (profundidade 0-0,2 m) com 109 pares para o cálculo do primeiro ponto do  $\gamma(h)$ .

Considerando os quatro atributos do solo (P, K, Ca e Mg) nas duas profundidades e nos dois anos de estudo, tem-se que o modelo esférico ajustou-se a 37,5 % dos dados e o exponencial, a 44 %. Outros pesquisadores também encontraram predominância desses modelos para os atributos químicos do solo (GALLARDO, 2003; CERRI et al., 2004; CORÁ et al., 2004; LÓPEZ-GRANADOS et al., 2005; SOUZA et al., 2009).

Observa-se que o atributo P apresentou efeito pepita puro (Ano Zero e Ano Três, camada 0-0,2 m; e Ano Três, camada de 0,2-0,4 m). Mostrando ausência de dependência espacial para distância maior que a menor de amostragem utilizada (33 m) para esse nutriente (Tabelas 8 e 9). Para esses dados, há ausência de dependência espacial, ou seja, as amostras são independentes e pode-se aplicar o valor da média como explicação para sua distribuição na área de estudo.

Motomiya et al. (2011) também encontraram efeito pepita puro para P, tanto em folhas de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) quanto nos teores do solo. O efeito pepita ( $C_0$ ) indica a descontinuidade entre as amostras, ou seja, a variabilidade espacial não detectada durante o processo de amostragem do solo (SIQUEIRA et al., 2008) ou a erros de medição (MOTOMIYA et al., 2011). Logo, para detectar variabilidade espacial de P, devem-se usar espaçamentos menores do que 33 m.

Os atributos Ca e Mg apresentam uma distribuição espacial com um mesmo padrão, ou seja, com alcances próximos variando no intervalo de 52 a 77 m e com ajustes ao modelo esférico. Já na profundidade 0,2-0,4 m, o P e o Ca no Ano Zero apresentaram ajustes ao modelo exponencial e alcances de 88 e 89 m, respectivamente, confirmando o mesmo padrão de distribuição espacial. Essa

similaridade mostra que os três anos de intervalo no estudo não foram suficientemente necessários para alterar os fatores intrínsecos que mantêm o padrão de distribuição dos atributos na área de estudo (Tabelas 8 e 9).

O alcance indica que as amostras se tornam independentes quando amostradas a uma distância maior que o seu valor. Determinações realizadas com maior número de vizinhos no raio do alcance permite que se façam interpolações para espaçamentos menores que os amostrados, com maior precisão na estimação (LIMA et al. 2013b). O alcance é, ainda, uma referência para o planejamento de coleta de solo e pode ajudar na definição dos procedimentos e malha de amostragem (MOTOMIYA et al., 2011).

O alcance foi ligeiramente maior no Ano Três quando comparado com o Ano Zero (Tabelas 8 e 9). Esse fato vai ao encontro dos resultados de outros estudos, que após passar por manejo, como foi o caso, com preparo e a adubação, o solo tem tendência a ser homogeneizado, fazendo com que apresente maior continuidade espacial na área (CORÁ et al., 2004; MOTOMIYA et al., 2011). Essa maior continuidade espacial também é indicada pela fraca dependência espacial, afetada por propriedades extrínsecas do solo (CAMBARDELLA et al., 1994), o que significa que elas são dependentes do manejo (MOTOMIYA et al., 2011).

Quanto menor a proporção do  $C_0$  em relação ao patamar do semivariograma, maior a dependência espacial apresentada pelo atributo (CAMBARDELLA et al., 1994). De acordo com essa definição, a maioria dos atributos apresentou forte dependência espacial, com proporção menor do que 25 %, principalmente Ca (Tabelas 8 e 9). Esses resultados permitem concluir que, houve maior continuidade do fenômeno, menor variância da estimativa e maior confiança no valor estimado, também relatados por Lima et al. (2006).

O valor médio daquela proporção [ $C_0 / (C_0 + C)$ ] para os semivariogramas foi de 17 % (Tabelas 8 e 9). Isso indica baixo efeito pepita e, por conseguinte, boa proporção de variância amostral, que é explicada pela variância espacialmente estruturada. Logo, o desenho da amostragem proporcionou a explicação de, em média, 83 % da variância total da amostra (CERRI et al., 2004).

López-Granados et al. (2005), analisando a variabilidade de atributos do solo em um campo com rotação de culturas entre trigo (*Triticum aestivum* L.) e girassol

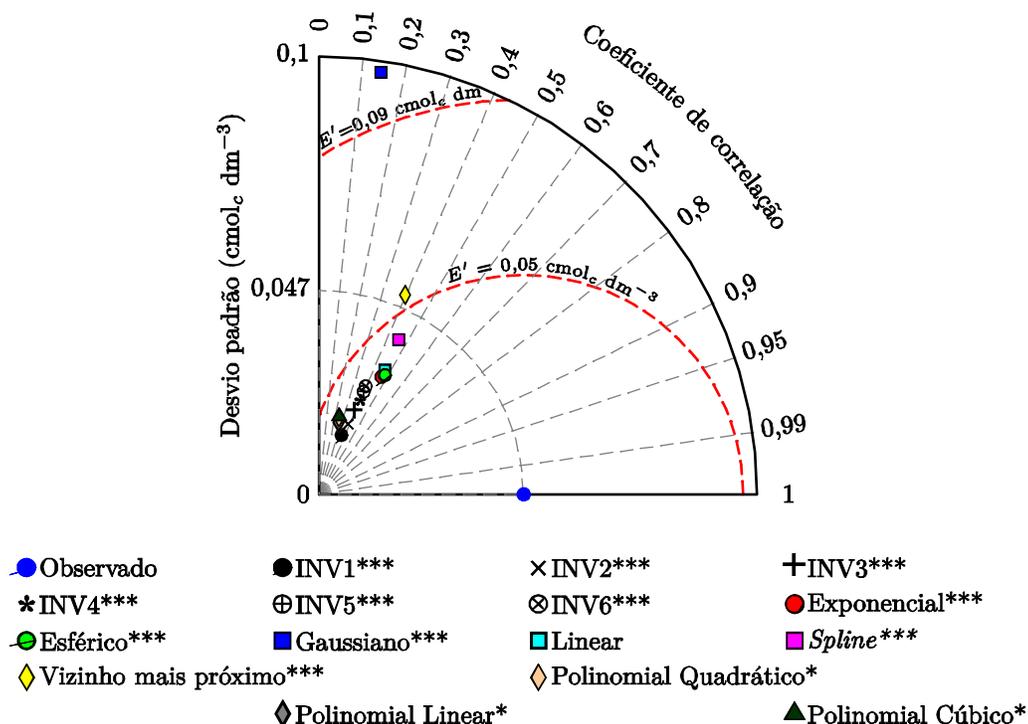
(*Helianthus annuus* L.), também encontraram baixo efeito pepita, com valor médio da proporção  $[C_0 / (C_0 + C)]$  de 14 %. Assim, o desenho da amostragem de solo também foi mais assertivo. Gallardo (2003) e Cerri et al. (2004), no entanto, observaram um grande efeito pepita, indicado pelo valor médio da dependência espacial de 61 % em solos de áreas florestais inundáveis na Espanha e em solos com pastagem (*Brachiaria decumbens* Stapf) na região amazônica brasileira, respectivamente. Isso indica que se distâncias menores do que as amostradas fossem investigadas, os semivariogramas poderiam mostrar em efeito pepita menor (CERRI et al., 2004).

#### **4.1.2. Análise do desempenho de interpoladores**

A construção do Diagrama de Taylor demonstrou a possibilidade para escolha gráfica do melhor método de interpolação, dentre os 15 testados, no ambiente Matlab. O atributo Ca foi escolhido para exemplificar essa análise gráfica, pois seu diagrama gerou mais clareza para sua visualização, uma vez que os 15 métodos ficaram mais bem distribuídos na figura, sem sobreposição de símbolos no diagrama.

A construção do Diagrama de Taylor, exemplificada na Figura 10, é mostrada em detalhes para o atributo Cálcio no Ano Três (camada 0,2-0,4 m) na Figura 12.

CÁLCIO: Ano Três (0,2-0,4 m)

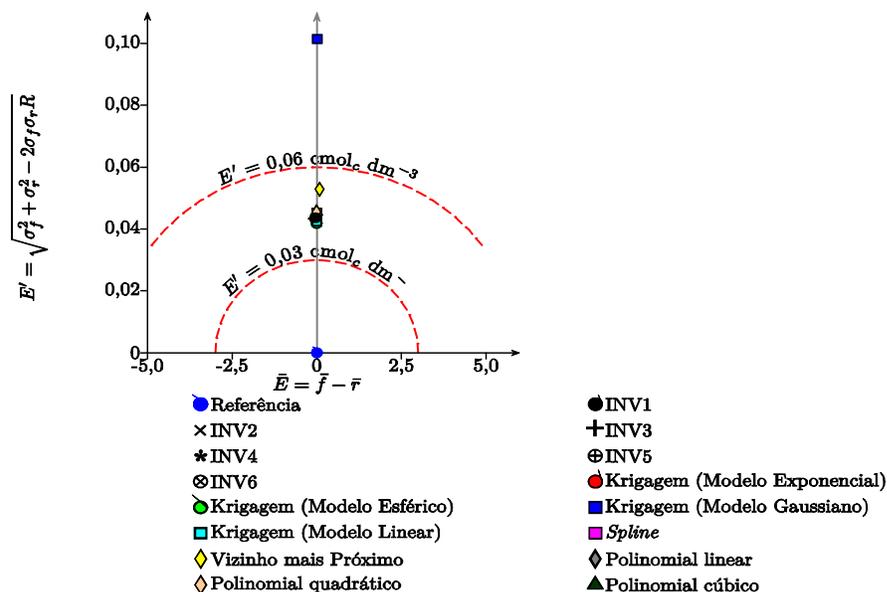


Nota: INV = método pelo inverso da distância seguido dos números 1-6 que equivalem à potência usada.  $E'$  = Raiz Quadrada da Média do Quadrado das Diferenças Centralizadas.

**Figura 12** – Diagrama de Taylor para o atributo Cálcio na profundidade de 0,2-0,4 m e no Ano Três, demonstrando a possibilidade para escolha gráfica do melhor método de interpolação, dentre os 15 testados.

O Diagrama de Taylor foi construído para cada análise (camada de solo e ano de avaliação) e mostrando todos os métodos. A visualização gráfica permitiu uma análise rápida do desempenho de cada método de interpolação. Assim, no caso do ambiente do Matlab, foi selecionado o melhor método de interpolação, juntamente com as respectivas estatísticas para cada atributo, camada de solo e ano de estudo (Figura 12).

O *bias* foi analisado na saída numérica dos resultados de interpolação, na tela do computador. Essa informação é um termo usado em estatística para expressar se existe tendenciosidade nos dados. Outra forma de análise desses desvios é a gráfica, conforme visto na Figura 13.



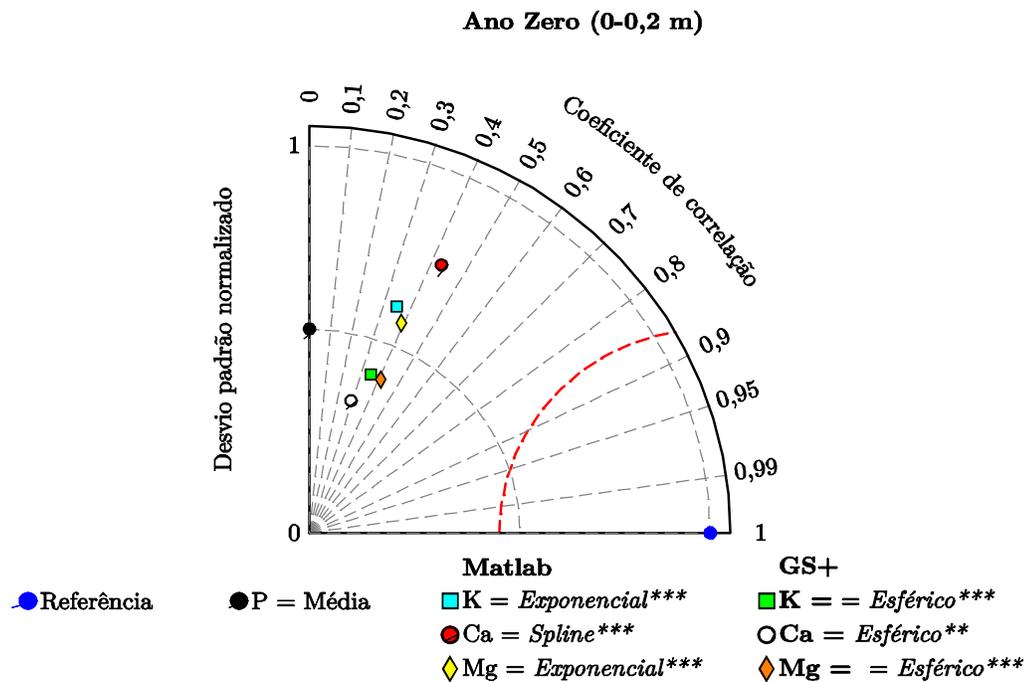
Nota: INV = método pelo inverso da distância seguido dos números 1-6 que equivalem à potência usada.  $E'$  = Raiz Quadrada da Média do Quadrado das Diferenças Centralizadas;  $f$ ,  $r$  = dados estimados e observados, respectivamente.

**Figura 13** – Conferência gráfica do *bias* para o resultado da análise dos interpoladores, no ambiente Matlab, para o atributo Cálcio (camada 0,2-0,4 m) no Ano Três.

#### 4.1.3. Escolha do melhor método de interpolação

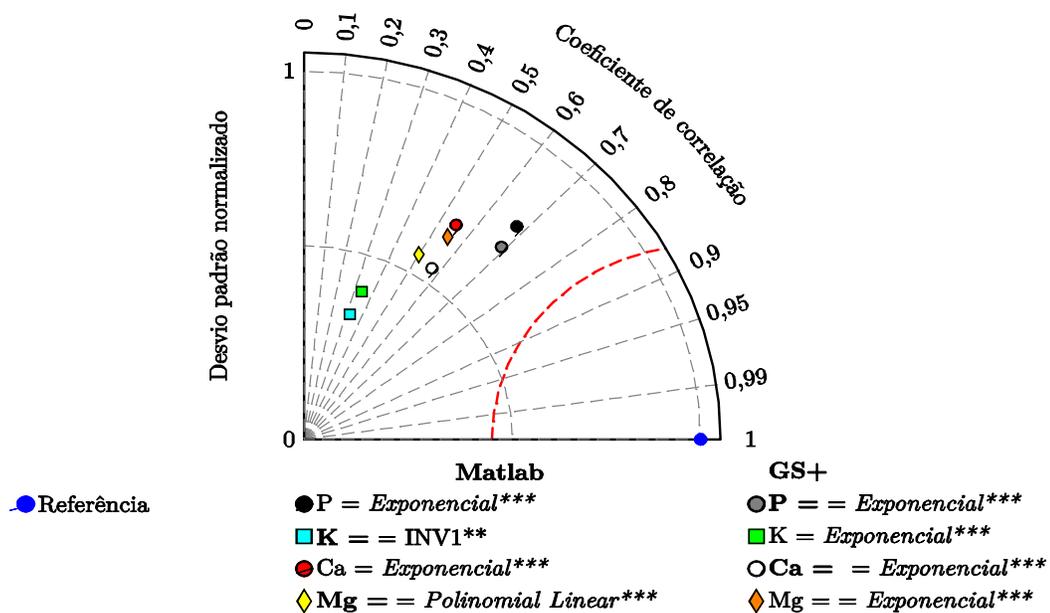
No diagrama de Taylor, cada método foi representado por um símbolo. Esse símbolo é plotado sendo sua distância radial do ponto de origem proporcional ao desvio padrão dos dados interpolados e seu ângulo em relação à origem, proporcional à correlação. O azimuth do ponto é o valor da correlação ( $R$ ) dos dados observados e estimados pelo método. Assim, definiu-se o método de espacialização de cada atributo para ser trabalhado na etapa seguinte (Item 4.3), por meio dos gráficos, escolhendo-se o modelo preferencialmente pelo menor desvio-padrão interpolado.

As Figuras 14 e 15 ilustram os Diagramas de Taylor, contendo os melhores modelos de interpolação para cada atributo químico do solo gerados nos *Softwares* GS+ e Matlab.



(A)

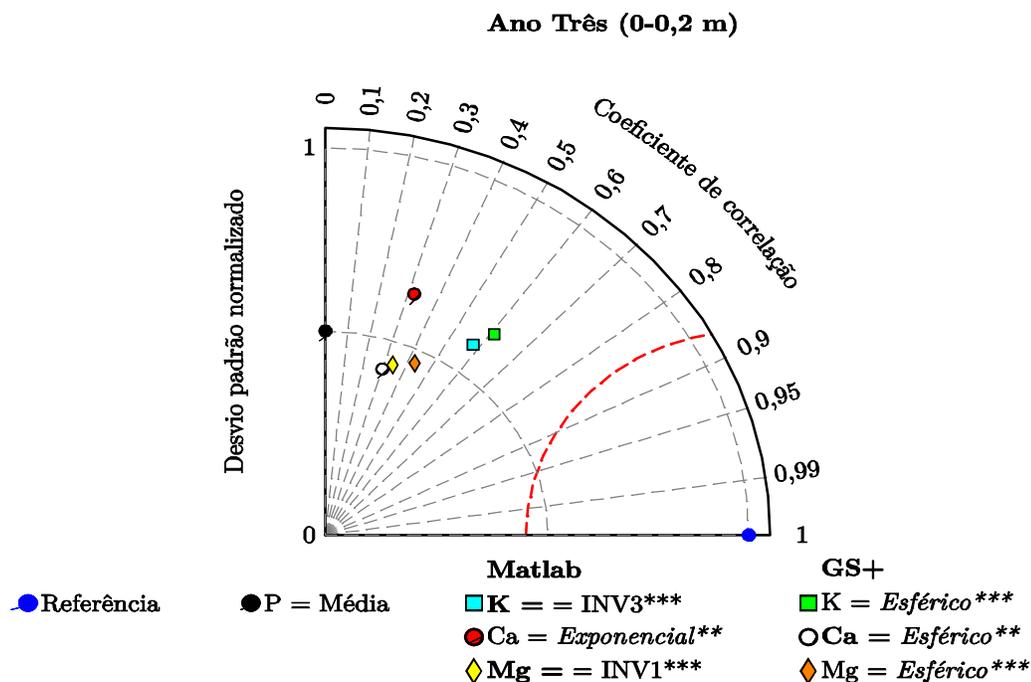
**Ano Zero (0,2-0,4 m)**



(B)

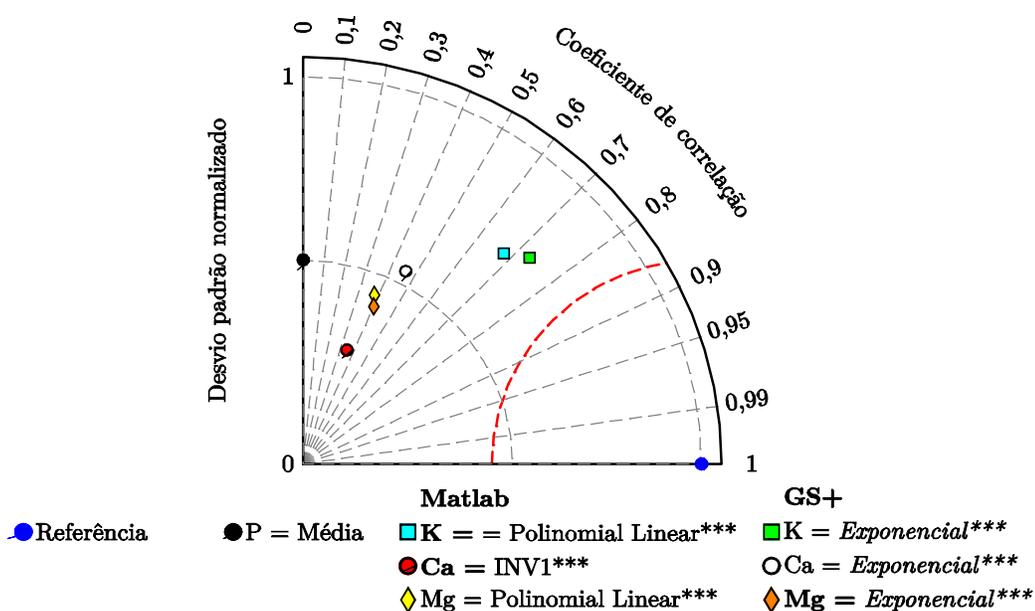
Nota: INV = método pelo inverso da distância – potência 1. \*\*\* =  $P < 0,001$ . Softwares: Matlab e GS+. Em negrito, método e software escolhidos.

**Figura 14** – Diagrama de Taylor para os atributos: Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio; Ano Zero. (A): profundidade de 0-0,2 m e (B): profundidade de 0,2-0,4 m.



(A)

Ano Três (0,2-0,4 m)



(B)

Nota: INV = método pelo inverso da distância – potências 1 e 3. \*\* =  $P < 0,01$ ; \*\*\* =  $P < 0,001$ . *Softwares*: Matlab e GS+. Em negrito, método e *software* escolhidos.

**Figura 15** – Diagrama de Taylor para os atributos: Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio; Ano Três. (A): profundidade de 0-0,2 m e (B): profundidade de 0,2-0,4 m.

Os valores das estatísticas foram extraídos das análises da validação cruzada para a inserção e construção dos gráficos (Figuras 14 e 15). Sua visualização numérica pode ser conferida nos Anexos 6 e 7.

Em relação aos métodos testados, o método do Vizinho mais próximo foi pouco eficiente para as interpolações. Os métodos polinomiais ficaram situados, no diagrama, na parte inferior e à esquerda do gráfico, indicando baixo valor de R e, algumas vezes, baixos desvios-padrão dos dados interpolados. O método polinomial foi melhor em duas situações na camada 0,2-0,4 m: Mg Ano Zero e K no Ano Três (Figuras 14B e 15B).

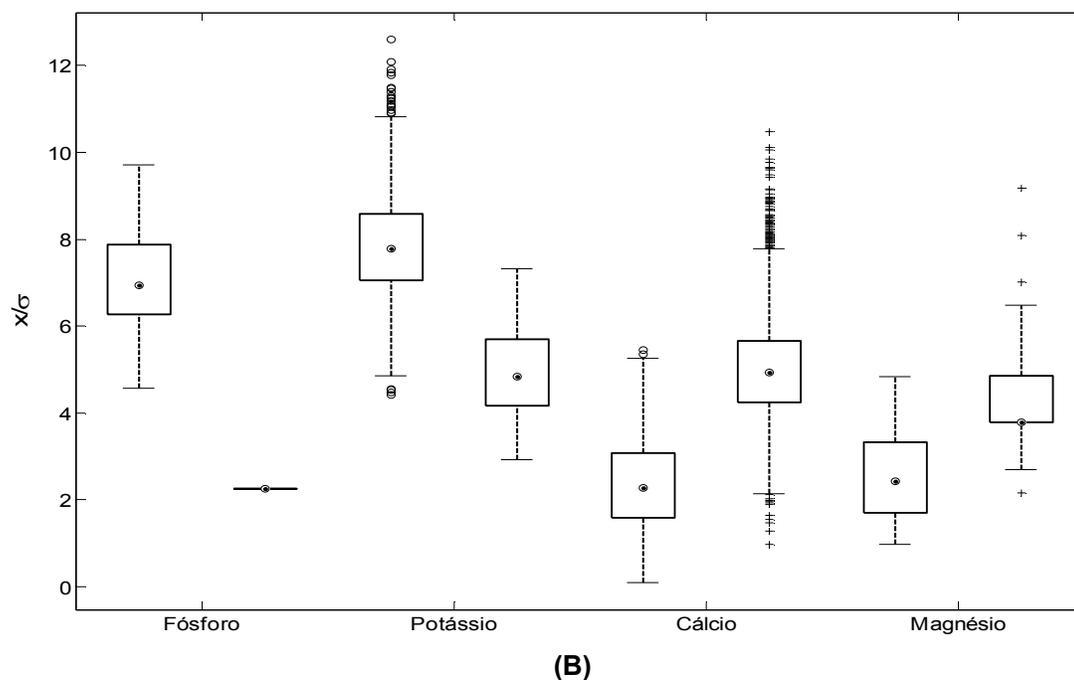
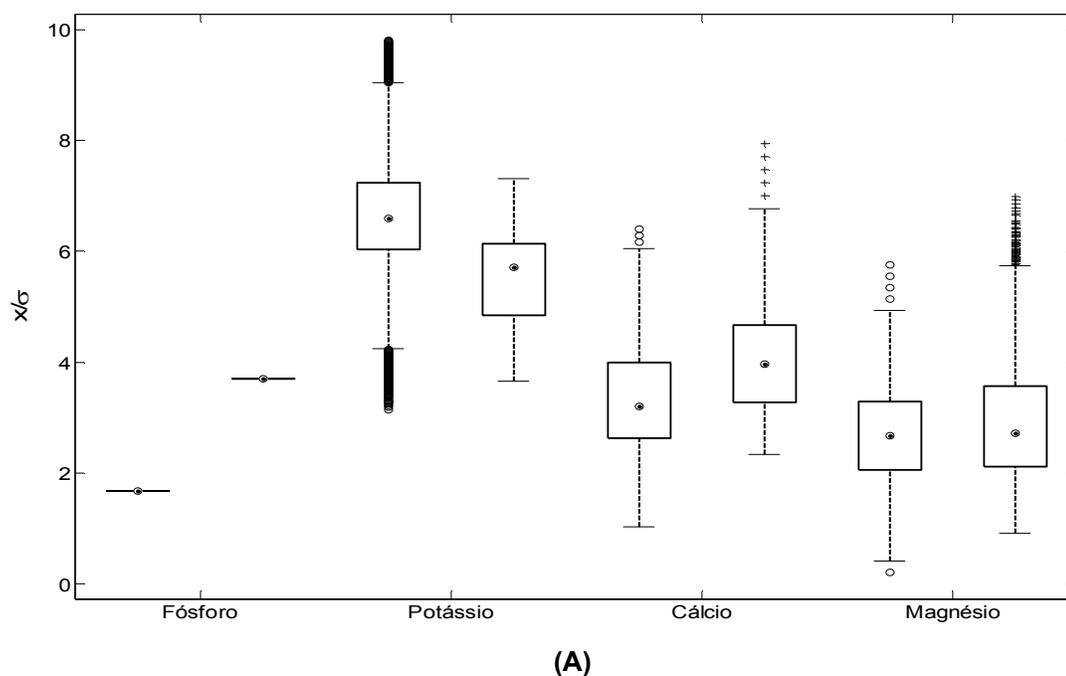
Os modelos INV na potência de 1 e 3 e os modelos geoestatísticos definidos pelo semivariograma exponencial e esférico apresentaram predominância nos resultados, com 25 % e 44 %, respectivamente. O mapa feito pela média apresentou-se em três situações, todas com o atributo P (Figuras 14 e 15).

A krigagem ordinária a partir do semivariograma exponencial foi a que apresentou o mais alto valor de R, sendo que os menores valores do desvio-padrão normalizado foram apresentados pelo semivariograma esférico. Logo, o método geoestatístico definido pelo semivariograma esférico merece destaque: além dos valores de R razoáveis, teve menor variância (Figuras 14 e 15; Anexos 6 e 7).

O Diagrama de Taylor começou a ser visto em uso em muitos estudos mesmo antes da publicação de sua descrição (RÄISÄNEN, 1997; LAMBERT e BOER, 2001). É uma forma ilustrativa de resumir informações básicas em um único diagrama, que combina diferentes estatísticas em forma de gráfico (TUOVINEN et al., 2009). Entretanto, em Ciência do Solo esse diagrama ainda não tem sido muito difundido, principalmente para avaliar atributos químicos do solo.

Os *outliers* foram então retirados, pois houve ocorrências de valores negativos e discrepantes acima do limite do 3º quartil e abaixo do 1º quartil. Conforme relatado anteriormente, o ajuste dos dados interpolados com a retirada dos *outliers* contribuiu para tornar as interpolações mais confiáveis. Aliado a isso, os dados ficam sem tendências.

A análise gráfica por meio dos *boxplots*, dos valores interpolados, pode ser vista na Figura 16.



Nota para *outliers*: 'o' Ano Zero e '+' Ano Três; '⊙' = mediana.  $X/\sigma$  = Valor do atributo dividido pelo desvio-padrão respectivo.

**Figura 16** – Gráficos *boxplot* para verificação da ocorrência de *outliers* dos atributos (dados interpolados): Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio; gerados para as idades de zero (implantação) e três anos de idade do povoamento de eucalipto. (A): profundidade de 0-0,2 m e (B): profundidade de 0,2-0,4 m.

## 4.2. TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO E ÁLGEBRA DE MAPAS

### 4.2.1. Níveis de fertilidade do solo

As matrizes foram geradas para os mapas de perdas e ganhos (MPG) conforme a Equação 17. Nessa equação, matrizes (25230 x 3) foram calculadas a partir da diferença dos teores de cada atributo em determinada profundidade de solo, entre o Ano Zero e Ano Três. Ainda, está inclusa relação com a EN para cada atributo. Assim, o valor de saída é uma referência das alterações ocorridas e o que isso representa em termos de atender a demanda nutricional do eucalipto.

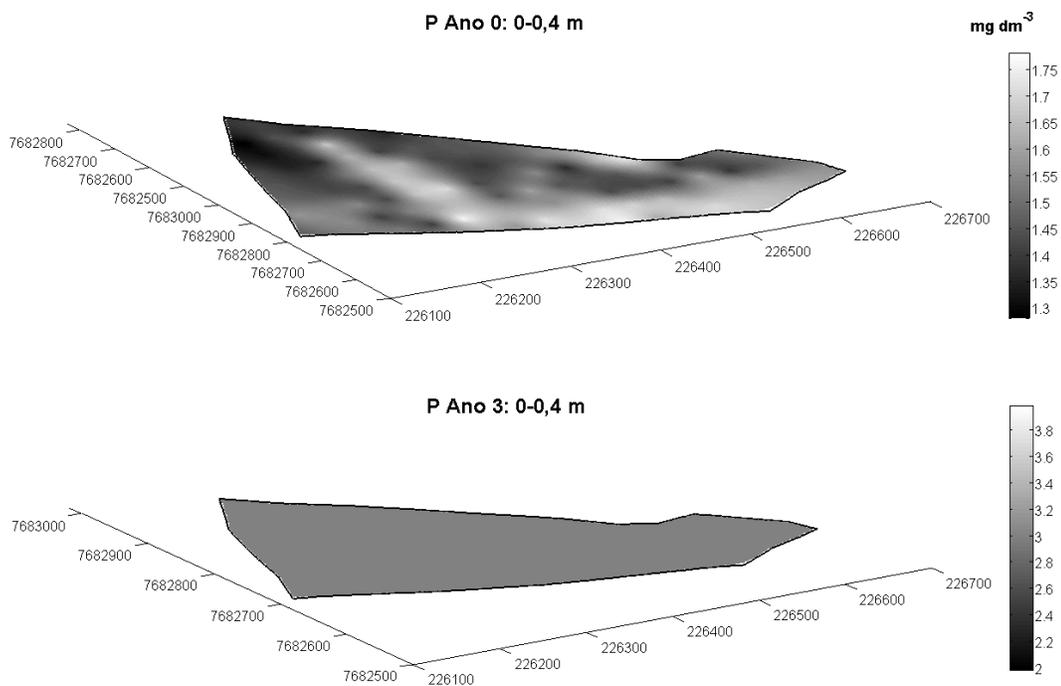
Para visualização do conteúdo da matriz, estão mostrados: o valor mínimo, o valor médio seguido do seu desvio-padrão e o valor máximo em cada uma. A seguir, plotaram-se mapas de cada atributo químico do solo, considerando-se a camada de 0-0,4 m, pois é nessa camada que se encontram a maioria das raízes do eucalipto. Nesses mapas, é observada a variação no teor de nutrientes no solo entre o Ano Zero e o Ano Três, assim como a magnitude e a tendência da variação.

a) Fósforo

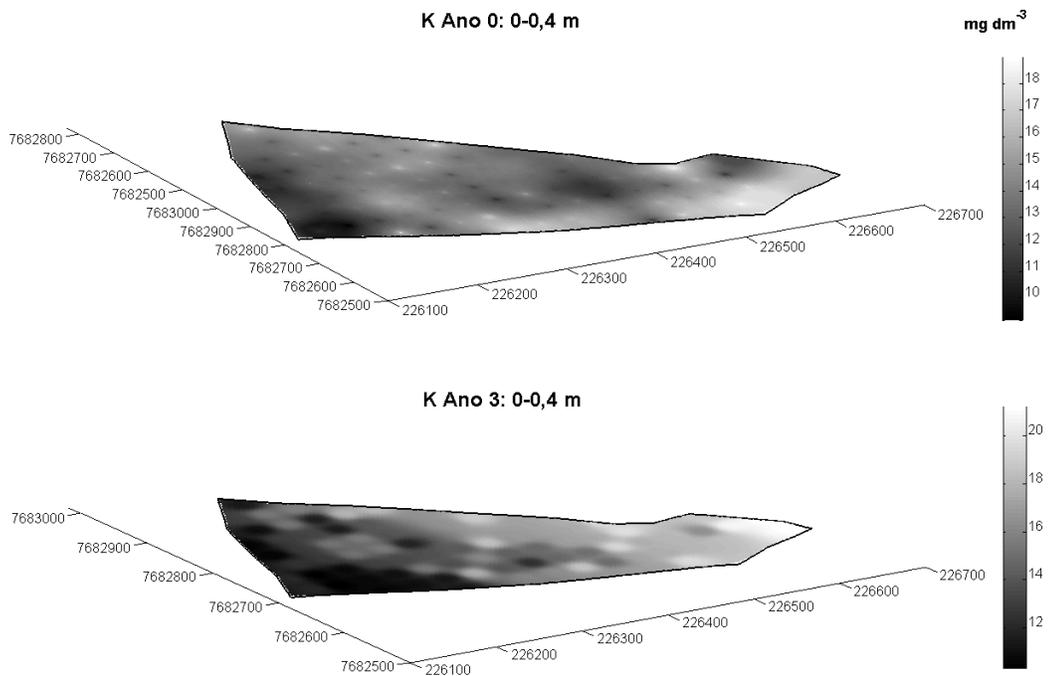
$$MPG_{P_{0-0,2m}} = \frac{[... ]P_{3_{0-0,2m}} - [... ]P_{0_{0-0,2m}}}{64,3} \times 100 = [...] \Rightarrow 3,2 \% \text{ (média)};$$

$$MPG_{P_{0,2-0,4m}} = 0,6 < 1,4 \pm 0,3 < 2,1 \%;$$

A visualização sobreposta das variações de P e K, considerando a camada de solo de 0-0,4 m, é mostrada nas Figuras 17 e 18.



**Figura 17** – Mapas temáticos sobrepostos para o atributo P: Anos Zero e Três na profundidade 0-0,4 m (valores médios).



**Figura 18** – Mapas temáticos sobrepostos para o atributo K: Anos Zero e Três na profundidade 0-0,4 m (valores médios).

## b) Potássio

$$MPG_{K_{0-0,2m}} = \frac{[... ]K_{3_{0-0,2m}} - [... ]K_{0_{0-0,2m}}}{70} \times 100 = 2,9 \% \text{ (média);}$$

$$MPG_{K_{0,2-0,4m}} = 0,5 < 1,3 \pm 0,3 < 2,0 \%;$$

Observa-se para P e K, as variações, em média, foram pequenas e não atendem às exigências do eucalipto. Os mapas de perdas e ganhos, então, demonstram que esses nutrientes, aplicados nas adubações de plantio e cobertura, foram logo absorvidos pelas árvores ou perdidos no sistema (Figuras 17 e 18).

Alguns autores, comparando eucalipto com pastagens, na camada de 0-0,4 m, encontraram variações pequenas para o P. Effgen et al. (2012) reportaram variação positiva de 0,6 mg dm<sup>-3</sup> e Leite et al. (2010), de 0,35 mg dm<sup>-3</sup> para o P em sistemas florestais com *Eucalyptus sp* substituindo pastagem. Esses últimos autores relataram que o programa de adubação não foi suficiente para equilibrar a saída de nutrientes do sistema via colheita da madeira.

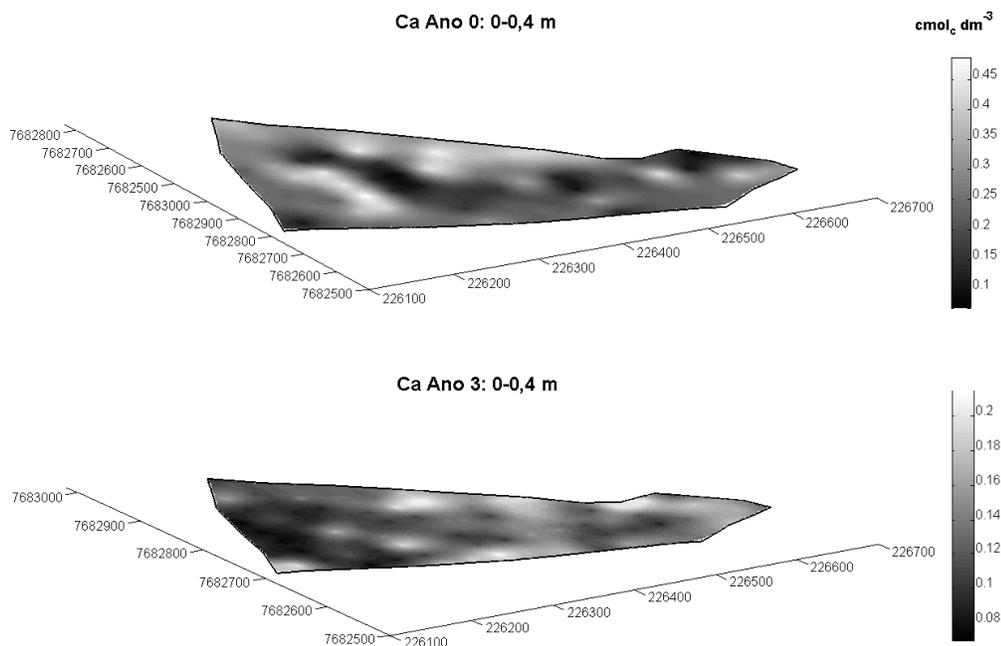
Com relação aos baixos teores iniciais de nutrientes do solo em questão, não houve ganhos expressivos para o K (Figura 18). Isso acarreta decréscimo na produtividade do cultivo futuro, uma vez que o teor do solo não atende a EN (IMA 30). Logo, é preciso monitorar a quantidade de potássio que deve existir no solo, para atender a demanda do eucalipto (BARROS et al., 1997).

## c) Cálcio

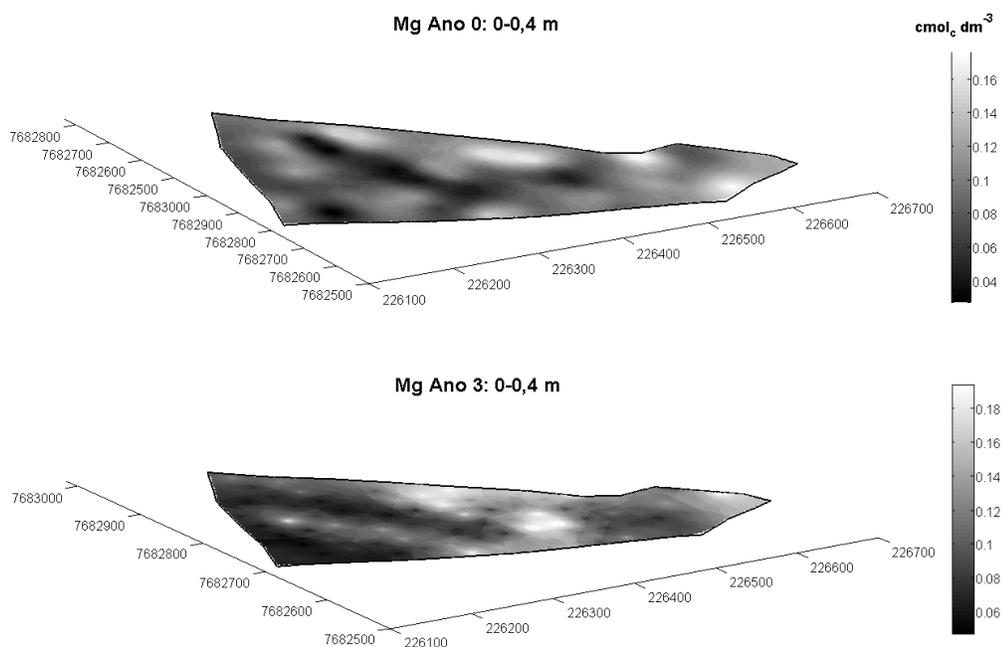
$$MPG_{Ca_{0-0,2m}} = \frac{[... ]Ca_{3_{0-0,2m}} - [... ]Ca_{0_{0-0,2m}}}{0,80} \times 100 = -51,3 < -14,4 \pm 12,0 < 22,5 \%;$$

$$MPG_{Ca_{0,2-0,4m}} = -55,4 < -18,1 \pm 12,8 < 8,3 \%;$$

A visualização sobreposta das variações de Ca e Mg, considerando a camada de solo de 0-0,4 m, é mostrada nas Figuras 19 e 20.



**Figura 19** – Mapas temáticos sobrepostos para o atributo Ca: Anos Zero e Três na profundidade 0-0,4 m (valores médios).



**Figura 20** – Mapas temáticos sobrepostos para o atributo Mg: Anos Zero e Três na profundidade 0-0,4 m (valores médios).

O MPG do cálcio foi diferente do que o do P e do K. A demanda de Ca em relação ao IMA 30 é notada pela variação negativa do MPG. Nas duas profundidades de solo, houve mais de 50 % de retirada do nutriente em relação à demanda de 0,80  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para satisfazer a produtividade de 30  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Entretanto, houve locais com variação positiva de 22,5 %, na camada 0-0,2 m, conforme também observado graficamente um enriquecimento no lado direito do mapa do ano Três (Figura 19).

#### d) Magnésio

$$MPG_{Mg_{0-0,2m}} = \frac{[... ]Mg_{3_{0-0,2m}} - [... ]Mg_{0_{0-0,2m}}}{0,18} \times 100 = -76,2 < 6,0 \pm 33,9 < 140,4 \%;$$

$$MPG_{Mg_{0,2-0,4m}} = -18,7 < 10,2 \pm 11,0 < 35,9 \%.$$

O magnésio demonstrou variações mais discrepantes do que o cálcio. Na camada 0-0,2 m, além de locais com mais de 70 % de variação negativa, houve variação positiva de mais de 140 %, em relação à EN (IMA 30). Esse comportamento pode ser devido à baixa demanda de Mg pelo eucalipto (0,18  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e ao uso de calcário dolomítico (teor de MgO > 12 %) aplicado a lanço na área.

Nota-se que a área possuía baixo teor para atender a demanda do IMA 30 no Ano Zero. O lado esquerdo do mapa tinha predominantemente baixa concentração de Mg (teor < 50 % EN) e a outra extremidade, com teores pouco acima de 0,12  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Como observado na Figura 20 (Ano 3), ao longo do tempo e com a calagem, poucas áreas apresentaram incremento acima do exigido para atender ao IMA 30 (teor necessário de 0,18  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ).

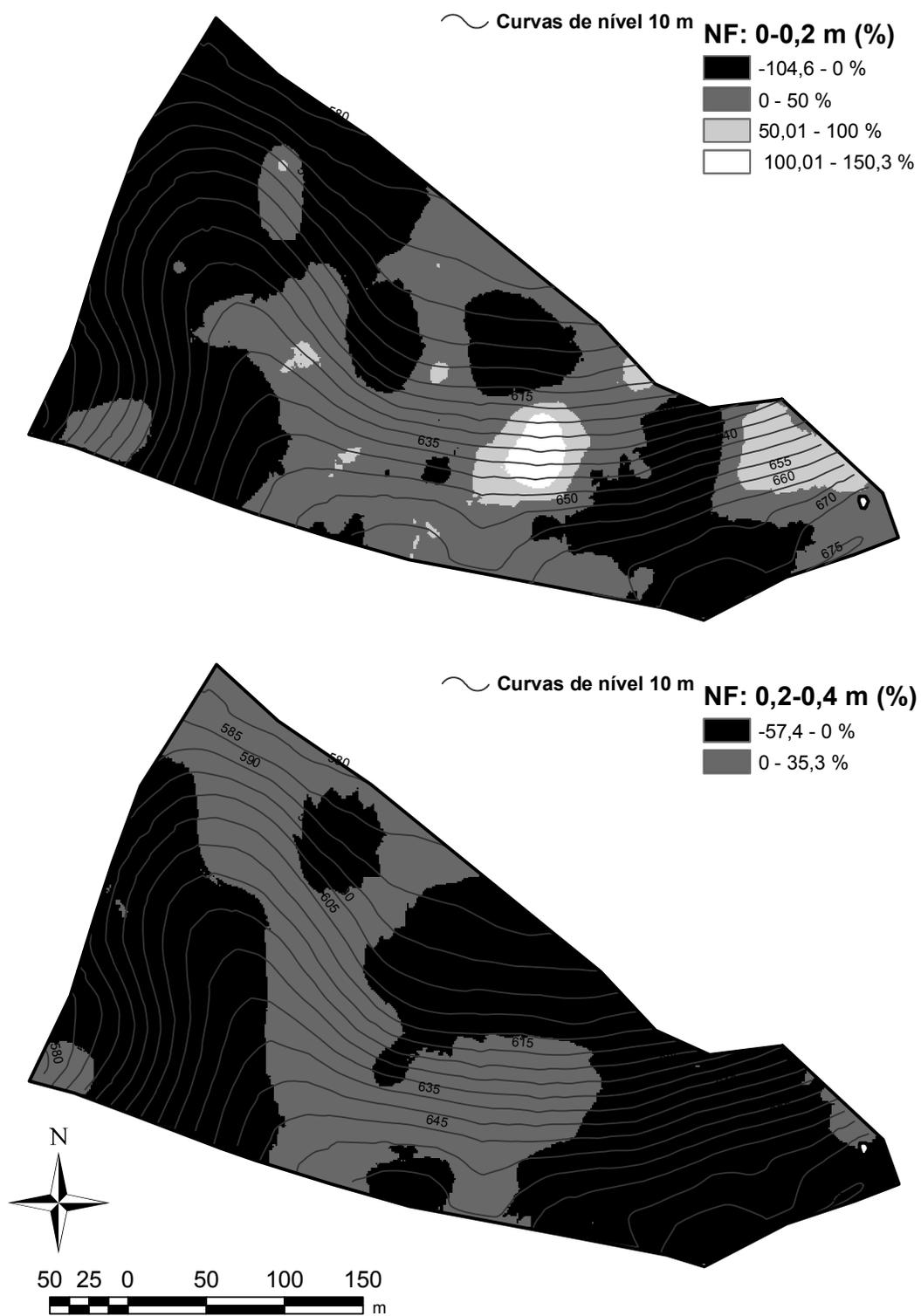
Alguns pesquisadores têm encontrado cultivos florestais com eucalipto (*Eucalyptus sp*) em solos que exprimem baixa capacidade de suprimento (LANA e NEVES, 1994; FERREIRA, 2008) e de reposição dos nutrientes K, Ca e Mg (REATTO et al., 1998). Sugerem a aplicação desses nutrientes de acordo com os níveis críticos exigidos na nutrição do eucalipto, diante da ausência de sustentabilidade desses sítios florestais em termos de reserva de nutrientes ao longo de cultivos sucessivos.

A Equação 18 calculou o nível de fertilidade do solo da área de estudo (NF). O NF mostrou a soma geral de todas as alterações dos teores dos atributos estudados no solo, em *pixel* de 4 m<sup>2</sup>. Além disso, associa relação com as exigências nutricionais do eucalipto (EN), embutidas nos MPG's.

$$NF_{0-0,2m} = MPG_{P+K+Ca+Mg_{0-0,2m}} = -104,6 < -2,3 \pm 39,0 < 150,3 \%$$

$$NF_{0,2-0,4m} = MPG_{P+K+Ca+Mg_{0,2-0,4m}} = -57,4 < -5,2 \pm 14,4 < 35,3 \%$$

Os mapas temáticos referentes a esse tema é apresentado na Figura 21.



**Figura 21**– Mapas temáticos dos níveis de fertilidade do solo (NF) das camadas 0-0,2 m (figura superior) e 0,2-0,4 m.

A análise feita pelo NF auxilia a detecção de zonas com potenciais produtivos variados em função da fertilidade do solo. As alterações causadas pelo reflorestamento atende 100 % das exigências da cultura, para os atributos P, K, Ca e Mg, em apenas 1,3 % da área, na camada 0-0,2 m. Em média, as variações do NF foram de -2,3 e -5,2 %, respectivamente para as camadas 0-0,2 m e 0,2-0,4 m (Figura 21).

Essa baixa magnitude também foi notada em cafeeiros (*Coffea canephora* Pierre) no sul do estado do Espírito Santo. A maior porcentagem da área de estudo demonstrou redução da fertilidade do solo, afetando a produtividade do cafeeiro (COSTA, 2011). Logo, o mapeamento de zonas com diferentes potenciais produtivos permite manejo nutricional mais assertivo, com vistas à manutenção da produtividade das culturas.

#### 4.2.2. Índice de fertilidade do solo

De acordo com a Equação 19, relacionaram-se os níveis de fertilidade (NF) do solo em função de suas respectivas áreas. Assim, obtiveram-se os índices de fertilidade do solo (IFS) de -1,1 % e -2,6 % para as camadas 0-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente:

$$IFS_{0-0,2m} = \frac{-114334}{100834} \cong -1,1 \%$$

$$IFS_{0,2-0,4m} = \frac{-263873}{100834} \cong -2,6 \%$$

Esse balanço negativo pode ser esperado, uma vez que pesquisadores encontraram que a maior quantidade de P, K, Ca e Mg foi retirada do solo para imobilização na árvore à medida que ocorre avanço na idade do eucalipto (FERREIRA, 2008). Costa (2011) notou que a redução no IFS foi em decorrência da maior extração de cátions básicos do solo em áreas com café conilon. Além disso, o decréscimo de nutrientes

no solo ocorre pelo efeito do crescimento da floresta e isso é esperado, principalmente para solos com baixa reposição de nutrientes (FERREIRA, 2008; LEITE et al., 2010).

Por ser uma versão espacial, o índice de fertilidade do solo (IFS) dinamiza a ilustração das alterações entre safras de culturas, auxiliando a tomada de decisões. Logo, a garantia de manutenção, ou mesmo aumento, dos níveis de produtividade de determinada cultura avista-se de forma mais prática para os produtores, com a adoção do NF e do IFS e seus mapeamentos.

#### 4.3. PRODUTIVIDADE DO SÍTIO EM FUNÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO

A Tabela 10 ilustra os teores de P, K, Ca e Mg do solo, no Ano Zero e no Ano Três, estratificados conforme os níveis críticos propostos por Novais et al. (1986).

**Tabela 10** – Distribuição espacial dos nutrientes P, K, Ca e Mg, na área de estudo (camada 0-0,4 m), conforme níveis críticos relacionados à produtividade sugeridos por Novais *et al.* (1986), em área e percentuais para o Ano 0 (2008) e Ano 3 (2011)

Nutriente	Níveis críticos P (mg dm <sup>-3</sup> ) K (mg dm <sup>-3</sup> ) Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ) Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	Distribuição espacial				Produtividade do sítio
		Ano 0		Ano 3		
		Área (m <sup>2</sup> )	(%)	Área (m <sup>2</sup> )	(%)	
Fósforo	≥ 60	0	-	0	-	Implantação "0"
	0-4,1	100834	100	100834	100	10 m <sup>3</sup> /ha/ano
	4,1-4,3	0	-	0	-	20 m <sup>3</sup> /ha/ano
	4,3-4,3	0	-	0	-	30 m <sup>3</sup> /ha/ano
	4,3-4,3	0	-	0	-	40 m <sup>3</sup> /ha/ano
	4,3-4,4	0	-	0	-	50 m <sup>3</sup> /ha/ano
	≥ 4,5	0	-	0	-	-
	<b>Total</b>	<b>100834</b>	<b>100</b>	<b>100834</b>	<b>100</b>	-
Potássio	0-9,99	0	-	470	0,5	Implantação "0"
	10-29,99	100834	100	100364	99,5	10 m <sup>3</sup> /ha/ano
	30-44,99	0	-	0	-	20 m <sup>3</sup> /ha/ano
	45-59,99	0	-	0	-	30 m <sup>3</sup> /ha/ano
	60-74,99	0	-	0	-	40 m <sup>3</sup> /ha/ano
	75-89,99	0	-	0	-	50 m <sup>3</sup> /ha/ano
	≥ 90	0	-	0	-	-
	<b>Total</b>	<b>100834</b>	<b>100</b>	<b>100834</b>	<b>100</b>	-
Cálcio	0-0,19	7161	7,1	97974	97,2	Implantação "0"
	0,20-0,29	63931	63,4	2860	2,8	10 m <sup>3</sup> /ha/ano
	0,30-0,449	29742	29,5	0	-	20 m <sup>3</sup> /ha/ano
	0,45-0,59	0	-	0	-	30 m <sup>3</sup> /ha/ano
	0,60-0,69	0	-	0	-	40 m <sup>3</sup> /ha/ano
	0,70-0,79	0	-	0	-	50 m <sup>3</sup> /ha/ano
	≥ 0,80	0	-	0	-	-
	<b>Total</b>	<b>100834</b>	<b>100</b>	<b>100834</b>	<b>100</b>	-
Magnésio	0-0,049	0	-	672	0,7	Implantação "0"
	0,05-0,069	0	-	15273	15,1	10 m <sup>3</sup> /ha/ano
	0,07-0,099	65763	65,2	29701	29,5	20 m <sup>3</sup> /ha/ano
	0,10-0,129	35067	34,8	26456	26,2	30 m <sup>3</sup> /ha/ano
	0,13-0,159	0	-	15586	15,5	40 m <sup>3</sup> /ha/ano
	0,16-0,189	0	-	8432	8,4	50 m <sup>3</sup> /ha/ano
	≥ 0,19	0	-	4714	4,6	-
	<b>Total</b>	<b>100834</b>	<b>100</b>	<b>100834</b>	<b>100</b>	-

Os baixos níveis de P e K refletem o uso do solo anterior (pastagem degradada) e sustentam, temporariamente, produtividade zero. O impacto do reflorestamento três anos após, mostrou-se nulo em relação ao fósforo. Apresentou leve tendência de decréscimo no nível de potássio, migrando da classe satisfatória para a implantação florestal, em direção à classe com teor considerado improficuo para a cultura (Tabela 10), de acordo com Novais *et al.* (1986).

Em experimento semelhante, comparando plantio de eucalipto com 5 anos de idade com área de pastagem, Effgen *et al.* (2012) demonstraram variações positivas para

P e K. Já em relação a ecossistemas nativos, o eucalipto contribuiu para melhorar o solo aumentando os valores de P, Ca, Mg, CTC, V e, principalmente, K, em relação à testemunha cerrado (SILVA et al., 2009).

O teor de cálcio no solo mostrou comportamento semelhante ao K. Cerca de 70 % da área em 2008 apresentava baixos teores, segundo Novais et al. (1986). Entretanto, em 2011, houve mudança drástica de classes para pior: 97,2 % da área mostraram-se com teor de Ca insuficiente para o cultivo de eucalipto. Isso denota forte extração desse nutriente pelas árvores (Tabela 10).

Alta demanda por cálcio pelo eucalipto é relatada frequentemente na literatura (SANTANA et al., 2008; TURNER e LAMBERT, 2008; LEITE et al., 2010). Dos macronutrientes, o Ca parece ser o que apresenta expressiva saída do sistema causa por ocasião da colheita, principalmente via casca. Essa extração chega a 590 kg de Ca para atender a produção de 100 t ha<sup>-1</sup> da biomassa da parte aérea de eucalipto (SANTANA et al., 2008). Logo, a alternativa mais correta é a retirada apenas da madeira comercial sem a casca, como é praticado pelas empresas florestais atualmente.

O magnésio teve comportamento diferenciado. Devido à sua menor demanda, mostrou efeito da aplicação do calcário a longo no segundo ano da implantação do povoamento. Onde antes havia suporte para produtividades entre 10 e 20 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, houveram mudanças notadas pela ampla distribuição do nutriente na área de estudo (Tabela 10).

Baixos teores de nutrientes no solo e a ausência de correções nutricionais ao longo de sucessões de cultivo em florestas plantadas podem levar ao declínio e morte de árvores. O magnésio, junto com cálcio e manganês, foi relatado com redução do seu teor no solo em pinheirais. Mesmo com demanda menor para Mg, há que se ter o cuidado de reparar as adubações para evitar exaustão de nutrientes no solo com risco de danos à produtividade e até à morte de plantas (CHAVES e CORRÊA, 2005).

A extração de nutrientes pelas árvores foi notada crescente, comparando-se o Ano Zero e o Ano Três (Tabela 10). Santana et al. (2008) revelaram que aproximadamente 70 % da demanda de todos os nutrientes acumula até à idade de 4,5 anos, para um ciclo de corte de 6,5 anos. A partir de 4,5 anos de idade, para o

eucalipto, a ciclagem bioquímica torna-se mais expressiva, época em que a copa está totalmente desenvolvida e a ciclagem dos nutrientes contribui para atender a demanda nutricional das árvores (REIS e BARROS, 1990).

Além de mostrar claramente as tendências observadas para as variações na fertilidade do solo, a Tabela 10 confirma um caminho para o manejo nutricional para o eucalipto. De acordo com Novais et al. (1986), a proposta é realizar adubações localizadas para P e K e para Ca e Mg, aplicações a lanço. Essa proposta vem sendo adotada por empresas florestais desde o início da prática do cultivo mínimo, na década de 80. Entretanto, na aplicação de calcário, melhor seria utilizar o calcário calcítico, com correção da dose para satisfazer a necessidade de cálcio.

Para P, deve-se aplicar uma fonte solúvel (por exemplo, superfostato simples) na cova de plantio, devido ao elevado valor crítico para implantação da cultura (adubação de “arranque”). A seguir, é recomendável uso de uma fonte de liberação lenta para a manutenção: o fosfato natural reativo (por exemplo, ARAD) para atender a demanda menor ao longo da idade do eucalipto (NOVAIS et al., 1986).

As áreas que demandam novas pesquisas que apareceram neste estudo seriam: o custo para análises de solo (para estudos de variabilidade espacial) compensa o gasto com insumos e mão de obra de aplicação diferenciada na área? Qual seria a amostragem mínima? Poderiam ser criadas zonas de manejo? Quais seriam os impactos na continuidade do tempo com o mesmo cultivo na área (nova avaliação aos cinco ou seis anos)?

Exportações de nutrientes via colheita florestal têm sido vistas como autêntica “erosão de porteira”. O conteúdo estimado de nutrientes acumulados na copa e na casca representa quase 80 % de nutrientes como N, P, K, Ca e Mg, até 6,5 anos de idade. Logo, os produtores devem conhecer o balanço entrada-saída de nutrientes no sítio de cultivo, para poder aplicar técnicas que visem ao manejo florestal sustentável por várias rotações (SANTANA et al., 2008).

## 5. CONCLUSÕES

A metodologia utilizada neste estudo possibilitou mapear a variabilidade espacial e temporal de atributos químicos do solo, em área cultivada com eucalipto sucedendo pastagem. Os resultados demonstram que os efeitos observados são em função da cultura, pois o eucalipto refletiu a ciclagem de nutrientes, uma vez que não foram coletadas amostras de solo em locais adubados.

Em relação aos atributos químicos do solo avaliados, todos apresentaram variação espacial na área de estudo, exceção para o P, no Ano Zero (camada 0-0,2 m) e no Ano Três (ambas as camadas).

Os melhores métodos de interpolação para o mapeamento de cada atributo químico do solo foram identificados com a ajuda gráfica do Diagrama de Taylor. O método da krigagem ordinária, a partir do semivariograma do modelo esférico mereceu destaque: além dos valores de R razoáveis, teve menor variância. O modelo exponencial foi a que apresentou o mais alto valor de R, sendo que os menores valores do desvio-padrão normalizado foram apresentados pelo semivariograma esférico.

A fertilidade do solo, definida pelo nível de fertilidade do solo (NF) e pelo índice de fertilidade global do solo (IFS), apresentou leve variação negativa entre os anos avaliados. A substituição de pastagem pelo eucalipto concorreu para, em média, reduzir os teores desses atributos de maneira global. Entretanto, essa variação apresentou-se positiva em várias partes da área de estudo, apesar de ser em pequena extensão.

Os índices quantitativos médios obtidos de fertilidade do solo foram:

- NF de -2,3 e -5,2 %; e
- IFS de -1,1 % e -2,1 %.

As variações ocorreram entre o terceiro ano e o ano inicial, para as camadas de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente. Esses índices representam a variabilidade

temporal e a distribuição espacial da fertilidade do solo entre os diferentes anos e nas duas camadas de solo avaliadas.

A produtividade do sítio florestal, em função do incremento médio anual (IMA) e dos limites propostos por Novais et al. (1986), apresentou-se com as mesmas tendências observadas para as variações na fertilidade do solo, exceto para o atributo Mg, que mostrou-se com tendências espaciais para suporte de elevadas produtividades.

O mapeamento espacial da fertilidade do solo, como ferramenta para perceber áreas com fertilidade do solo distinta nos locais de cultivo de eucalipto, confirma um caminho operacional acessível para empresas e produtores florestais para o manejo nutricional em florestas plantadas. O uso dos mapas facilita a mobilização de recursos para melhorar a aplicação de fertilizantes e corretivos necessários.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As pequenas variações negativas na fertilidade do solo encontradas neste estudo são incipientes para conclusões mais conclusivas. Isso é devido ao curto espaço de tempo avaliado frente ao número de condução de rebrotas prováveis de uso do solo com eucalipto, que normalmente chega a três em um período aproximado de 20 anos.

Novas frentes de pesquisa podem ser ajustadas para dar continuidade a esse estudo, tais como:

- a) Estudo da ciclagem de nutrientes pelo eucalipto até a colheita e verificação dos teores de nutrientes na biomassa da parte aérea das árvores e na serapilheira;
- b) Correlação da fertilidade do solo com os inventários florestais;
- c) Estudos futuros em camadas de solo mais estratificadas, por exemplo:

- 0-0,15 m;
- 0-15-0,3 m; e
- 0,3-0,45 m.

## 7. REFERÊNCIAS

AGGELOPOOULOU, K.; CASTRIGNANÒ, A.; GEMTOS, T.; BENEDETTO, D. Delineation of management zones in an apple orchard in Greece using a multivariate approach. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 90, p. 119-130, 2013.

ALBERGEL, C.; ROSNAY, P.; GRUHIER, C.; MUÑOZ-SABATER, J.; HASENAUER, S.; ISAKSEN, L.; KERR Y.; WAGNER, W. Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 118, p. 215-226, 2012.

AMORIM, R. C. F.; RIBEIRO, A.; LEITE, C. C.; LEAL, B. G.; SILVA, J. B. G. Avaliação de desempenho de dois métodos de espacialização da precipitação pluvial para o Estado de Alagoas. Maringá: **Acta Scientiarum Technology**, v. 30, n. 1, p. 87-91, 2008.

ANDRADE, E. N. **Manual do plantador de *Eucalyptus***. 2ª ed. São Paulo: Typographia Brazil de Rothschild & Comp., 1911. 336 p.: il.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Ed. UNISINOS, 2010, 165 p.

ABRAF. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2012/ABRAF – Brasília, DF: 2013. 142 p.: il. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br>>. Acesso em: 2 jan. 2014.

AZEVEDO, E. C. **Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no estado de Mato Grosso**. 2004. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

BABAK, O.; DEUSTCH, C. V. Statistical approach to inverse distance interpolation. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 23, p. 543–553, 2009.

BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; ALVES, B. J. R.; FONSECA, S. Mineralização de nitrogênio e

carbono em solos sob plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p.735-745, 2010.

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L. **Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto**. In: BARROS, N. F. & NOVAIS, R. F., eds. Relação solo-eucalipto. Viçosa-MG: Ed. Folha de Viçosa, p. 99-186, 1990.

BARROS, N. F.; TEIXEIRA, J. C.; TEIXEIRA, J. L. Nutrição e produtividade de povoamentos de eucalipto manejados por talhadia. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 30, cap. 7, p. 79-87, abr. 1997.

BENATTI, B. P. **Compartimentalização de biomassa e de nutrientes em estruturas de plantas de eucalipto cultivadas em solos distintos**. 2013. 114 p. Dissertação (Mestrado em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

BINGHAM, R. J.; HAINES, K. Mean dynamic topography: intercomparisons and errors. **Philosophical Transactions of Royal Society A**, v. 364, n. 1841, p. 903-916, 2006.

BOGNOLA, I. A.; GAVA, J. L.; FASOLO, P. J.; STOLLE, L. Proposição de uma metodologia para identificação de unidades de improdutivas em plantios de *Eucalyptus*. Brasília: **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 59, p. 27-36, 2009.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A.. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. Fortaleza: **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.

BRANDELERO, C.; ANTUNES, M. U. F.; GIOTTO, E. Silvicultura de precisão: nova tecnologia para o desenvolvimento florestal. **Ambiência**, v. 3, n. 2, p. 269-281, 2007.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. New York: Oxford University Press Inc., 2006, 333 p.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 58, p. 1501-1511. 1994.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 2. ed. rev. e ampl. Viçosa-MG: Ed. UFV, p. 213, 2006.

CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; CHAPLOT, V.; VOLKOFF, B.; VICTORIA, R. L.; MELILLO, J. M.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental área. **Geoderma**, n. 123, p. 51-68, 2004.

CHALLINOR, A. J.; WHEELER, T. R.; CRAUFURD, P. Q.; SLINGO, J. M.; GRIMES, D. I. F. Design and optimisation of a large-area process-based model for annual crops. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 124, n. 1–2, p. 99–120, 2004.

CHAVES, R. Q.; CORRÊA, G. F. Micronutrientes no sistema solo-*Pinus caribaea* Morelet em plantios apresentando amarelecimento das acículas e morte de plantas. Viçosa-MG: **Revista Árvore**, v. 27, n. 6, p. 769-778, 2003.

\_\_\_\_\_. Macronutrientes no sistema solo-*Pinus caribaea* Morelet em plantios apresentando amarelecimento das acículas e morte de plantas. Viçosa-MG: **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 691-700, 2005.

COELHO, E. C.; SOUZA, E. G.; URIBE-OPAZO, M. A.; PINHEIRO NETO, R. Influência da densidade amostral e do tipo de interpolador na elaboração de mapas temáticos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 1, p. 165-174, 2009.

COLNAGO, G. R.; MESSIAS, M. Interpolação de dados por spline cúbica utilizando o software MATLAB. *In*: Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 27, 2004, Porto Alegre, **Anais...** Porto Alegre: SBMAC, 2004, p. 263. Disponível em: <[http://www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/cd\\_xxvii\\_cnmac](http://www.sbmac.org.br/eventos/cnmac/cd_xxvii_cnmac)>. Acesso em: 20 ago. 2013.

CORÁ, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 1013-1021, 2004.

COSTA, F. P. **Uso da geoestatística e da lógica fuzzy no estudo da variabilidade espacial e temporal da produtividade e da fertilidade do solo em café conilon**. 2011. 64 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2011.

CÔTÉ, J-F.; FOURNIER, R. A.; FRAZER, G. W.; NIEMANN, K. O. A fine-scale architectural model of trees to enhance LiDAR-derived measurements of forest canopy structure. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 166-167, n. 15, p. 72–85, 2012.

DALBEM, M.; DAL'COL, J.; SARCINELLI, T. S.; CARMO, A. P. **Fomento Legal: Cultivando o eucalipto**. Aracruz: Pauta 6, dez. 2008. 50 p.: il. color.

DALCHIAVON, F. C.; PASSOS E CARVALHO, M.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M. Strategy of specification of management areas: rice grain yield as related to soil fertility. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 45-54, 2013.

EFFGEN, E. M.; NAPPO, M. E.; CECÍLIO, R. A.; MENDONÇA, A. R.; MANZOLE, R.; BORCARTE, M. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico sob cultivo de eucalipto e pastagem no sul do Espírito Santo. Piracicaba: **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 375-381, 2012.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p. EMBRAPA CNPS. Documentos, 1.

FERRAZ, G. A. e S.; SILVA, F. M.; COSTA, P. A. N.; SILVA, A. C.; CARVALHO, F. M. Agricultura de precisão no estudo de atributos químicos do solo e da produtividade de lavoura cafeeira. Lavras: **Coffee Science**, v. 7, n. 1, p. 59-67, 2012.

FERREIRA, P. R. F. **Disponibilidade e acúmulo de potássio, cálcio e magnésio em plantações de eucalipto em diversos sítios florestais**. 2008. 146 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2008.

- GARBIN, M. L. **Caracterização das relações entre *Araucaria angustifolia* e nitrogênio inorgânico**. 2005. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; COSTA, L. M.; NEVES, J. C. L. Efeito do método de preparo do solo, em área de reforma, nas suas características, na composição mineral e na produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis*. Viçosa-MG: **Revista Árvore**, v. 27, n. 5, p. 635-646, 2003.
- GAVA, J. L. Efeito da adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 30, cap. 8, p. 89-94, abr. 1997.
- GEOBASES. **Mapas digitais do estado do Espírito Santo**. Governo do estado do Espírito Santo. Sistema Integrado de bases geoespaciais do estado do Espírito Santo. Disponível em: <<http://www.geobases.es.gov.br/portal>>. Acesso em: 12 set. 2013.
- GOOGLE EARTH. **Imagem de satélite da área de estudo**. Google Earth versão 7.1.1.1888. Disponível em: <<http://earth.google.com>>. Acesso em: 12 set. 2013.
- GALLARDO, A. Spatial variability of soil properties in a floodplain forest in northwest Spain. **Ecosystems**, n. 6, p. 564-576, 2003.
- GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, n. 89, p. 1-45, 1999.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R.; ANTONIO, A. M.; ROSA, S. C. D. Geostatistical analysis for soil moisture content under the no tillage cropping system. Piracicaba: **Scientia Agricola**, v. 63, n. 4, p. 341-350, 2006.
- GRESPLAN, S. L. **Produção e eficiência nutricional de clones de eucalipto no norte do Espírito Santo e suas relações com características do solo**. 1996. 81 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1997.
- GULDEN, L. E.; ROSERO, E.; YANG, Z.; RODELL, M.; JACKSON, C. S.; NIU, G.; YE, P. J.-F.; FAMIGLIETTI, J. Improving land-surface model hydrology: Is an explicit aquifer model better than a deeper soil profile? **Geophysical Research Letters**, v. 34, p. L0940: 1-5, 2007.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 561p.
- JUNQUEIRA JÚNIOR, J. A.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; PINTO, D. B. F. Continuidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em sub-bacia hidrográfica de cabeceira. Lavras: **Ciência Agrotécnica**, v. 32, n. 3, p. 914-922, 2008.
- KASTANEK, F.J.; NIELSEN, D.R. Description of soil water characteristics using cubic spline interpolation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 279-283, 2001.
- LAMBERT, S. J.; BOER, G. J. CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. **Climate Dynamics**, v. 17, p. 83–106, 2001.
- LANA, M. do C.; NEVES, J. C. L. Capacidade de suprimento de potássio em solos sob reflorestamento com eucalipto do estado de São Paulo. Viçosa-MG: **Revista Árvore**, v. 18, n. 2, p. 115-122, 1994.

- LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Editora Unesp, 2003. 253 p.: il.
- LANI, J. L. (Coord.). **Atlas de ecossistemas do Espírito Santo**. Vitória: SEMA. Viçosa, MG: UFV, 2008. 504 p.: il. color.
- LEITE, F. P.; SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Alterations of soil chemical properties by eucalyptus cultivation in five regions in the rio Doce valley. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 821-831, 2010.
- LI, J.; HEAP, A. D. **A review of spatial interpolation methods for environmental scientists**. Geoscience Australia, Record 2008/23, 137 p.
- LIMA, W. de P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2. ed. - São Paulo: EDUSP, 1996. 301 p.
- LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, P. C.; OLIVEIRA, R. B.; XAVIER, A. C. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. Viçosa-MG: **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 931-938, 2008.
- LIMA, J. S. S.; SILVA, J. T. O.; OLIVEIRA, R. B.; ALMEIDA, V. S.; VANZO, F. L. Estudo da viabilidade de métodos geoestatísticos na mensuração da variabilidade espacial da dureza da madeira de Paraju (*Manilkara sp.*). Viçosa-MG: **Revista Árvore**, v. 30, n. 4, p. 651-657, 2006.
- LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; SILVA, J. M.. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho Amarelo cultivado em plantio direto. Fortaleza: **Revista Ciência Agrônômica**, v. 44, n. 1, p. 16-23, 2013a.
- LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; SILVA, S. A. Distribuição espacial da matéria orgânica, grau de flocculação e argila dispersa em água em área de vegetação natural em regeneração e pastagem. Viçosa-MG: **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 539-546, 2013b.
- LONDERO, E. K.; SCHUMACHER, M. V.; SZYMCZAK, D. A.; VIERA, M. Exportação e reposição nutricional no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L., em área de segunda rotação. Santa Maria: **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 487-497, 2011.
- LÓPEZ-GRANADOS, F.; JURADO-EXPÓSITO, M.; PEÑA-BARRAGÁN, J. M.; GARCÍA-TORRES, L. Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties. **European Journal of Agronomy**, v. 23, p. 279-289, 2005.
- MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais**. 2003. 143 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- MAILLARD, P.; COSTA-PEREIRA, P. S.; Estimacão da idade da regeneração da vegetação de cerrado a partir de imagens Landsat. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 5, n. 1, p. 34-47, 2011.
- MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase sinóticos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 13, n. 1, p. 53-64, 2009.

- MCCROBERTS, R. E. Estimating forest attribute parameters for small areas using nearest neighbors techniques. **Forest Ecology and Management**, v. 272, p. 3–12, 2012.
- MELO FILHO, J. F.; LIBARDI, P. L. Estabilidade temporal de medidas do teor e do potencial mátrico da água no solo em uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 497-506, 2005.
- MENEZES, I. B.; DUARTE, M. A. Q.; SILVA, W. C.; KIKUTI, H.; NOGUEIRA, N. R. Interpolação Spline usada no cálculo da altura da cana-de-açúcar. **Revista Omnia Exatas**, v. 3, n. 1, p. 17-25, 2010.
- MEROTTO JR, A.; BREDEMEIER, C.; VIDAL, R. A.; GOULART, I. C. G. R.; BORTOLI, E. D.; ANDERSON, N. L. Reflectance indices as a diagnostic tool for weed control Performed by multipurpose equipment in precision agriculture. Viçosa-MG: **Planta Daninha**, v. 30, n. 2, p. 437-447, 2012.
- MORAL, F. J.; TERRÓN, J. M.; SILVA, J. R. M. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. **Soil & Tillage Research**, v. 106, p. 335–343, 2010.
- MORO, L.; FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D.; REISSMANN, C. B. Exportação de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* L. baseada em volume estimado pelo sistema Sispinus. Curitiba: **Floresta**, v. 38, n. 3, p. 465-477, 2008.
- MOTOMIYA, A. V. A.; MOLIN, J. P.; MOTOMIYA, W. R.; VIEIRA, S. R. Spatial variability of soil properties and cotton yield in the Brazilian Cerrado. Campina Grande: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 996–1003, 2011.
- MOULIN, J. P.; SILVA JÚNIOR, R. L. Variabilidade espacial do índice de cone, correlacionada com textura e produtividade. **Engenharia Rural**, [S.l.], v. 14, único, p. 49-58, 2003.
- NEVES, J. C. L. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo**. 2000. 159 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2000.
- NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F. de; ANJOS, L. J. Efeito do alumínio em dois Latossolos de cerrado no crescimento e absorção de nutrientes por mudas de *Eucalyptus spp.* Viçosa-MG: **Revista Árvore**, v. 6, p. 17-28, 1982.
- NOVAIS, R. F. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa-MG: UFV, Departamento de Solos, 1999, 399 p.
- NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Interpretação de análise química do solo para o crescimento e desenvolvimento de *Eucalyptus spp.*: Níveis críticos de implantação e de manutenção. Viçosa-MG: **Revista Árvore**, v. 10, n. 1, p. 105-111, 1986.
- OLIVEIRA, C. M.; NAPPO, M. E.; PASSOS, R. R.; MENDONÇA, A. R. Comparação entre atributos físicos e químicos de solo sob floresta e pastagem. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 7, n. 12, 2008.

- OLIVEIRA, P. C. **Esquema FLUX-SPLINE aplicado em cavidades abertas com convecção natural**. 1997. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.
- OLIVEIRA, R. B.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; PASSOS, R. R.; SILVA, S. A.; SILVA, A. F. Comparação entre métodos de amostragem de solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. Jaboticabal: Engenharia Agrícola, v. 28, p. 176-186, 2008.
- OMRAN, El. E. Improving the prediction accuracy of soil mapping through geostatistics. **International Journal of Geosciences**, v. 3, p. 574-590, 2012.
- PACIULLO, D. S. C.; AROEIRA, L. J. M.; CARVALHO, M. M. Sistemas silvipastoris na pecuária leiteira. **Embrapa CNPGL**, Juiz de Fora. Seção Outras Publicações. Disponível em: [http://www.cnppl.embrapa.br/totem/conteudo/Meio ambiente e bem estar animal/Outras\\_publicacoes/Sistemas\\_silvipastoris\\_na\\_pecuaria\\_leiteira.pdf](http://www.cnppl.embrapa.br/totem/conteudo/Meio ambiente e bem estar animal/Outras_publicacoes/Sistemas_silvipastoris_na_pecuaria_leiteira.pdf). Acesso em: 7 fev. 2014.
- PAIVA, H. N. Implantação de florestas econômicas. In: OLIVEIRA, J. T.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Ed.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Jerônimo Monteiro: Suprema Gráfica e Editora, 2007. 420 p.
- PAVÃO, C. G.; FRANÇA, G. S.; MAROTTA, G. S.; MENEZES, P. H. B. J.; NETO, G. B. S.; ROIG, H. L. Spatial interpolation applied a crustal thickness in Brazil. **Journal of Geographic Information System**, v. 4, p. 142-152, 2012.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Ed. Agropecuária, 2002. 478 p.
- PEREIRA, D. P. **Análise técnica e de custos de povoamento de eucalipto sob preparo manual e mecanizado do solo em área declivosa no sul do Espírito Santo**. 2010. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2010.
- PEREIRA, D. P.; REBELLO, A. P. B.; FIEDLER, N. C.; BOLZAN, H. M. R. Atividades silviculturais em povoamentos de eucalipto em áreas inclinadas. In: RODRIGUES, B. P.; FIEDLER, N. C.; BRAZ, R. L. (Org.). **Tópicos em ciências florestais**. Alegre, ES: CAUFES, 2009. 140 p.
- QUADRO, M. F. L.; DIAS, M. A. F. S.; HERDIES, D.; GONÇALVES, L. G. G.. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, n. 2, p. 152-162, 2012.
- RÄISÄNEN, J. Objective comparison of patterns of CO<sub>2</sub> induced climate change in coupled GCM experiments. **Climate Dynamics**, v. 13, p. 197-211, 1997.
- REATTO, A.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ V., V. H.; RESENDE, M.; KER, J. C.; COSTA, L. M. Caracterização mineralógica, potencial de reserva e sustentabilidade agrícola de alguns sítios florestais de eucalipto da região do vale do rio Doce (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 255-266, 1998.
- REIS, M. G. F.; BARROS, N. F. Ciclagem de nutrientes em plantios de eucalipto. In: BARROS, N. F. & NOVAIS, R. F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa-MG: Ed. Folha de Viçosa, p. 265-302, 1990.

- REZENDE, F. C.; RIBEIRO, V. B.; ÁVILA, L. F.; FARIA, M. A.; SILVA, E. L. Variabilidade espacial do pH em área com cafeeiro fertirrigado e sistema tradicional. Lavras: **Coffee Science**, v. 7, n. 3, p. 198-207, 2012.
- ROBINSON, T. P.; METTERNICHT, G. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 50, p. 97-108, 2006.
- ROSA FILHO, G.; PASSOS E CARVALHO, M.; MONTANARI, R.; SILVA, J. M.; SIQUEIRA, G. M.; ZAMBIANCO, E. C. Variabilidade espacial de propriedades dendrométricas do eucalipto e de atributos físicos de um Latossolo Vermelho. Campinas: **Bragantia**, v. 70, n. 2, p. 439-446, 2011.
- SANCHEZ, B. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARACAT NETO, J.; SIQUEIRA, D. S.; SOUZA, Z. M. Mapeamento das formas do relevo para estimativa de custos de fertilização em cana-de-açúcar. Jaboticabal: **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 2, p. 280-292, 2012.
- SANCHEZ, B. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. Campinas: **Bragantia**, v. 68, n.4, p. 1095-1103, 2009.
- SANDWELL, D. T. Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data. **Geophysical Research Letters**, v. 2, p. 139-142, 1987.
- SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Eficiência nutricional e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do Estado de São Paulo. Viçosa-MG: **Revista Árvore**, v. 26, p. 447-457, 2002.
- SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; LEITE, H. G.; COMERFORD, N. B. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2723-2733, 2008, Número Especial.
- SILVA, L. V. M. **Variabilidade espacial da matéria orgânica em um Latossolo Vermelho Amarelo sob café conilon**. 2010. 83 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2010.
- SILVA, A. F.; HALMEMAN, R. J.; ZIMBACK, C. R. L. Dependência espacial de atributos diagnósticos para delimitação de classes de solos. Rio Claro-SP: **Revista Geociências**, v. 32, n. 1, p. 93-100, 2013.
- SILVA, A. F.; LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, R. B.. Métodos de interpolação para estimar o ph em solo sob dois manejos de café arábica. **Idesia**, v. 28, n. 2. P. 61-66, 2010a.
- SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; JHAM, G.; BARROS, N. F.; GEBRIM, F. O.; NUNES, F. N.; NEVES, J. C. L.; LEITE, F. P. Responses of eucalypt species to aluminum: The possible involvement of low molecular weight organic acids in the Al tolerance mechanism. **Tree Physiology**, v. 24, p. 1267-1277, 2004.
- SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; TEIXEIRA, M. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho Amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 15-22, 2010b.
- SILVA, L. G.; MENDES, I. C.; REIS JUNIOR, F. B.; FERNANDES, M. F.; DE MELO, J. T.; KATO, E. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de cerrado

em plantio de espécies florestais. Brasília: **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 6, p. 613-620, 2009.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. Campinas: **Bragantia**, v. 67, n. 1, p. 203-211, 2008.

SOARES, V. P.; ZANETI, L. Z.; SANTOS, N. T.; LEITE, H. G. Análise espacial da distribuição de cigarras (*Quesada gigas* Oliver) em povoamentos de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) na região de Dom Eliseu, PA. Viçosa-MG: **Revista Árvore**, v. 32, n. 12, p. 251-258, 2008.

SOUZA, G. S.. **Uso de indicadores de fertilidade do solo na análise da degradação de uma área sob pastagem utilizando geoestatística**. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2009.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; XAVIER, A. C. Aplicação de lógica *fuzzy* e geoestatística na análise da fertilidade de um solo sob pastagem. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 40, n. 3, p. 323-330, 2009.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; ROCHA, W. S. D. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. Curitiba: **Scientia Agraria**, v. 11, n. 1, p. 73-81, 2010.

SUN, B.; ZHOU, S.; ZHAO, Q. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. **Geoderma**, n. 115, p. 85-89, 2003.

TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. 7, p. 7183-7192, 2001.

TUOVINEN, J-P.; EMBERSON, L.; SIMPSON, D. Modelling ozone fluxes to forests for risk assessment: status and prospects. **Annals of Forest Science**, v. 66, p. 1-14, 2009.

TURNER, J.; LAMBERT, M. J. Nutrient cycling in age sequences of two Eucalyptus plantation species. **Forest Ecology and Management**, v. 255, p. 1701–1712, 2008.

VENEGAS, V. H. A.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. *In*: Ribeiro et al. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação**. Viçosa-MG: Imprensa Universitária, p. 25-32, 1999.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 1991. 449 p.

VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo roxo de Campinas (SP). Campinas: **Bragantia**, v. 56, n. 1, p. 1-13, 1997.

\_\_\_\_\_. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. *In*: Novais et al (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-54, 2000.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, n. 51, v. 3, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 54, n. 2, p. 405-412, 1995.

VIEIRA, S. R.; LOMBARDI NETO, F.; BURROWS, I. T. Mapeamento da chuva máxima provável para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 1, p. 93-98, 1991.

WEB OF SCIENCE. **Citation Report**. Disponível em: <[http://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=4BUgRgm3bVLZ5odM7T6&search\\_mode=GeneralSearch&prID=12f8fac8-a231-45d2-a95e-64bef46e648b](http://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=4BUgRgm3bVLZ5odM7T6&search_mode=GeneralSearch&prID=12f8fac8-a231-45d2-a95e-64bef46e648b)>. Acesso em: 2 fev. 2014.

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do comprimento de raízes finas em *Eucalyptus urophylla* s.t. Blake no município de Santa Maria-RS. Viçosa-MG: **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 177-183, 2003.

XAVIER, A. C.; CECÍLIO, R. A.; LIMA, J. S. S. Módulos em matlab para interpolação espacial pelo método de krigagem ordinária e do inverso da distância. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, n. 1, p. 67-76, 2010.

ZANUNCIO, J. C.; JÚNIOR, P. M.; SANTOS, G. P. Impacto do cultivo mínimo sobre insetos associados à eucaliptocultura. In: SEMINÁRIO SOBRE CULTIVO MÍNIMO DO SOLO EM FLORESTAS, 1, 1995, Curitiba, **Anais...** Curitiba: IPEF, 1995, p. 117-121.

ZEN, S.; YONEZAWA, J. T.; FELDEBERG, J. E. Implantação de florestas no sistema de cultivo mínimo. In: SEMINÁRIO SOBRE CULTIVO MÍNIMO DO SOLO EM FLORESTAS, 1, 1995, Curitiba, **Anais...**, Curitiba: IPEF, 1995, p. 65-72.

**ANEXOS**

**Anexo 1** – Esquema de fertilização e aporte de Ca e Mg feito pelo Programa Nutricalc e para atender demanda de produtividade de  $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$

ANO	FNR	PLANTIO	COBERTURA	CALCÁRIO	NPK1
2008	300	120	225	-	-
2009	-	-	-	-	350
2010	-	-	-	2000	-

Nota: FNR: Fosfato Natural Reativo ( $\text{kg ha}^{-1}$ );

PLANTIO: Formulado NPK 06-30-06 + 1,0 % Zn+ 0,3 % Cu ( $\text{g planta}^{-1}$ ) ou dosagem correspondente de 04-17-04 + Zn e Cu para preparo em cova;

COBERTURA: Formulado NK 12-00-20 + 0,7 % B ( $\text{g planta}^{-1}$ );

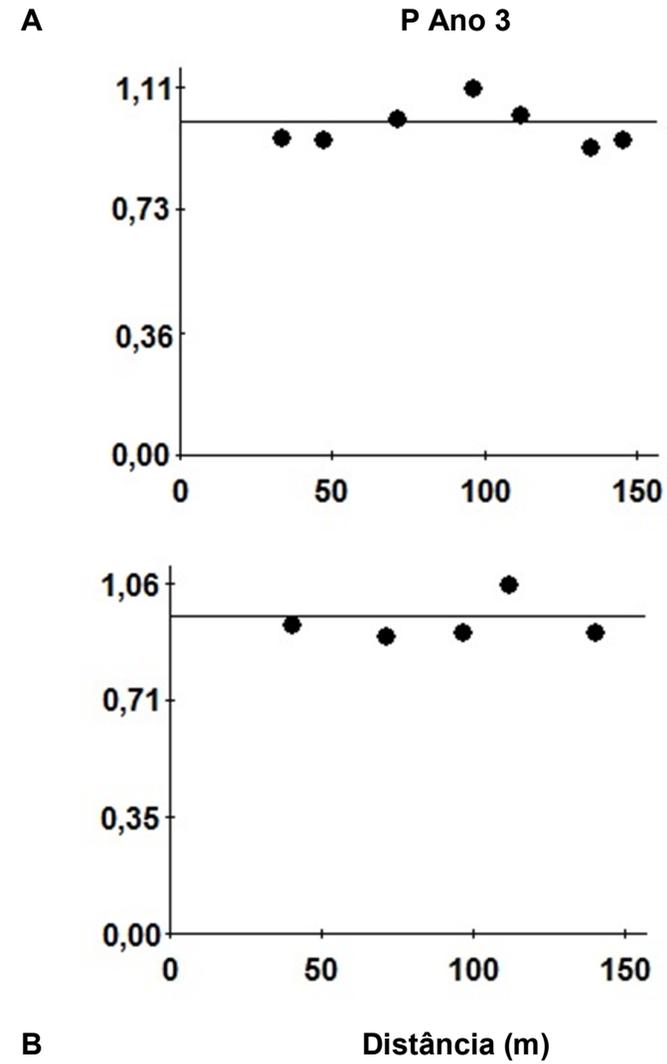
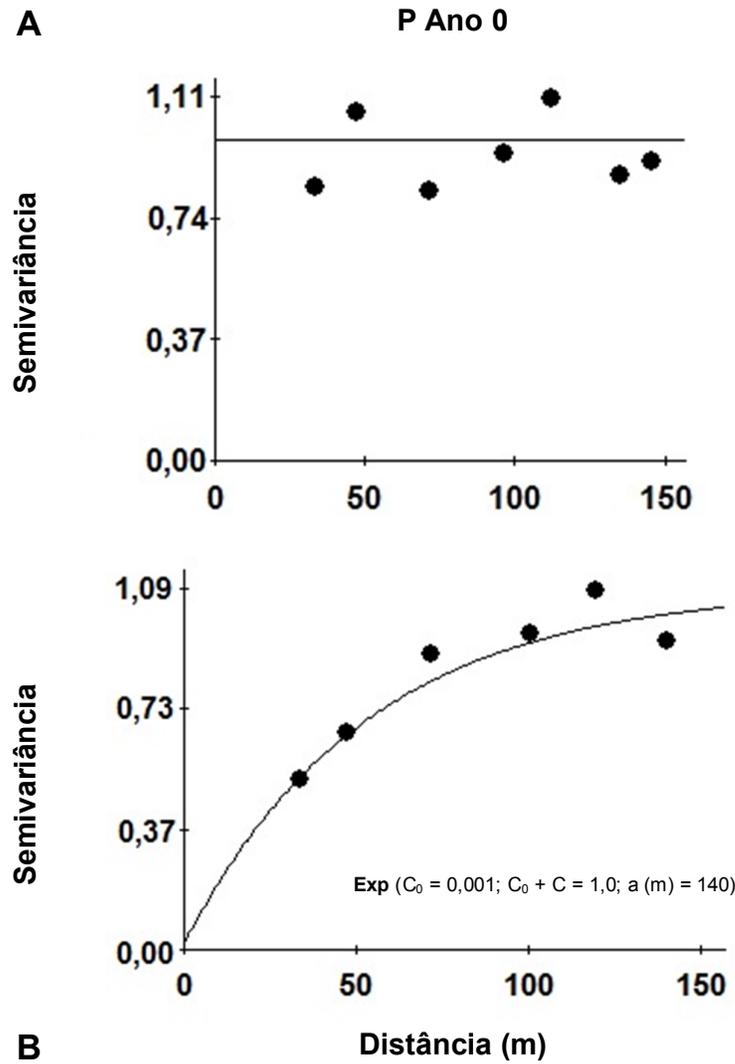
CALCÁRIO: Calcário dolomítico ( $\text{kg ha}^{-1}$ ); e

NPK1: Formulado 10-00-30 ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) ou dosagem correspondente do formulado 10-10-30 quando não se aplica fosfato natural.

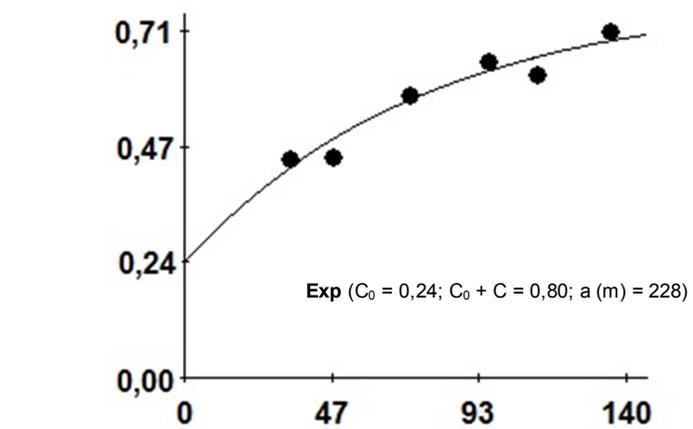
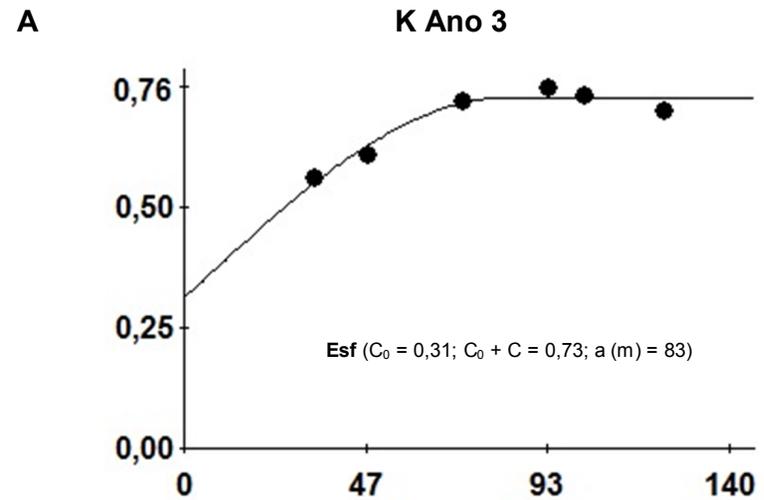
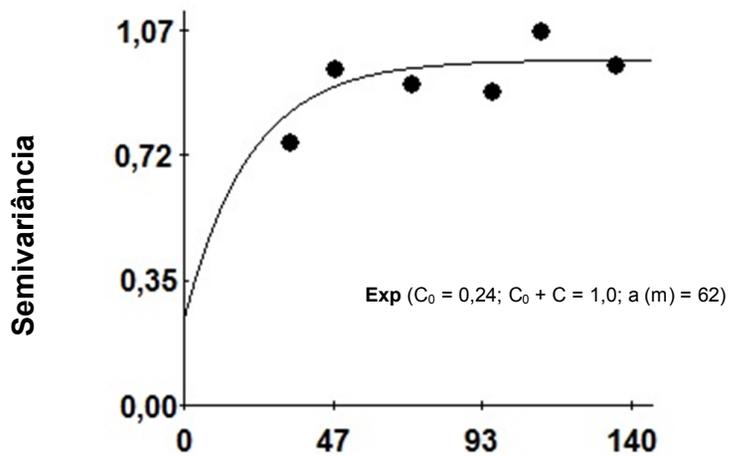
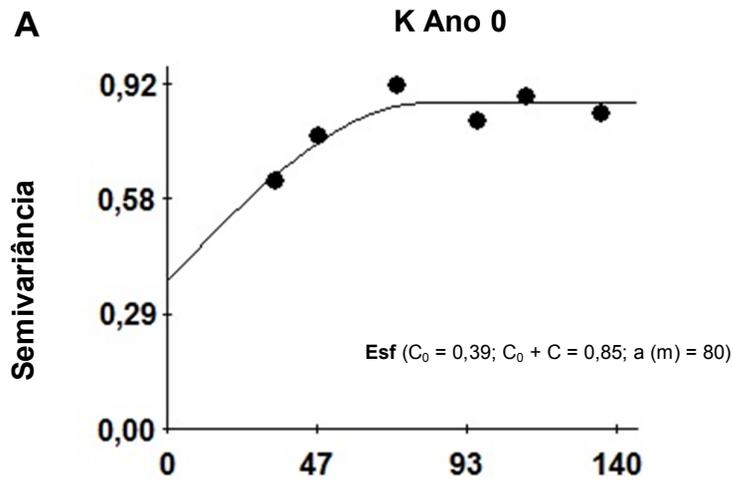
**Observações:** Em áreas de preparo manual com coveamento e sem aplicação de fosfato, a adubação de plantio deve ser feita com o formulado 04-17-04 + Zn e Cu, na dose de  $360 \text{ g cova}^{-1}$ . Nessas áreas, necessariamente, será utilizado o formulado 10-10-30 na adubação de manutenção.

PLANTIO: Fator de conversão de NPK 06-30-06 para 04-17-04 = 3.

NPK1: Fator de conversão do formulado 10-00-30 ( $\text{kg/ha}$ ) para o formulado 10-10-30 = 1.



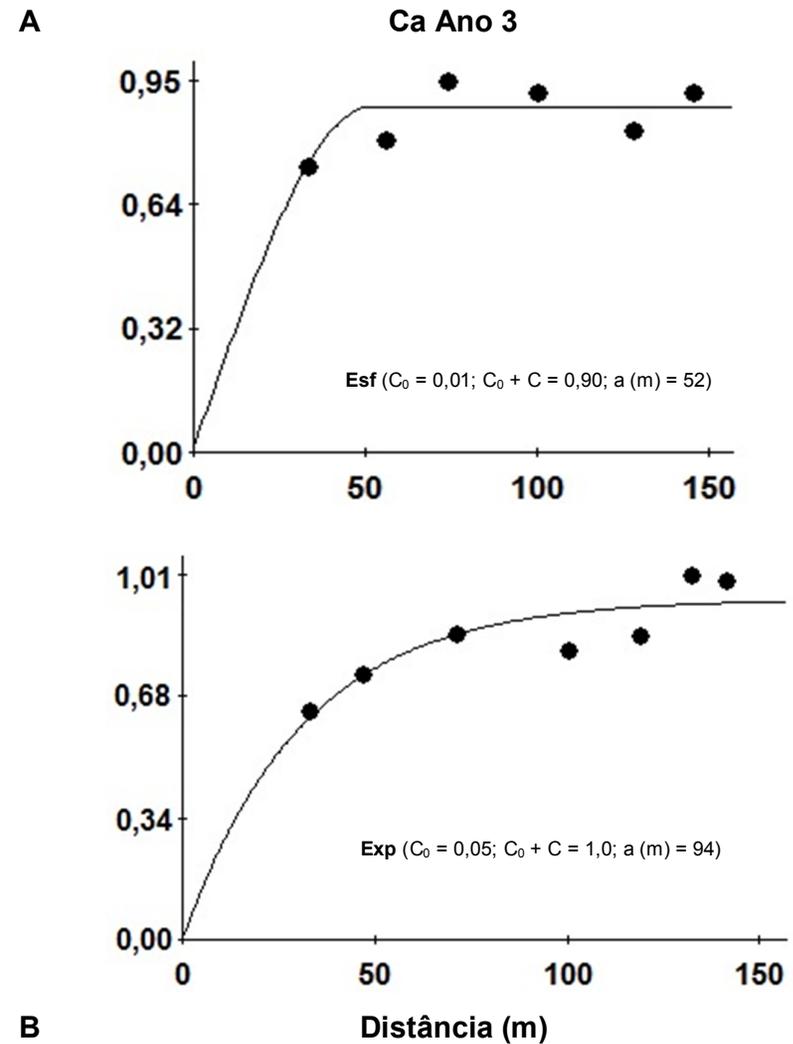
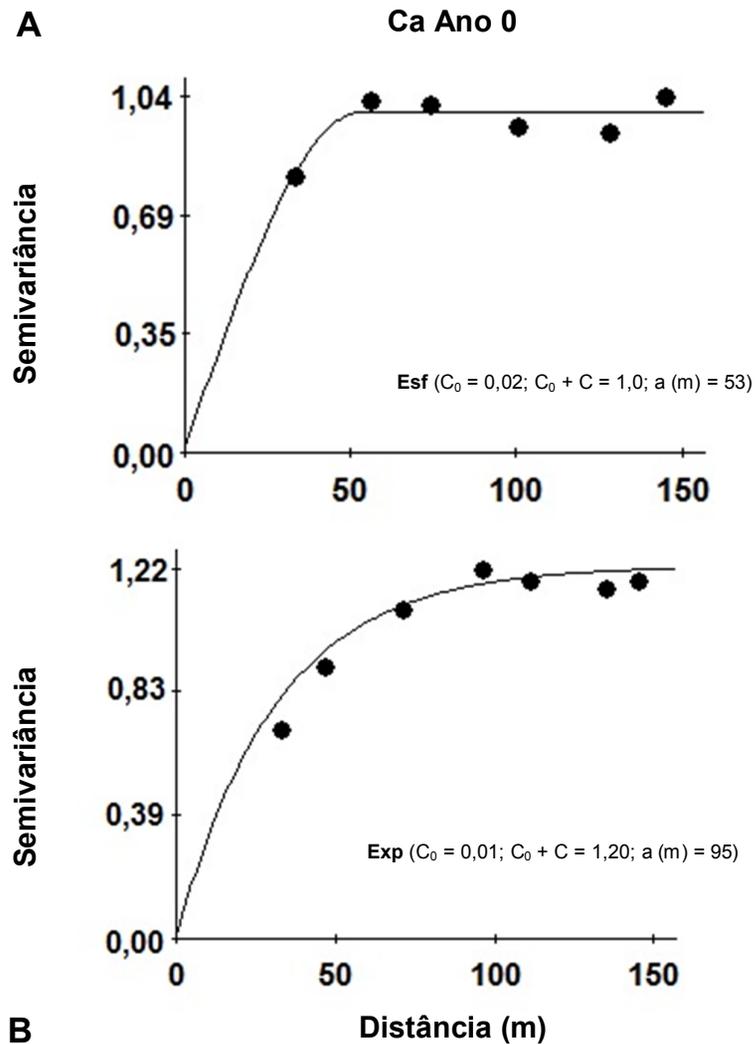
**Anexo 2 – Semivariogramas escalonados para o fósforo: (A) = Profundidade 0-0,2 m; (B) = Profundidade 0,2-0,4 m.**



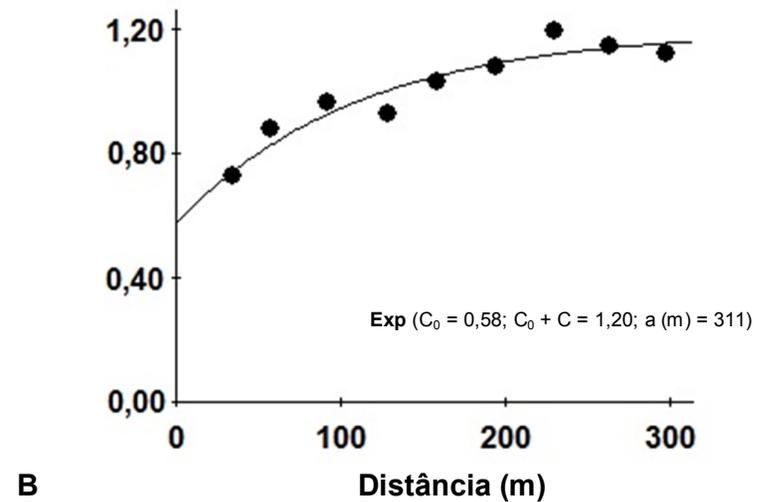
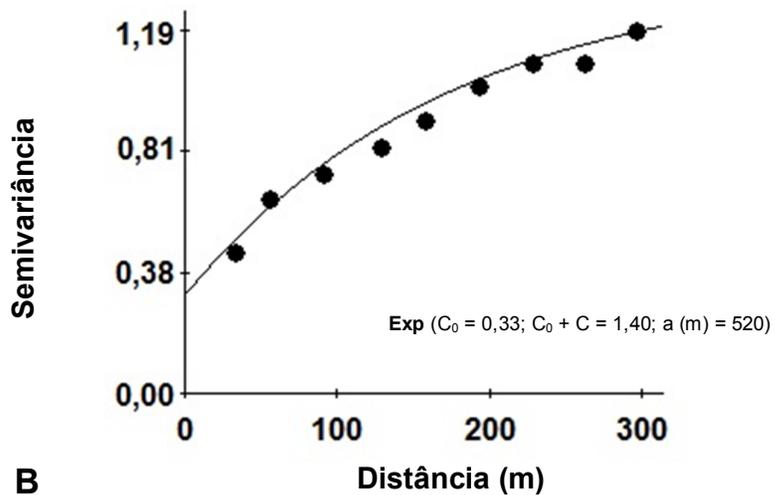
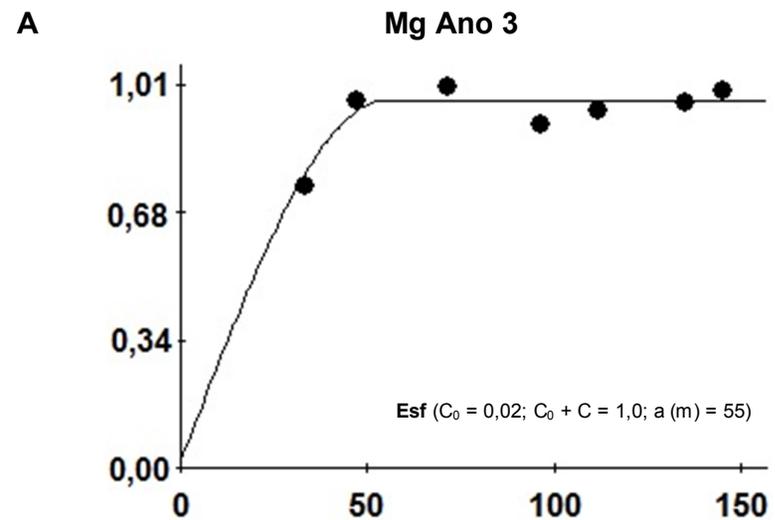
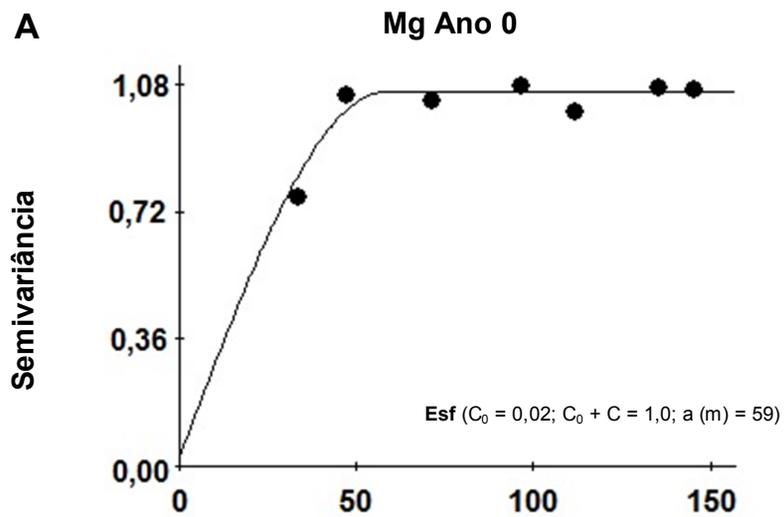
**B** **Distância (m)**

**B** **Distância (m)**

**Anexo 3 – Semivariogramas escalonados para o potássio: (A) = Profundidade 0-0,2 m; (B) = Profundidade 0,2-0,4 m.**



Anexo 4 – Semivariogramas escalonados para o cálcio: (A) = Profundidade 0-0,2 m; (B) = Profundidade 0,2-0,4 m.



**Anexo 5** – Semivariogramas escalonados para o magnésio: (A) = Profundidade 0-0,2 m; (B) = Profundidade 0,2-0,4 m.

**Anexo 6** – Modelos interpolados e respectivos parâmetros estatísticos gerados pelos *Softwares* GS+ e Matlab para os atributos: Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio, nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto, na profundidade de 0-0,2 m

Atributo	$\sigma_r$	CV (%)	Ano	Software	Modelo	Parâmetros do semivariograma				CV (%)	Validação cruzada			
						$C_0$	$C + C_0$	a (m)	$R^2$		$\sigma_f$	r	p-valor	bias
Fósforo	0,175	10,5	0	GS+	Efeito pepita puro	1,0	1,0	-	-	-	-	-	0,26	-
				Matlab	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75
	0,778	21,0	3	GS+	Efeito pepita puro	1,0	1,0	-	-	-	-	-	0,04	-
				Matlab	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	0,70
Potássio	4,232	26,7	0	GS+	Esférico	0,4	0,9	80	0,84	11,2	1,756	0,35	***	-0,03
				Matlab	Exponencial	0,8	1,1	235	0,12	15,9	2,505	0,35	***	-0,04
	3,914	22,4	3	GS+	Esférico	0,3	0,7	83	0,95	13,9	2,429	0,61	***	-0,03
				Matlab	INV3	-	-	-	-	13,0	2,239	0,58	***	-0,22
Cálcio	0,121	42,8	0	GS+	Esférico	0,02	1,0	53	0,56	14,6	0,041	0,29	P < 0,01	-0,003
				Matlab	Spline	-	-	-	-	35,1	0,088	0,43	***	-0,002
	0,061	34,8	3	GS+	Esférico	0,01	0,9	52	0,51	15,3	0,026	0,30	P < 0,01	-0,005
				Matlab	Exponencial	0,7	1,2	114	0,10	21,6	0,038	0,32	P < 0,01	-0,002
Magnésio	0,068	54,1	0	GS+	Esférico	0,02	1,0	59	0,90	23,0	0,028	0,41	***	-0,004
				Matlab	Exponencial	1,0	1,0	168	0,15	30,7	0,038	0,39	***	0,008
	0,088	61,2	3	GS+	Esférico	0,02	1,0	55	0,83	29,7	0,041	0,43	***	-0,004
				Matlab	INV1	-	-	-	-	28,4	0,039	0,34	***	-0,005

Nota: \*\*\* = P < 0,001. Os modelos “Efeito pepita puro” e “Média” se equivalem, pois o mapa temático final será gerado pela média aritmética do atributo. INV1 e INV3 = inverso da distância, potências 1 e 3, respectivamente.

= modelo escolhido.

**Anexo 7** – Modelos interpolados e respectivos parâmetros estatísticos gerados pelos *Softwares* GS+ e Matlab para os atributos: Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio, nas idades de zero (implantação) e três anos do povoamento de eucalipto, na profundidade de 0,2-0,4 m

Atributo	$\sigma_r$	CV (%)	Ano	Software	Modelo	Parâmetros do semivariograma			R <sup>2</sup>	CV (%)	Validação cruzada			
						C <sub>0</sub>	C + C <sub>0</sub>	a (m)			$\sigma_f$	r	valor-p	bias
Fósforo	0,235	17,0	0	GS+	Exponencial	0,001	1,0	140	0,91	11,7	0,161	0,69	***	0,0
				Matlab	Exponencial	0,7	1,1	117	0,47	12,7	0,176	0,68	***	0,0
	0,567	25,1	3	GS+	Efeito pepita puro	1,0	1,0	-	-	-	-	-	0,83	-
				Matlab	Média	-	-	-	-	-	-	-	0,50	-
Potássio	3,525	29,4	0	GS+	Exponencial	0,2	1,0	62	0,60	12,0	1,428	0,34	***	-0,02
				Matlab	INV1	-	-	-	-	10,0	1,201	0,32	P<0,01	0,01
	3,611	28,0	3	GS+	Exponencial	0,2	0,8	228	0,94	20,0	2,667	0,73	***	-0,01
				Matlab	Pol. Linear	-	-	-	-	19,7	2,542	0,68	***	0,01
Cálcio	0,136	59,7	0	GS+	Exponencial	0,01	1,2	95	1,0	32,0	0,073	0,57	***	0,0
				Matlab	Exponencial	0,9	1,1	117	0,31	39,3	0,090	0,55	***	0,0
	0,047	50,0	3	GS+	Exponencial	0,1	1,0	94	1,0	27,0	0,025	0,46	***	0,0
				Matlab	INV1	-	-	-	-	16,0	0,014	0,35	***	0,0
Magnésio	0,040	68,5	0	GS+	Exponencial	0,3	1,4	520	0,98	44,0	0,025	0,55	***	0,0
				Matlab	Pol. Linear	-	-	-	-	38,0	0,022	0,50	***	0,0
	0,038	48,6	3	GS+	Exponencial	0,6	1,2	311	0,90	20,6	0,016	0,40	***	0,0
				Matlab	Pol. Linear	-	-	-	-	22,3	0,017	0,38	***	0,0

Nota: \*\*\* = P < 0,001. Os modelos “Efeito pepita puro” e “Média” se equivalem, pois o mapa temático final será gerado pela média aritmética do atributo. INV1 = inverso da distância, potência 1. Pol. Linear = Polinomial Linear.

= modelo escolhido.