

**MODELAGEM DA INFLUÊNCIA DE
VARIÁVEIS AMBIENTAIS NO
CRESCIMENTO E NA PRODUÇÃO DE
Eucalyptus sp.**

MARIA ZÉLIA FERREIRA

2009

MARIA ZÉLIA FERREIRA

**MODELAGEM DA INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS
AMBIENTAIS NO CRESCIMENTO E NA PRODUÇÃO
DE *Eucalyptus* sp.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, para a obtenção do título de “Doutor”.

Orientador:
Prof. José Roberto Soares Scolforo

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Ferreira, Maria Zélia.

Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e na produção de *Eucalyptus* sp / Maria Zélia Ferreira. – Lavras : UFLA, 2009.

101 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

Orientador: José Roberto Soares Scolforo.

Bibliografia.

1. Modelos empíricos. 2. Modelos baseados em processos. 3. Modelos híbridos. 4. Crescimento florestal. 5. Variáveis ambientais.
I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 634.92

MARIA ZÉLIA FERREIRA

**MODELAGEM DA INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS
AMBIENTAIS NO CRESCIMENTO E NA PRODUÇÃO
DE *Eucalyptus* sp.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 20 de novembro de 2009

Prof. Antônio Donizette de Oliveira UFLA

Prof. Carlos Rogério de Mello UFLA

Prof. José Márcio de Mello UFLA

Prof. Ruben Delly Veiga UFLA

Prof. José Roberto Soares Scolforo
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

Aos meus pais, Vicente e Maria José Ferreira, pelo amor incondicional, pela paciência, pela dedicação, pela presença constante e por sempre acreditarem em mim.

Aos meus irmãos, Marcos e Georgina; Marluci e Zé Geraldo; Márcia e Amarildo, e Lela que, cada um ao seu modo, me incentivaram, ajudaram, torceram, acreditaram e me fortaleceram para que chegasse até aqui.

Aos meus sobrinhos: André, Flavio, Bárbara, Samuel e Gabriela, pela graça, bondade, gratuidade, amizade, incentivo e alegria contagiante.

DEDICO

“É graça divina começar bem. Graça maior persistir na caminhada certa. Mas graça das graças é não desistir nunca.”

Dom Hélder Câmara

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. José Roberto Scolforo, pelos anos de orientação e imensuráveis ensinamentos.

Ao Prof. José Márcio de Mello, pelo constante incentivo, contribuição sempre entusiástica e amizade.

Aos professores de graduação e pós-graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Lavras, pelos ensinamentos.

Aos colegas e alunos com quem convivi, por me ajudarem a ser uma pessoa e uma profissional melhor.

Ao Jose Márcio Cardoso, pela confiança em mim depositada.

Aos amigos Adriana Assis, Claudio Thiersch e Thais Ferreira, pela ajuda sempre constante e por sua excelência profissional, na qual sempre me inspiro.

À Vanete, pela amizade incondicional, paciência e ensinamentos

Aos amigos Angela, Odherbal, Renato e Samuel, pelo incentivo, ajuda e amizade.

Ao amigo Bodinho, por estar sempre presente e disposto a ajudar.

Aos amigos e colegas de trabalho que contribuíram com dados, informações ensinamentos, incentivo e amizade: David, Marina, Arthur, Sérgio Ricardo, José Henrique, Fabiano, Luciano Dutra, Sérgio Liotte, Jair, Humberto, Marco Aurélio e Diacuí.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1	1
1 Introdução Geral	1
2 Referências Bibliográficas	5
CAPÍTULO 2: Relação entre Variáveis Ambientais e Biométricas do Povoamento no Sul do Estado da Bahia	8
1 Resumo	8
2 Abstract	9
3 Introdução	10
4 Material e métodos	13
4.1 Localização	13
4.2 Base de dados	14
4.2.1 Inventário florestal contínuo	14
4.2.2 Dados climáticos	16
4.2.3 Balanço hídrico do solo	17
4.2.4 Combinação das variáveis ambientais com dados do inventário	21
4.2.5 Correlação entre as variáveis ambientais e incremento corrente anual	21
4.3 Identificação das variáveis mais importante para modelos de crescimento e produção	21
5 Resultados e Discussões	24
5.1 Estatísticas descritivas das variáveis ambientais e biométricas	24
5.2 Caracterização da disponibilidade hídrica no período estudado	25
5.3 Avaliação da correlação entre as variáveis ambientais e do povoamento	29

5.4 Valores ótimos das variáveis ambientais para o crescimento florestal .	32
5.4.1 Efeito da temperatura	32
5.4.2 Efeito da radiação	37
5.4.3 Efeito da precipitação	38
5.4.4 Efeito do déficit e do excedente hídrico	41
5.5 Seleção de variáveis para construção de modelos biométricos com variáveis ambientais	43
6 Conclusões	48
7 Referências Bibliográficas	49
CAPÍTULO 3: Inclusão das Variáveis Ambientais nos Modelos de Crescimento e Produção	52
1 Resumo	52
2 Abstract	53
3 Introdução	54
4 Material e Métodos	56
4.1 Localização	56
4.2 Base de dados	57
4.2.1 Inventário florestal contínuo	57
4.2.2 Dados climáticos	59
4.2.3 Dados de solo	60
4.2.4 Balanço hídrico do solo	61
4.2.5 Combinação das variáveis ambientais com dados do inventário	65
4.3 Inclusão das variáveis ambientais nos modelos de crescimento e produção	66
4.3.1 Modelo de classificação de sítio	66
4.3.1.1 Seleção das variáveis para compor o modelo	67
4.3.1.2 Modelo de crescimento e produção	71
4.3.2 Modelo de área basal	72

5 Resultados e Discussões	73
5.1 Inclusão das variáveis no modelo de sítio	73
5.1.1 Ajuste do modelo sem variáveis ambientais	73
5.1.2 Seleção das variáveis ambientais	76
5.1.3 Ajuste do modelo com variáveis ambientais	78
5.1.4 Estimativas de volume	84
5.2 Inclusão das variáveis no modelo de área basal	87
5.2.1 Ajuste do modelo sem variáveis ambientais	87
5.2.2 Seleção das variáveis ambientais	89
5.2.3 Ajuste do modelo com variáveis ambientais	90
5.2.4 Estimativas volumétricas	94
5.3 Comparação das metodologias utilizadas para inclusão de variáveis ambientais em modelos de crescimento e produção.....	97
6 Conclusões	98
7 Referências Bibliográficas	99

RESUMO

FERREIRA, Maria Zélia. **Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e na produção de *Eucalyptus* sp.** 2010. 101p. Tese (Doutorado em Florestas de Produção)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.¹

O presente trabalho objetivou unir os pontos positivos de duas tendências de modelagem: modelos empíricos e modelos baseados em processos. Para tanto, o mesmo foi dividido em dois capítulos. No primeiro objetivou-se analisar o efeito das variações ambientais no crescimento florestal e selecionar variáveis significativas para serem utilizadas em modelos de crescimento e produção híbridos. No segundo capítulo o objetivo foi testar diferentes formas de inclusão das variáveis ambientais nos modelos de crescimento e produção para o povoamento. A área de estudo está localizada no extremo sul do estado da Bahia, compreendendo uma área de plantio de aproximadamente, 96.000 ha de *Eucalyptus urograndis*. A base de dados para o estudo foi composta por dados dendrométricos provenientes do Inventário Florestal Contínuo, dados climáticos oriundos de estações meteorológicas e dados edáficos advindos de classificação de solos. O período estudado compreendeu os anos de 1994 a 2006. Para relacionar as variáveis dendrométricas com as variáveis climáticas utilizou-se da correlação linear, análise de componentes principais e gráficos de dispersão. A inclusão das variáveis ambientais nos modelos de crescimento e produção foi feito por duas maneiras: modelo de índice de sítio e modelo de área basal. Os principais resultados foram: a) para a região em estudo, há correlação entre o incremento corrente anual em altura dominante, área basal e volume com as variáveis do ambiente; b) os maiores valores de correlação linear e incremento, tanto para área basal, altura dominante e volume foram: precipitação mensal, déficit e excedente hídrico; c) as variáveis que apresentaram maior significância para serem utilizadas na construção de modelos híbridos foram: excedente hídrico, precipitação, temperatura média e déficit de pressão de vapor do ar; d) a utilização do índice de sítio, estimado pelo modelo com variáveis ambientais, no modelo de crescimento e produção, melhorou a dispersão dos resíduos e a precisão do modelo. O erro padrão da estimativa foi de 15,08m³/ha; e) a utilização da área basal projetada por meio do modelo com variáveis ambientais em um modelo volumétrico melhorou em 9,3% a precisão do mesmo, contudo, a tendência de superestimar os maiores volumes se manteve. O erro padrão da estimativa foi de 30,70m³/ha.

Palavras-chave: modelos empíricos, modelos baseados em processos, modelos híbridos, crescimento florestal, variáveis ambientais.

¹ Orientador: José Roberto Scolforo – UFLA

ABSTRACT

FERREIRA, Maria Zélia. **Modeling the Influence of Environmental Variables on Growth and Yield of *Eucalyptus sp.*** 2010. 101p. (Thesis - PhD in Forest Engineering)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.¹

This study aimed to join the positive points of two trends in modeling: empirical models and process-model based. Then, it was divided into two chapters. In the first, the aimed to analyze the effect of environmental changes on forest growth and select significant variables for use in hybrids models of growth and yield. In the second chapter aimed to test different ways of including environmental variables in models of growth and yield. The study area is located in the extreme south of Bahia state, with a planting area of approximately 96,000 ha of *Eucalyptus urograndis*. The database for the study consisted of dendrometric data from the Forest Inventory; climate data from weather stations and edaphic data from soil classification. The study's period was between 1994 and 2006. For analyze of the dendrometric with climatic variables we used the linear correlation, Principal Component Analysis and scatter charts. The inclusion of environmental variables into models of growth and yield was done by two ways: site index model and basal area model. The main results were: a) for this region, we found correlation between dominant height, basal area and volume annual increment with the environment variables, b) the highest correlation values between basal area, dominant height and volume were: rainfall, water surplus and water deficit; c) the variables that showed the highest significance for use in hybrid models were: water surplus, rainfall, temperature and vapor pressure deficit; d) the use of the site index, estimated by the model with environmental variables in the model of growth and production, improved the precision of the model. The standard error of estimate was 15.08 m³/ha; e) the use of basal area projected by the model with environmental variables in a model volume improved by 9.3% accuracy, however, tend to overestimate the higher volumes remained. The standard error of estimate was 30.70 m³/ha.

Keywords: empirical models, process-based models, hybrid models, forest growth, environmental variables.

¹ Supervisor: José Roberto Scolforo – UFLA

CAPÍTULO 1

MODELAGEM DA INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS NO CRESCIMENTO E NA PRODUÇÃO DE *Eucalyptus* sp.

1 INTRODUÇÃO GERAL

O manejo florestal constitui-se de um conjunto de tomadas de decisões de ordem estratégica, tática e operacional. Independente do nível, estas decisões devem ser suportadas em modelos matemáticos (Almeida et al., 2003) responsáveis por estimar a produção ao longo do tempo. Dessa forma, quanto mais precisos forem os modelos, melhores serão as decisões, sejam elas de ordem ambiental, social ou econômica.

São vários os tipos de modelos destinados à estimativa do fluxo de produção ao longo do tempo. Entre eles se destacam duas tendências: os modelos empíricos e os modelos baseados em processos ecofisiológicos.

Os modelos baseados em processos estimam o crescimento incorporando todos os processos fisiológicos que o governam. Nestes, busca-se modelar as causas para se prever o 'efeito' (crescimento), são mais complexos e tendem a ser mais generalistas. Já os modelos empíricos, biométricos ou descritivos utilizam dados do inventário florestal, medição do 'efeito' e os tratam estatisticamente, visando descrever o comportamento de sistemas particulares sob estreita amplitude de condições.

Os modelos empíricos sempre foram a ferramenta padrão no manejo florestal, uma vez que reproduzem muito bem as situações do mundo real. No entanto, Burkhart (1997), Landsberg (2003) e Maestri (2003) ressaltam que sua eficiência se dá estritamente dentro da base de dados considerada na sua

formulação e que os mesmos não podem simular resultados sobre novas condições de ambiente ou de manejo.

Além destas questões, tem-se notado o surgimento de novas demandas por informações específicas, por parte do planejamento, silvicultura e pesquisa florestal, as quais informações não podem ser esclarecidas pelos modelos empíricos. Entre essas novas demandas destaca-se a análise do crescimento florestal, em que se deseja saber se o sucesso ou o insucesso de determinada floresta se devem a uma questão climática ou a alguma questão ligada ao manejo. Especificamente para o planejamento florestal, as novas demandas são por conhecer o potencial produtivo de áreas sem eucalipto, visando novas aquisições; realizar a classificação da floresta em classes de capacidade produtiva para o planejamento de longo prazo e também conhecer os riscos existentes nos cenários gerados em face de alterações sazonais no clima por fenômenos como o *El Niño* e *La Niña*.

Estes fatos, ligados ao maior conhecimento e entendimento dos processos fisiológicos que regulam o crescimento das árvores, nos levam a pensar em uma nova linha de modelagem: os modelos baseados em processos ecofisiológicos.

De acordo com Abreu (2000), essa nova linha de modelagem tem evoluído consideravelmente nos estudos de interação planta x solo x atmosfera, conferindo uma visão mais generalista e fisiologicamente embasada para a estimativa de crescimento. Contudo, existem sérias dificuldades e limitações para a utilização desses modelos, em termos operacionais. Para McMurtrie & Landsberg (1992), a mais séria limitação é sua alta demanda por *inputs*: dados climáticos, edáficos e de fisiologia das plantas. Landsberg (2003) ainda acrescenta que estes *inputs*, ou parâmetros, são pouco conhecidos e suas estimativas não são tão confiáveis, na prática, como os parâmetros dos modelos

empíricos. Outro ponto que restringe o uso dos modelos processuais é o fato de os resultados, *outputs*, não serem imediatamente úteis ao manejo florestal.

Diante do exposto, as duas linhas de modelagem apresentam pontos positivos e negativos e é crescente a opinião de que devem ser utilizadas de forma complementar, ou seja, devem-se construir modelos híbridos que incorporem elementos das duas linhas de modelagem, explorando os pontos fortes de cada uma (Makela et al., 2000). Para Landsberg (2003), os modelos híbridos serão a principal ferramenta de gestão florestal no futuro.

Pesquisas buscando unir as duas tendências de modelagem não são inéditas e tampouco recentes. Entre os principais trabalhos podem-se citar os de: Hunter & Gibson (1984), Carter et al. (1989), Wang & Jarvis (1990), Baldwin et al. (1993), Battaglia & Sands (1997), Woollons et al. (1997), Corona et al. (1998), Battaglia & Sands (1998), Battaglia et al. (1999), Snowdon et al. (1998), Snowdon et al. (1999), Curt et al. (2001) e Makela et al. (2000). No Brasil, destacam-se os trabalhos de Soares (1999), Soares & Leite (2000), Maestri (2003), Temps (2005) e Ferraz-Filho (2006).

Este trabalho, como os citados acima, também teve como mérito a aproximação das duas teorias de modelagem. No entanto, é inédito por avaliar a relação entre variáveis ambientais e do povoamento, sendo útil tanto para o ajuste de modelos biométricos quanto para a calibração de modelos ecofisiológicos; devido ao fato de a área de estudo ser uma das mais favoráveis ao crescimento de eucalipto no mundo e por utilizar várias formas de inserção de variáveis ambientais em modelos de crescimento.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver um sistema de modelagem do crescimento e da produção de *Eucalyptus* sp., incluindo variáveis ambientais. Especificamente, objetivou-se analisar o efeito das variações ambientais no crescimento florestal e testar diferentes formas de inclusão das

variáveis ambientais nos modelos de crescimento e produção para o povoamento.

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, E.C.R. **Modelagem da prognose precoce do volume por classe diamétrica para Eucalyptus grandis**. 2000. 69p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- ALMEIDA, A.C.; MAESTRI, R.; LANSDBERG, J.J.; SCOLFORO, J.R.S. Linking process-based and empirical forest models in Eucalyptus plantations in Brazil. In: AMARO, A.; REEDS, D.; SOARES, P. **Modelling forest systems**. Wallingford: CAB International, 2003. p.63-74.
- BALDWIN, V.C.; BURKHART, H.E.; DOUGHERTY, P.M.; TESKEY, R.O. **Using a growth and yield model (PTAEDA2) as a driver for a biological process model (MAESTRO)**. New Orleans: Department of Agricultural/Forest Service/Southern Forest Experiment Station, 1993. 9p. Leaflet.
- BATTAGLIA, M.; SANDS, P.J. Process-based forest productivity models and their application in forest management. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.102, n.1, p.13-32, Mar. 1998.
- BATTAGLIA, M.; SANDS, P.J.; CANDY, S.G. Hybrid growth model to predict height and volume growth in young Eucalyptus globulus plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.120, p.193-201, July 1999.
- BURKHART, H.E. Development of empirical growth and yield models. In: AMARO, A.; TOMÉ, M. **Empirical and process based models for forest tree and stand growth simulation**. Oeiras: Edições Salamandra, 1997. p.53-60.
- CARTER, R.E.; KLINKA, K. Relations between growing-season soil water-deficit, mineralizable soil nitrogen and site index of coastal douglas fir. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.30, p.301-311, Feb. 1989.
- CORONA, P.; SCOTTI, R.; TARCHIANI, N. Relationship between environmental factors and site index in Douglas-fir plantations in central Italy. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.110, p.195-207, Oct. 1998.
- CURT, T.; BOUCHAUD, M.; AGRECH, G. Predicting site index for douglas-fir plantations from ecological variables in the massif central area of France. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.149, p.61-74, Aug. 2001.

FERRAZ-FILHO, A.C. **Modelo de projeção em altura dominante com adição de variáveis ambientais**. 2006. 40p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

HUNTER, I.R.; GIBSON, A.R. Predicting *Pinus radiata* site index from environmental variables. **New Zealand journal of Forestry Science**, Rotorua, v.14, p.53-64, June 1984.

LANDSBERG, J. Physiology in forest models: history and the future. **FBMIS**, London, v.1, p.49-63, Sept. 2003.

MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais**. 2003. 143p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MAKELA, A.; LANDSBERG, J.J.; EK, A.E.; BURK, T.E.; TERMIKAEIAN, M.; AGREN, G.; OLIVER, C.D.; PUTTONEN, P. Process-based models for forest ecosystem management: current state-of-art and challenges for practical implementation. **Tree Physiology**, Oxford, v.20, p.289-298, 2000.

MCMURTRIE, R. E., LANDSBERG, J. J. Using a simulation model to evaluate the effects of water and nutrients on growth and carbon partitioning of *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.52, p. 243-260, Sept. 1992.

SNOWDON, P.; JOVANOVIC, T.; BOOTH, T.H. Incorporation of indices of annual climatic variation into growth models for *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.117, p.187-197, May 1999.

SNOWDON, P; WOOLLONS, R.C.; BENSON, M.L. Incorporation of climatic indices into models of growth of *Pinus radiata* in a spacing experiment. **New Forests**, Dordrecht, v.16, p.101-123, Sept. 1998.

SOARES, C.P.B. **Um modelo para o gerenciamento da produção de madeira em plantios comerciais de eucalipto**. 1999. 71p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G. Predição da produção de madeira de eucalipto em região com alta variabilidade pluviométrica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.58, p.41-48, dez. 2000.

TEMPS, M. **Adição da precipitação pluviométrica na modelagem do crescimento e da produção e da produção florestal em povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** 2005. 116p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

WANG, Y.P.; JARVIS, P.G. Influence of crown structural properties on PAR absorption, photosynthesis, and transpiration in Sitka spruce: application of a model (MAESTRO). **Tree Physiology**, Oxford, v.7, p.297-316, Dec. 1990.

WOOLLONS, R.C.; SNOWDON, P.; MITCHELL, N.D. Aumenting empirical stand projection equation with edaphic and climatic variables. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.98, p.267-275, Nov. 1997.

CAPÍTULO 2

RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E BIOMÉTRICAS EM POVOAMENTOS DE EUCALIPTOS NO SUL DO ESTADO DA BAHIA

1 RESUMO

O presente trabalho foi realizado com os objetivos de fornecer subsídios para a calibração e a validação de modelos ecofisiológicos, avaliando a correlação entre as variáveis ambientais do crescimento florestal e indicar variáveis do ambiente que possam ser utilizadas para a construção de modelos híbridos, analisando valores ótimos para o crescimento florestal. A área de estudo está localizada no extremo sul do estado da Bahia, compreendendo uma área de plantio de aproximadamente, 96.000 ha de *Eucalyptus urograndis*. A base de dados para o estudo foi composta por dados dendrométricos provenientes do Inventário Florestal Contínuo, dados climáticos oriundos de estações meteorológicas e dados edáficos advindos de classificação de solos. O período estudado compreendeu os anos de 1994 a 2006. Para relacionar as variáveis dendrométricas com as variáveis climáticas utilizou-se da correlação linear, análise de componentes principais e gráficos de dispersão. Os principais resultados foram: a) para a região em estudo há correlação entre o incremento corrente anual em altura dominante, área basal e volume com as variáveis do ambiente; b) os maiores valores de correlação linear e incremento, tanto para área basal, altura dominante e volume, foram precipitação mensal, déficit e excedente hídrico; c) com os dados do inventário florestal contínuo foi possível encontrar tendências claras entre o crescimento florestal e as variáveis ambientais e também os valores ótimos destas variáveis para o crescimento florestal; d) as variáveis que apresentaram maior significância para serem utilizadas em conjunto com modelos híbridos foram: excedente hídrico mensal, precipitação mensal, temperatura média e déficit de pressão de vapor do ar.

CHAPTER 2

RELATIONSHIP BETWEEN ENVIRONMENTAL AND BIOMETRIC VARIABLES IN STANDS OF EUCALYPTUS IN THE SOUTH OF BAHIA STATE

2 ABSTRACT

This work aimed to providing subsidies for the calibration and validation of ecophysiological models, evaluating the correlation between environmental variables in forest growth and to indicate environment variables that can be used for the construction of hybrid models by analyzing the optimal values for forest growth. The study area is located in the extreme south of Bahia state, with a planting area of approximately 96,000 ha of *Eucalyptus urograndis*. The database for the study consisted of dendrometric data from the Forest Inventory; climate data from weather stations and edaphic data from soil classification. The study's period was between 1994 and 2006. For analyze of the dendrometric with climatic variables we used the linear correlation, Principal Component Analysis and scatter charts. The main results were: The main results were: a) for this region, we found correlation between dominant height, basal area and volume annual increment with the environment variables; b) the highest correlation values between basal area, dominant height and volume were: rainfall, water surplus and water deficit; c) with Continuous Forest Inventory data we found clear trends between forest growth and environmental variables and also the optimum values of these variables for forest growth; d) the variables that showed the highest significance for use in hybrid models were: water surplus, rainfall, temperature and vapor pressure deficit.

3 INTRODUÇÃO

Vários fatores controlam as interações entre o sistema solo-planta-atmosfera em plantios de eucalipto, dentre os quais se destacam os fatores fisiológicos e as condições ambientais. As principais variáveis do ambiente que controlam as trocas gasosas entre o dossel e a atmosfera são, segundo Landsberg (2003): radiação solar, disponibilizando energia para o processo de evaporação e transpiração; temperatura do ar, controlando o déficit de pressão de vapor entre a câmara estomática e a atmosfera e a disponibilidade de água no solo, que regula a abertura estomática e, conseqüentemente, o processo de difusão do vapor de água entre os estômatos e a atmosfera. A variação e a intensidade com que estes ocorrem ao longo do tempo afetam o crescimento.

Para Binkley (2004), a produção florestal depende dos recursos do ambiente obtidos pelas árvores e do uso destes recursos para fixar CO₂ atmosférico em biomassa. A produção de madeira depende, ainda, dos padrões de alocação da biomassa produzida nas árvores. A biomassa alocada para a produção de madeira é de, aproximadamente, 10% a 30% do total produzido pelas árvores. Este modelo 'verbal' pode ser transformado em um modelo quantitativo que apresentará informações importantes sobre os padrões de crescimento das florestas. Este tipo de modelo é chamado de modelo ecofisiológico. Muitos foram desenvolvidos na área floresta e, entre os mais conhecidos, podem-se citar: Century (Parton, 1992), BGC (Running & Gower, 1991), GEM (Rastetter et al. 1991), G'day (Comins & McMurtrie, 1993), 3-PG (Landsberg & Waring, 1997), Promod (Battaglia et al., 1999).

Para Stape (2002), a construção de um modelo ecofisiológico é dividida em parametrização, calibração, validação e simulação. A etapa de parametrização consiste em determinar os valores das variáveis fisiológicas, climáticas e edáficas envolvidas no modelo. Nesta fase, utilizam-se,

basicamente, dados experimentais e da literatura, como apresentado por Landsberg & Waring, (1997) e Sands & Landsberg (2002). Depois de parametrizado, o modelo deve ser calibrado. Para tanto, uma série de simulações é realizada e ajustes nos parâmetros (principalmente naqueles provenientes da literatura) são feitos buscando-se a aproximação dos valores estimados (*outputs*) com os valores observados no campo. Nesta etapa também são utilizados dados experimentais.

Um importante experimento utilizado na calibração são as “parcelas gêmeas” (Stape et al., 2006). A etapa de validação consiste em determinar para quais limites fisiológicos, climáticos e edáficos o modelo pode ser aplicado e o quanto preciso é. Para tanto, são realizadas simulações comparando-se resultados de inventário florestal contínuo com os *outputs* fornecidos pelos modelos ecofisiológicos. Depois de parametrizado, calibrado e validado, podem-se fazer simulações para avaliar o comportamento da floresta, variando as condições de manejo (clone a ser utilizado, espaçamento de plantio, fertilização, preparo do solo, etc.) e as condições climáticas.

Da descrição acima pode-se notar que a parametrização e a calibração dos modelos ecofisiológicos são baseadas em dados experimentais. Tal fato pode dificultar e até inviabilizar sua utilização em áreas extensas, uma vez que a variabilidade climática, edáfica e genética é grande e dificilmente bem representada nos experimentos. Uma forma alternativa aos experimentos seria agregá-los às informações do inventário contínuo que, por sua vez, representam muito bem as variações temporais e espaciais de todas as variáveis envolvidas no crescimento florestal, embora as condições não sejam tão bem controladas como nos experimentos. Este fato sugere a realização de estudos até então inexistentes que relacionem as variações do ambiente com o crescimento florestal, utilizando dados do inventário contínuo, para analisar se existem

tendências que possibilitem determinar as condições ambientais ótimas para a determinação do crescimento potencial da floresta.

Para a construção de modelos de crescimento e produção híbridos, também são necessários estudos de correlação entre crescimento florestal e variáveis ambientais, neste caso, para determinar a intensidade e a característica da correlação, objetivando selecionar os efeitos mais significativos para serem incluídos nos tradicionais modelos empíricos.

De acordo com as afirmações apresentadas, o presente trabalho foi realizado com os seguintes objetivos: a) fornecer subsídios para a calibração e a validação de modelos ecofisiológicos, avaliando a correlação entre as variáveis ambientais do crescimento florestal e b) indicar variáveis do ambiente que possam ser utilizadas para a construção de modelos híbridos, analisando valores ótimos para o crescimento florestal.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização

A área de estudo está localizada no extremo sul do estado da Bahia, compreendendo uma área de plantio de aproximadamente 96.000ha de *Eucalyptus urograndis*.

A precipitação média anual na região é de 1.200 mm, com extremos de 1.600 mm junto ao litoral e de 900 mm no setor noroeste da área de plantio. A temperatura média é de 24°C, com pequena amplitude. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é classificado em dois tipos (Cavedon & Shinzato, 2000):

- a) Tropical Equatorial (Af): chuvoso, quente e úmido, característico do litoral, envolvendo uma faixa de, aproximadamente, 50 km de largura, com precipitações elevadas, variáveis entre 900 a 2.000 mm anuais e temperatura média de 23,8°C e
- b) Tropical de Monção (Am): formando uma estreita faixa paralela à anterior, também quente e úmida, mas com precipitações inferiores ao Af, porém, compensadas pela elevada média anual.

Na área do empreendimento florestal são identificados dois compartimentos regionais de relevo: Planalto Costeiro e Planalto Pré-Litorâneo. O Planalto Costeiro está associado a relevo de topos tabulares do Grupo Barreiras; o Planalto Pré-Litorâneo está associado a relevos de topos planos com serras e maciços montanhosos (Cavedon & Shinzato, 2000).

São predominantes os solos da classe Argissolos Amarelos, apresentando horizonte B textural com muitas derivações nas classes texturais, desde arenosos a muito argilosos, com ocorrência frequente de camada adensada em subsuperfície, com alto grau de coesão (Cavedon & Shinzato, 2000).

4.2 Base de dados

A base de dados para o estudo foi composta por dados dendrométricos provenientes do Inventário Florestal Contínuo, dados climáticos oriundos de estações meteorológicas e dados edáficos advindos da classificação de solos da empresa. O período estudado compreendeu os anos de 1994 a 2006.

Para o estudo foram selecionados todos os talhões pertencentes a um mesmo clone amplamente distribuído em toda a área florestal, implantados com espaçamento de 12m² por planta (5,00x2,40 m ou 4,00x3,00 m), conferindo aproximadamente 833 árvores por hectare.

4.2.1 Inventário florestal contínuo

O Inventário florestal contínuo inicia-se aos dois anos de idade, quando são alocadas parcelas permanentes com 22 plantas, conferindo uma área de cerca de 264 m². As parcelas são remedidas anualmente até o ano de corte e a intensidade amostral é de, aproximadamente, uma parcela a cada 15 ha.

Nas parcelas medem-se: a circunferência à altura do peito (CAP – tomada a 1,30m do solo), de todas as árvores; a altura total das cinco primeiras árvores e a altura total das árvores dominantes que, selecionadas com base no conceito de Assmann (1970), correspondem às três árvores mais grossas da parcela.

Administrativamente, os plantios se dividem em projetos e talhões. É com base nessas divisões que os dados são estratificados para o processamento do inventário. Projetos são áreas contíguas plantadas em um mesmo ano. Eles são subdivididos em talhões, que são as menores unidades nas quais se aplica um único manejo (clone, espaçamento, preparo do solo, adubação, etc.). O tamanho dessas unidades é, basicamente, em função de uma melhor operacionalização da colheita.

Para a estimativa das alturas totais foi utilizada a relação hipsométrica descrita abaixo, proposta por Campos et al. (1984). Uma equação foi ajustada para cada projeto.

$$HTest = \exp\left[\beta_0 + \frac{\beta_1}{DAP} + \beta_2 \cdot \ln(Hdom)\right],$$

em que

HTest - altura estimada

DAP – diâmetro à altura do peito, tomado a 1,30 m do solo

Hdom – altura dominante

Ln - logaritmo neperiano

β_{is} - parâmetros estimados

ε – Erro

Já para estimativa de volume, foi utilizado o modelo abaixo, proposto por Leite et al. (1995). Equações foram ajustadas para cada combinação de projeto e idade.

$$V_i = \beta_0 DAP^{\beta_1} HT^{\beta_2} \exp^{\frac{tx}{DAP}} \left[1 - \left(\frac{di}{DAP} \right)^{1+\beta_4 \cdot di} \right],$$

V_i – volume estimado para a *iésima* árvore

DAP – diâmetro à altura do peito, tomado a 1,30 m do solo

HT - altura total

di – diâmetro comercial

tx – variável binária (0 para volume com casca e 1 para volume sem casca)

e = base dos logaritmos neperianos

β_{is} - parâmetros estimados

ε – Erro

Para este estudo, foram utilizados dados de 860 parcelas permanentes, medidas anualmente. O número total de medições foi 3.938, sendo, no mínimo duas e, no máximo, 8 medições por parcela. Em média, cada parcela foi medida 4,6 vezes.

4.2.2 Dados climáticos

Na área de estudo existem sete estações meteorológicas automáticas, apresentadas na Tabela 1, juntamente com sua localização geográfica.

TABELA 1 Relação e localização das estações meteorológicas na região de estudo.

Número	Nome da estação	UTMX	UTMY
1	Jambeiro III	454384	8154589
2	Copaíba	409504	8199904
3	Estação Eunápolis	437163	8192378
4	Estação Veracel	473651	8246166
5	Ipê V (Fábrica)	455335	8221263
6	Jitaí	437163	8192378
7	Jambeiro VI	470853	8183942

Cada talhão estudado foi associado a uma estação meteorológica em função distância. Para tanto, determinou-se o centro geométrico de cada talhão, utilizando-se os polígonos de Thiessen, conforme apresentado por Maestri (2003), Temps (2005) e Ferraz-Filho (2006), e calculou-se sua distância em

relação a cada uma das estações. A menor distância definiu a associação entre a estação meteorológica e o talhão.

Das estações meteorológicas foram obtidos dados diários de precipitação pluviométrica, temperaturas média, mínima e máxima, radiação solar e déficit de pressão de vapor do ar. Todas as variáveis foram consideradas em bases mensais, cuja forma de cálculo e unidades estão apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2 Variáveis ambientais obtidas das estações meteorológicas, unidades de medição e forma de obtenção.

Variáveis – Estações Meteorológicas	Unidade	Forma de obtenção
Precipitação pluviométrica	mm.mês ⁻¹	Soma
Temperatura média	°C	Média
Temperatura mínima	°C	Média
Temperatura máxima	°C	Média
Radiação solar	MJ.m ⁻²	Média
Déficit de pressão de vapor do ar	KPa	Média

4.2.3 Balanço hídrico do solo

Para avaliar as características hídricas do sistema foi realizado o balanço hídrico climatológico sequencial utilizando o método de Thornthwaite-Mather.

O balanço hídrico nada mais é do que o computo das entradas e saídas de água de um sistema. Pereira et al. (1997) afirmam que a entrada de água no solo se dá pela precipitação pluviométrica (P), ascensão capilar (AC) do lençol freático para a região das raízes e pela entrada lateral (Run In, RI). Já as saídas são representadas pela drenagem profunda (DP) do excesso de água para baixo da zona de raízes, pelo escoamento superficial (Surface Run Off, SRO) que ocorre normalmente em solos encharcados após sucessivos dias de chuva, pela

saída lateral (Run Off, RO) e pela evapotranspiração real (ER) das plantas. Portanto, em um intervalo de tempo qualquer, o balanço hídrico do solo pode ser assim equacionado:

$$\Delta A = (P + AC + RI) - (DP + SRO + RO + ER)$$

em que ΔA é a variação no armazenamento entre o início e o fim do intervalo de tempo.

Para situações de cálculo do balanço hídrico em regiões extensas, a ascensão capilar é compensada pela drenagem profunda, a drenagem lateral se autoanula (Run In = Run Off) e o escoamento superficial (SRO) é desprezado. Assim, a água armazenada no solo (ARM) neste mesmo intervalo de tempo (Δt ou $t - [t-1]$) é dada por:

$$ARM_t = ARM_{t-1} + P - ER - EXC$$

em que o excesso (EXC) é definido quando $ARM > CAD$, ou seja, quando a capacidade de armazenamento do solo atinge seu máximo limite, a quantidade de água adicional é perdida do volume deste controle. O déficit de água no solo é a diferença entre a evapotranspiração real (ETr) e a evapotranspiração potencial (ETp), quando $ETr < ETp$, o que significa falta de água para as plantas realizarem a máxima taxa de evapotranspiração possível.

A evapotranspiração também foi calculada pelo método de Thornthwaite-Mather. Segundo Pereira et al. (1997), a evapotranspiração real (ETr) é uma função empírica dependente da água armazenada no solo (ARM), da alteração (ALT) nesse armazenamento de um período para o outro e da diferença entre precipitação e evapotranspiração potencial no período considerado. Por esse método, a água armazenada no solo para o período t é calculada por:

$$ARM_t = CAD \cdot e^{\frac{NegAcum_t}{CAD}}$$

em que CAD é a capacidade de armazenamento de água do solo e NegAcum é a diferença entre P-ETp, quando P<ETp. Utiliza-se este procedimento para cálculo de ARM para os períodos em que P-ETp for negativo.

A evapotranspiração também poderia ser determinada pelo método de Penman-Monteith contudo, não haviam informações de velocidade do vento, necessária para o cálculo, para todas as estações no período estudado.

A capacidade de armazenamento utilizada foi de 200 mm, por se encontrar entre a faixa encontrada na literatura. Segundo Pereira et al. (2002), em espécies florestais, a CAD varia de 150 a 300 mm. Stape & Gomes (1996) utilizaram CAD de 200 mm para a contabilização do balanço hídrico em plantios de eucalipto entre 3 e 8 anos. Neves (2000) determinou a CAD para plantios de eucalipto, no litoral do Espírito Santo, de 168 mm. Souza et al. (2006), estudando o efeito da disponibilidade hídrica em povoamentos de eucalipto, também optaram por utilizar CAD de 200 mm.

Com o valor da CAD determinado, quando houver um período chuvoso em que P-ETp seja positivo, então ARM será:

$$ARM_t = ARM_{t-1} + (P - ETp)$$

Se a precipitação for maior que a evapotranspiração potencial (P-ETp>0), então, a evapotranspiração real é igual à evapotranspiração potencial (ETr=ETp), pois não estará faltando água no sistema e as plantas estarão evapotranspirando na máxima taxa possível (potencial). Se P - ETp<0, então, a ETr será igual à P + |ALT|.

O déficit de água no solo, ou déficit hídrico (DEF), é dado por $ETp-ETr$. O excedente hídrico (EXC), por sua vez, é a quantidade de água que sobra no período chuvoso.

O balanço hídrico normal é calculado para o ciclo de um ano. Para outros períodos, menores ou maiores que um ano, utiliza-se o balanço hídrico sequencial, uma vez que este permite conhecer o que ocorreu, em termos de disponibilidade hídrica do solo, deficiência e excedente hídricos em períodos específicos. A diferença básica no cálculo desses dois tipos de balanço hídrico está na inicialização do cálculo. No balanço sequencial, por não ser um ano cíclico (normal), deve-se iniciar o balanço somente quando houver uma sequência de períodos com $(P-ETP)>0$ que seja suficiente para garantir $ARM = CAD$.

Na Tabela 3 são apresentadas as variáveis obtidas por meio do balanço hídrico e suas unidades de medida. Estas variáveis são calculadas e utilizadas em base mensal.

TABELA 3 Variáveis provenientes do balanço hídrico do solo e suas unidades de medida.

Variáveis – Balanço hídrico	Unidade
Déficit de água no solo	mm.mês ⁻¹
Excedente de água no solo	mm.mês ⁻¹
Evapotranspiração potencial	mm.mês ⁻¹
Evapotranspiração real	mm.mês ⁻¹

4.2.4 Combinação das variáveis ambientais com dados do inventário

Como citado por Maestri (2003), a correta interpretação e modelagem do efeito das variáveis ambientais no crescimento somente será possível se uma perfeita adequação entre as medições dos povoamentos em um inventário florestal e tais variáveis for criteriosamente realizada.

Dessa forma, foram pareados os dados de incremento corrente anual (ICA) de: volume, área basal, altura média, diâmetro médio e altura dominante com os valores médios, base mensal, das variáveis ambientais ocorridas no período de tempo entre a medição 1 e a medição 2 que formaram o ICA a ser avaliado.

Landsberg & Gower (1997) salientam que a variação das condições ambientais ao longo de um período também oferece impacto no crescimento florestal. Dessa forma, como sugerido por Maestri (2003), determinou-se também o desvio padrão de cada variável ambiental entre a medição 1 e a medição 2. Os desvios foram pareados com os dados do inventário tal como as médias.

4.2.5 Correlação entre as variáveis ambientais e incremento corrente anual

A avaliação da correlação entre as variáveis do ambiente teve seu efeito linear avaliado por meio do coeficiente de correlação de Pearson. O gráfico de dispersão foi a ferramenta utilizada para analisar o padrão das correlações.

4.3 Identificação das variáveis mais importantes para modelos de crescimento e produção

Um conjunto de dados composto por inúmeras variáveis do ambiente apresenta certa complexidade e correlações entre elas ocorrem frequentemente, o que é chamado de multicolinearidade. Um procedimento de modelagem contendo tais características entre variáveis necessita de uma simplificação, sob

pena de aumentar a complexidade do modelo pelo aumento do número de variáveis e, também, de influenciar negativamente as estimativas pela correlação entre variáveis independentes (Maestri, 2003).

Conforme Gonzáles & Formoso (2000), a multicolinearidade afeta significativamente os coeficientes da equação de regressão, alterando o valor e até o sinal em relação ao que ocorreria se não houvesse esse problema. Na presença de correlação alta, os coeficientes de regressão estimados tendem a ser imprecisos e as estimativas dos coeficientes podem oscilar consideravelmente de um subconjunto de dados para outro. Quando isso ocorre, as estimativas dos mínimos quadrados ainda são não-tendenciosas e eficientes, porém, o erro padrão dos coeficientes tende a ser grande e o teste baseado na estatística t de Student calculará significância menor que a real. Outro efeito da multicolinearidade é que torna difícil obter interpretações sobre o efeito isolado de cada uma das variáveis.

Quando um conjunto de dados é composto de inúmeras variáveis, a identificação de quais são as mais expressivas para a explicação das variações do sistema recai em um problema típico tratado pelas técnicas de estatística multivariada. Os dados de variáveis aleatórias, por meio de procedimentos de álgebra matricial, são explorados de forma a se conhecer melhor sua capacidade de representação de um sistema aleatório qualquer. Dentre as técnicas de estatísticas multivariadas, a análise de componentes principais (ACP) apresenta-se como ferramenta importante para a averiguação das variáveis que mais explicam a variabilidade geral de um conjunto de dados.

Para Johnson & Wichern (1998), a ACP está relacionada com a explicação da estrutura de covariância por meio de poucas combinações lineares das variáveis originais em estudo. Os objetivos desta análise são reduzir a dimensão original dos dados e facilitar a interpretação das análises realizadas. Em geral, a explicação de toda a variabilidade do sistema determinado por p

variáveis só pode ser efetuada por p componentes principais. No entanto, uma grande parte dessa variabilidade pode ser explicada por um número r de componentes, sendo $r < p$. A ACP tem as seguintes propriedades:

- a) são funções lineares das variáveis aleatórias originais;
- b) são ortogonais entre si, ou seja, são independentes umas das outras;
- c) a variação total entre eles é igual à variação total nas variáveis aleatórias originais e, conseqüentemente, informações em função de diferenças entre as variáveis aleatórias observadas não são perdidas na transformação;
- d) a variação associada com cada componente é decrescente, em que a primeira componente principal irá representar a máxima proporção possível da variação total, a segunda irá representar a máxima proporção da variação remanescente e assim em diante.

O conjunto de todas as variáveis ambientais foi, então, analisado pela técnica de estatística multivariada de ACP, obtendo-se tantas componentes (autovalores) quantas eram as variáveis. Dentro de cada componente, cada uma das n variáveis teve um peso relativo (coeficientes dos autovetores), que serviu de base para a identificação das variáveis com maior explicação da variabilidade do sistema e baixa correlação entre si, minimizando o efeito da multicolinearidade. Assim, dentro de cada componente principal, a variável que apresentou o maior coeficiente (valor modular) foi escolhida. O critério para a seleção do número de componentes foi o método de validação cruzada. Essa análise foi realizada no software Statistica 8.0.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estatísticas descritivas das variáveis ambientais e biométricas

As estatísticas descritivas provenientes das estações meteorológicas e do balanço hídrico climatológico estão apresentadas na Tabela 4, juntamente com a amplitude de variação do incremento corrente anual de algumas variáveis do povoamento. A tabela dá ideia da ampla variação dos dados ambientais e de crescimento florestal utilizados neste estudo.

TABELA 4 Estatísticas descritivas das variáveis ambientais e do incremento anual de algumas variáveis do povoamento florestal.

Variável	Média	Mínimo	Máximo
Temperatura média (°C)	21,9	19,6	23,7
Temperatura mínima (°C)	17,8	14,2	20,1
Temperatura máxima (°C)	28,4	26,1	31,6
Radiação solar (MJ.m ⁻²)	18,8	15,2	22,6
Precipitação mensal (mm)	112,8	57,7	200,5
Déficit de pressão de vapor (kPa)	0,4	0,2	0,6
Evapotranspiração real mensal (mm)	88,4	73,7	104,4
Evapotranspiração potencial mensal (mm)	82,2	65,9	98,3
Déficit de água no solo mensal	6,2	0,0	41,2
Excedente hídrico mensal	30,5	0,0	106,0
Idade (anos)	5,7	1,7	9,4
Altura dominante (m)	28,3	12,0	39,3
Incremento em altura dominante (m)	2,6	0,0	9,8
Incremento em área basal (m ² /ha)	2,7	0,0	10,0
Incremento em volume (m ³ /ha)	53,3	1,2	184,9

Durante o período analisado, janeiro de 1994 a dezembro de 2006, a temperatura média anual foi de 21,9°C, tendo os valores máximos e mínimos variado, aproximadamente, 2,0°C. A precipitação média mensal foi de 112,8mm, correspondendo a 1.354mm.ano⁻¹. No ano mais seco, a precipitação média não superou 60 mm.mês⁻¹; no entanto, no ano mais chuvoso, chegou a 200 mm.mês⁻¹. Da mesma forma que houve variação na precipitação, os valores de déficit e

excedente hídrico também variaram. Em média, houve déficit de $6,2 \text{ mm.mês}^{-1}$ e excedente de $30,5 \text{ mm.mês}^{-1}$.

Quanto à floresta, a idade variou de 1,7 a 9,4 anos, sendo, em média, 5,7 anos. O incremento médio em altura dominante variou de 0 a 9,8 m, enquanto o incremento anual médio em volume foi de $53,3 \text{ m}^3.\text{ha.ano}^{-1}$, chegando a quase $185 \text{ m}^3.\text{ha.ano}^{-1}$ no ano de maior crescimento e a $1,2 \text{ m}^3.\text{ha.ano}^{-1}$, quando o crescimento foi mínimo. Apesar da grande variação dos incrementos, estes são, em grande parte, explicados pela variação na idade e não somente pelas variações ambientais.

5.2 Caracterização da disponibilidade hídrica no período estudado

A estação meteorológica 05 foi a que teve mais parcelas a ela associadas, por estar em uma posição central na área de estudo. Assim, para se ter uma ideia do comportamento hídrico médio anual no período estudo, realizou-se um balanço utilizando-se os valores médios mensais de precipitação e da temperatura média desta estação. Os valores de deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica, ao longo do período estudado, estão apresentados na Figura 1.

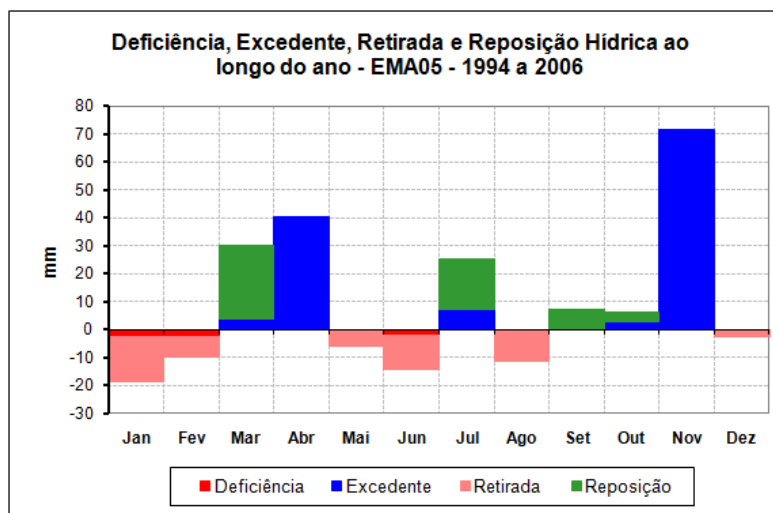


FIGURA 1 Valores médios de deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica da estação meteorológica automática 5, entre os anos de 1994 e 2006.

De maneira geral, houve deficiência hídrica apenas nos meses de janeiro, fevereiro e junho e estes valores foram inferiores a 10 mm. No mês de novembro aconteceu o maior excedente hídrico, 70 mm. Excedente e reposição de água no solo também foram verificados nos meses de março, abril, julho, setembro e outubro.

Embora esses dados representem o excelente potencial hídrico da região em estudo para a cultura do eucalipto, tem-se observado grande variação interanual. Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os balanços hídricos dos anos de 2002 e 2003, respectivamente. No primeiro houve excedente hídrico em quase todos os meses do ano; já no segundo, foi a deficiência que prevaleceu.

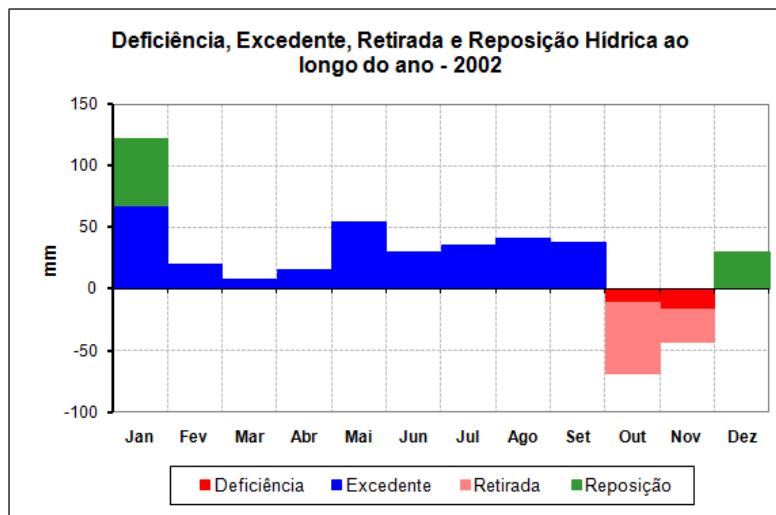


FIGURA 2 Valores médios de deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica da estação meteorológica automática 5, no ano de 2002.

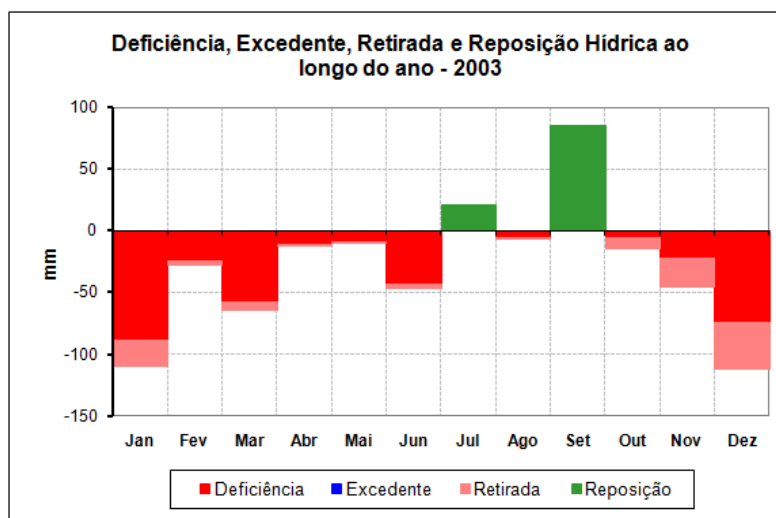


FIGURA 3 Valores médios de deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica da estação meteorológica automática 5, no ano de 2003.

Os dados extremos desses dois anos estão associados ao fenômeno *El Niño*, de 2003, iniciado no final de 2002 e que ocasionou seca no extremo sul da Bahia (Diniz et al., 2008). Este fato reforça a necessidade de relacionar o crescimento com as variáveis ambientais para esta região que, apesar de ser favorável ao crescimento do eucalipto, pode apresentar anos muito secos.

Com o resultado do balanço hídrico sequencial obtiveram-se as deficiências e excedentes hídricos mensais e a variação no armazenamento de água no solo, considerando os dados médios de todas as estações no período de 1994 a 2006. Os resultados desta análise estão apresentados no gráfico da Figura 4.

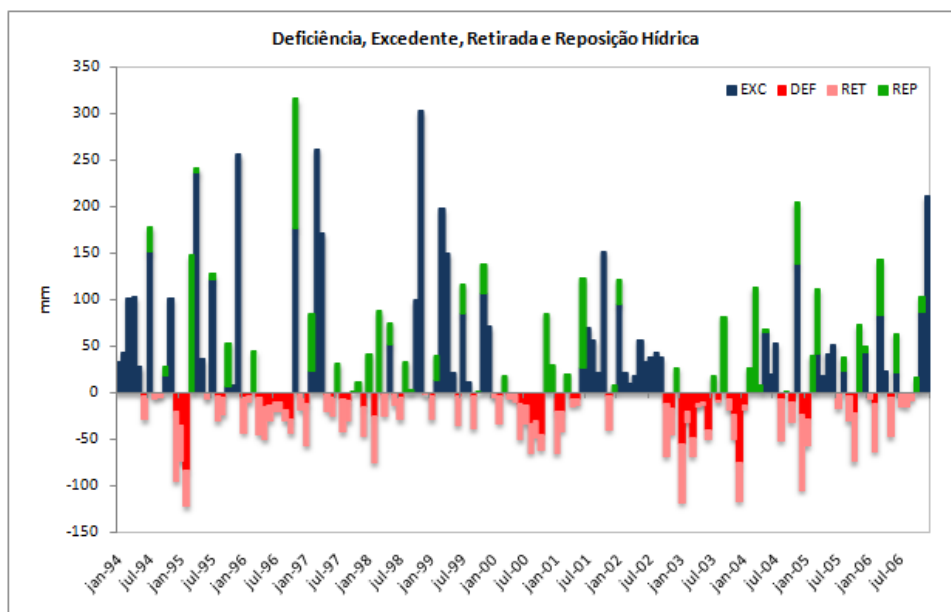


FIGURA 4 Valores médios de deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica, provenientes do balanço hídrico sequencial, de janeiro de 1994 a dezembro de 2006.

5.3 Avaliação da correlação entre as variáveis ambientais e do crescimento florestal

Na Tabela 5 são apresentados os valores de correlação linear simples entre o incremento anual das variáveis do povoamento e os valores médios mensais das variáveis ambientais.

TABELA 5 Correlação linear simples entre variáveis ambientais e o incremento anual das variáveis do povoamento.

MÉDIAS MENSAIS	HDOM (m)	AB (m ² /ha)	DAP (cm)	ALT (m)	VOL (m ³ /ha)	ARV (n/ha)
Temperatura máxima (°C)	-0,18	-0,27	-0,23	-0,20	-0,21	-0,03*
Temperatura mínima (°C)	0,38	0,36	0,40	0,39	0,42	0,02*
Temperatura média (°C)	0,13	0,02*	0,09	0,10	0,20	-0,02*
Radiação solar (MJ.m ²)	0,06	-0,06	0,04*	0,05*	0,10	-0,03*
Precipitação mensal (mm)	0,51	0,58	0,55	0,53	0,51	0,07
Déficit de pressão de vapor (kPa)	-0,18	-0,36	-0,25	-0,20	-0,11	-0,06
Evapotranspiração real mensal (mm)	0,13	-0,03*	0,06	0,10	0,17	-0,02*
Evapotranspiração potencial mensal (mm)	0,35	0,33	0,36	0,34	0,53	0,00*
Déficit de água no solo mensal	-0,34	-0,50	-0,44	-0,37	-0,53	-0,03*
Excedente hídrico mensal	0,47	0,54	0,49	0,49	0,38	0,08

Sendo: HDOM = altura média das árvores dominantes; AB = área basal média; DAP = diâmetro médio, ALT = altura total média, VOL = volume total; ARV = número de árvores por hectare.

*correlações não significativas, a 5% de probabilidade, pelo teste t de Student.

Como se esperava, a temperatura máxima, o déficit de pressão de vapor e o déficit hídrico apresentaram correlação negativa com os incrementos anuais. Já para as demais variáveis, a correlação foi sempre positiva.

Os maiores valores de correlação encontrados foram para precipitação mensal, déficit hídrico e excedente hídrico, com valores próximos de 0,5. Este resultado confirma os estudos de Stape (2002), que concluiu que o aporte hídrico foi o principal elemento controlador da produtividade para eucalipto.

Já os valores mais baixos de correlação foram para temperatura média, radiação solar e evapotranspiração real. Em um estudo de correlação semelhante, Maestri (2003) encontrou valores de, aproximadamente, 0.4 para a correlação entre temperatura média e volume. Para evapotranspiração real, os valores de correlações encontrados, tanto para área basal quanto para volume, foram superiores a 0.55. Este fato se justifica pelas diferenças climáticas entre as regiões, em que o fator de maior limitação é o que irá afetar mais o crescimento.

Não houve grandes diferenças na correlação das variáveis ambientais com as diferentes variáveis do povoamento. Maior semelhança foi encontrada entre altura total e altura dominante, em que os valores foram praticamente os mesmos. Aparentemente, as variáveis área basal e volume são as mais influenciadas pelas variáveis do ambiente para as condições do sul da Bahia.

As correlações também mostraram que o número de árvores por hectare não sofre influência do ambiente. Os únicos valores significativos não superaram 0,10. Resultado semelhante foi relatado por Maestri (2003), que encontrou correlação máxima de 0,14 entre número de árvores por hectare e precipitação média.

Na Tabela 6 são apresentadas as correlações entre os desvios das variáveis ambientais e os incrementos anuais do povoamento. A idéia desta comparação é avaliar se o efeito da variação mensal das variáveis ambientais é significativa para o crescimento.

TABELA 6 Correlação linear simples entre o desvio padrão das variáveis ambientais e o incremento anual das variáveis do povoamento.

DESVIO PADRÃO	HDOM (m)	AB (m ² /ha)	DAP (cm)	ALT (m)	VOL (m ³ /ha)	ARV (n/ha)
Temperatura máxima (°C)	0,01	-0,28	-0,15	0,01	-0,37	-0,05
Temperatura mínima (°C)	0,27	0,23	0,27	0,33	-0,05	0,05
Temperatura média (°C)	0,16	-0,04	0,06	0,19	-0,23	-0,01
Radiação solar (MJ.m ²)	-0,03	-0,29	-0,22	-0,06	-0,39	-0,03
Precipitação mensal (mm)	0,68	0,67	0,69	0,71	0,45	0,11
Déficit de pressão de vapor (kPa)	-0,14	-0,08	-0,10	-0,15	-0,12	0,00
Evapotranspiração real mensal (mm)	0,29	-0,10	0,09	0,28	-0,11	-0,02
Evapotranspiração potencial mensal (mm)	0,22	-0,16	0,03	0,21	-0,13	-0,03
Déficit de água no solo mensal	-0,37	-0,53	-0,47	-0,40	-0,55	-0,03
Excedente hídrico mensal	0,63	0,68	0,66	0,67	0,42	0,14

Sendo: HDOM = altura média das árvores dominantes; AB = área basal média; DAP = diâmetro médio; ALT = altura total média; VOL = volume total; ARV = número de árvores por hectare.

As variáveis ligadas à disponibilidade hídrica do solo continuaram tendo os mais altos valores de correlação. Para excedente hídrico mensal, estes valores foram superiores a 0,60, exceto para volume, que foi de 0,42 e, para o número de árvores por hectare, de 0,14. Valores semelhantes foram apresentados pela precipitação, chegando a 0,71 para a variável altura. Valores na faixa de 0,40 de correlação também foram encontrados para o déficit de água no solo, seno que esta variável explicou 0,50 da variação volumétrica.

Da análise das correlações lineares fica claro que, para a região em estudo, há grande interferência das variáveis do ambiente no crescimento florestal e que as variáveis relacionadas à disponibilidade hídrica foram as que mais influenciaram os incrementos anuais, tanto para os valores médios quanto para as variações mensais.

5.4 Valores ótimos das variáveis ambientais para o crescimento florestal

As análises seguintes se foram baseadas em gráficos de dispersão de dados. É importante ressaltar que, embora as relações apresentem grande dispersão, este item tem como objetivo apenas utilizar os dados do inventário para evidenciar, caso existam, tendências de crescimento ótimo em cada uma das variáveis do ambiente aqui analisadas.

5.4.1 Efeito da temperatura

A temperatura afeta a taxa de crescimento. Primeiramente, temperaturas extremas podem causar danos nos tecidos e interromper o crescimento. Para Landsberg et al. (1997), a fotossíntese só deixa de ocorrer em temperaturas abaixo de zero. No entanto, para a região em estudo, não é possível que ocorram temperaturas tão baixas. Assim, o efeito da temperatura se dará, principalmente, em aumentar ou diminuir o déficit de pressão de vapor do ar e, com isso, a abertura ou o fechamento dos estômatos.

Nas Figuras 5 e 6 são apresentadas, respectivamente, a relação entre a temperatura máxima e o incremento anual em altura dominante e em volume, para uma floresta de 5 anos de idade.

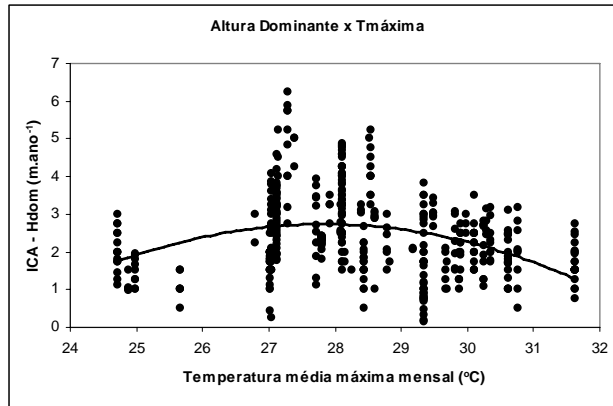


FIGURA 5 Relação entre a temperatura média máxima mensal e o incremento anual em altura dominante, aos 5 anos de idade.

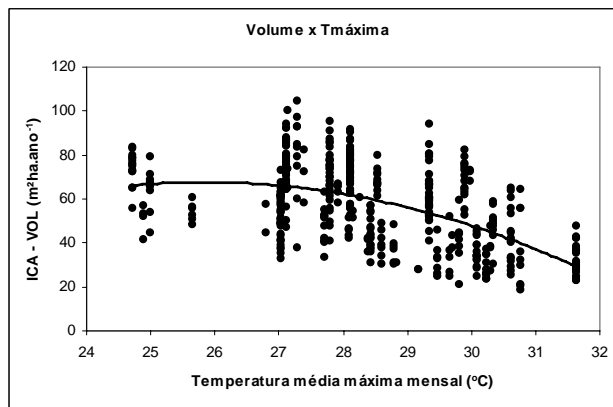


FIGURA 6 Relação entre a temperatura média máxima mensal e o incremento anual volumétrico, aos 5 anos de idade.

Para altura dominante existe uma tendência de aumento do incremento à medida que a temperatura máxima aumenta de 25° para 28°C, voltando a cair após este valor. Os valores médios dos incrementos são de 1,7 m, quando a temperatura máxima é de 25°C; 2,8 m quando a mesma aumenta para 28°C e cai para 1,0 m quando a temperatura continua aumentando até 31,5°C. Contudo, como a dispersão é grande esta correlação não se mostrou importante.

Para a variável volume, existe diferença no início da curva, onde esta apresenta um incremento constante da temperatura de 25° até, aproximadamente, 27°C; nesta faixa, o incremento é de 69m³/ha. Quando a temperatura máxima passa dos 27°C, o incremento diminui, chegando a 38 m³/ha quando a temperatura é de 31,5°C.

Para as demais variáveis, DAP, altura total e área basal, as tendências das curvas foram semelhantes às apresentadas aqui. Para as outras idades, também não houve diferenças significativas.

É importante salientar que estes valores não podem ser generalizados para outras regiões, uma vez que esses valores de incremento são dependentes das outras variáveis ambientais. Por exemplo, a temperatura média máxima de 27°C em regiões com períodos secos seria capaz de causar o fechamento dos estômatos e, assim, interromper o crescimento.

Nas Figuras 7 e 8 estão relacionados à temperatura média mensal mínima e ao incremento anual em altura dominante e em volume, respectivamente. Nestes gráficos também foi utilizada uma floresta de cinco anos de idade. As tendências para outras variáveis em outras idades foram semelhantes a estas.

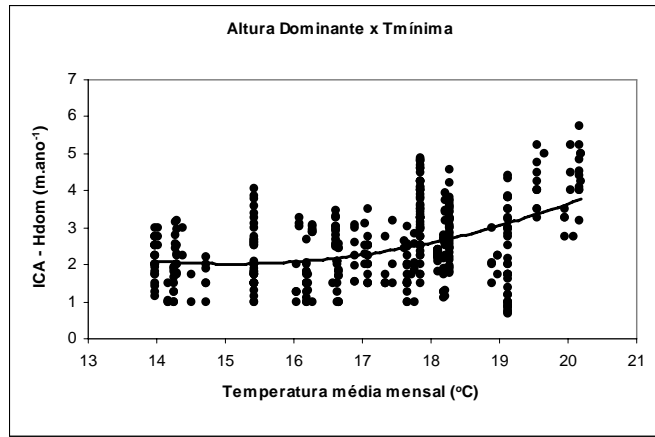


FIGURA 7 Relação entre a temperatura mínima e o incremento anual em altura dominante, aos 5 anos de idade.

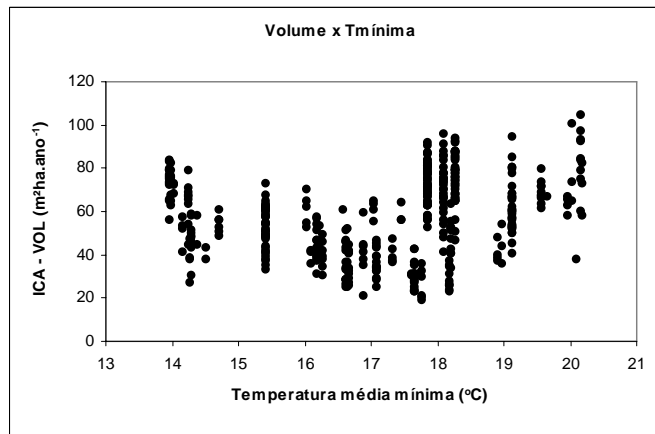


FIGURA 8 Relação entre a temperatura mínima e o incremento anual volumétrico, aos 5 anos de idade.

À medida que a temperatura mínima aumenta, aumenta também o incremento, tanto em altura dominante como em volume. Não foi possível identificar nos gráficos, qual o valor de temperatura mínima que otimiza o

crescimento. Aparentemente, este valor ocorre além do 17°C. Para altura dominante, quando a temperatura mínima foi de 14°C, o incremento foi de 2,10 m; com o aumento da temperatura média para 20°C, este valor passou para 4 m. Já para volume, o menor valor de incremento ocorreu à temperatura mínima de 16°C, 50 m³/ha. Quando a temperatura subiu para 20°C, o incremento foi para 82 m³/ha.

Como observado no item 3.3, a temperatura média apresentou baixos valores de correlação com as variáveis do povoamento. Os gráficos das Figuras 9 e 10 confirmam a análise anterior.

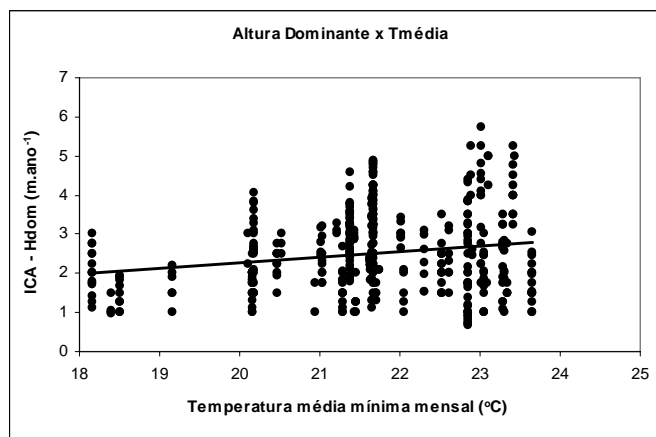


FIGURA 9 Relação entre a temperatura média e o incremento anual em altura dominante, aos 5 anos de idade.

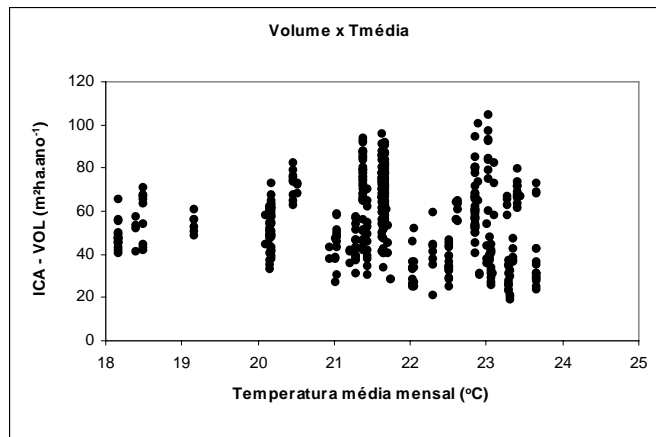


FIGURA 10 Relação entre a temperatura média e o incremento anual volumétrico, aos 5 anos de idade.

5.4.2 Efeito da radiação solar

A fotossíntese é iniciada pela radiação fotossinteticamente ativa, que nada mais é do que a energia solar, com comprimento de ondas dentro da faixa do visível, ou seja, luz. Como observado no item 3.3, a radiação apresentou baixos valores de correlação com o incremento. Provavelmente, isso ocorreu devido ao fato de que nem toda radiação ativa, medida nas estações meteorológicas automáticas, é absorvida pela floresta. A radiação que é absorvida depende do índice de área foliar (IAF) da floresta. Assim, o gráfico da Figura 11 confirma a baixa correlação linear.

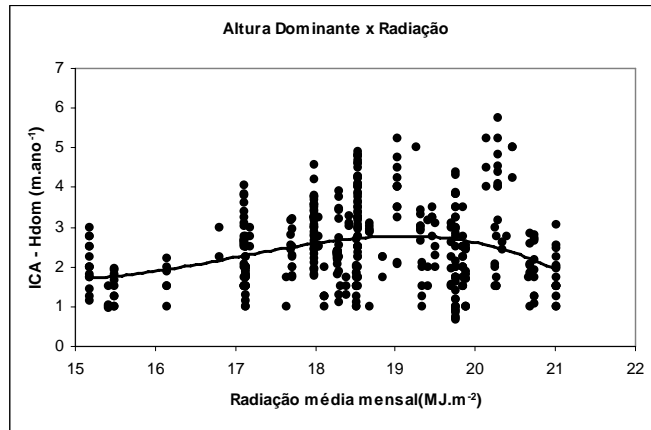


FIGURA 11 Relação entre a radiação e o incremento anual em altura dominante, aos 5 anos de idade.

No entanto, devido ao grande número de dados utilizados, pode-se perceber uma tendência de maximização do incremento quando a radiação média mensal é de, aproximadamente, 18 e 19MJ/m².

5.4.3 Efeito da precipitação

Para precipitação, houve diferença nas tendências entre as idades. Como se pode notar, nos gráficos das Figuras 12 e 13, para uma floresta de três anos, a correlação é quase nula, tanto para altura dominante como para volume.

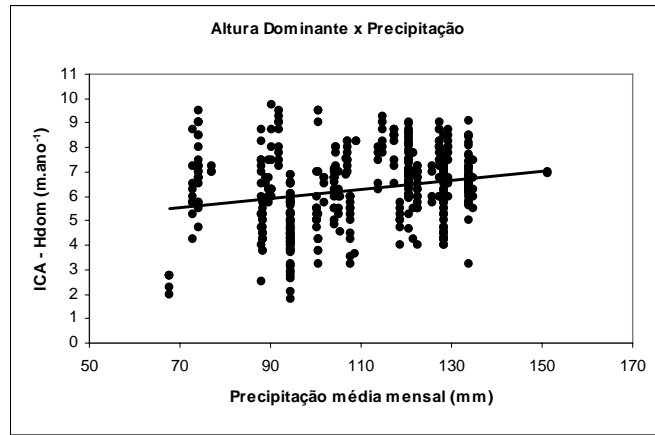


FIGURA 12 Relação entre a precipitação e o incremento anual em altura dominante, aos 3 anos de idade.

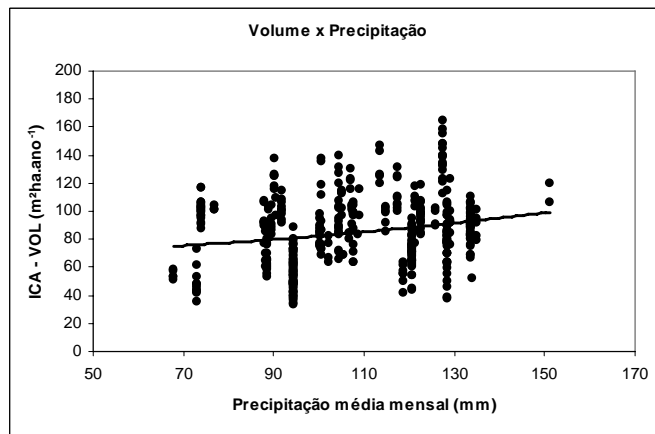


FIGURA 13 Relação entre a precipitação e o incremento anual em volume, aos 3 anos de idade.

Já aos 7 anos de idade (Figuras 14 e 15), a correlação aproximou-se dos 0,60. Este valor cresceu à medida que se correlacionaram florestas mais velhas com a precipitação.

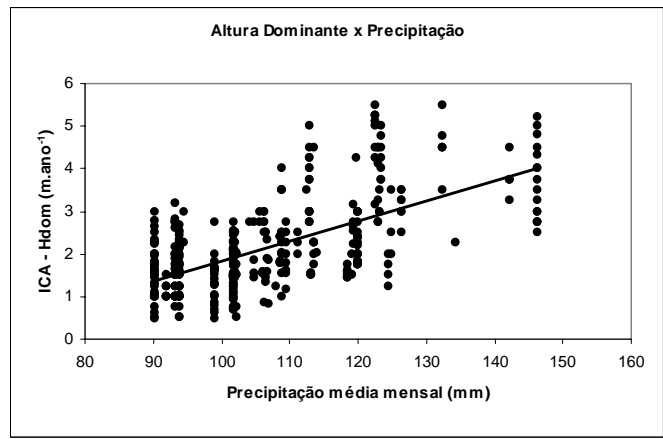


FIGURA 14 Relação entre a precipitação e o incremento anual em altura dominante, aos 7 anos de idade.

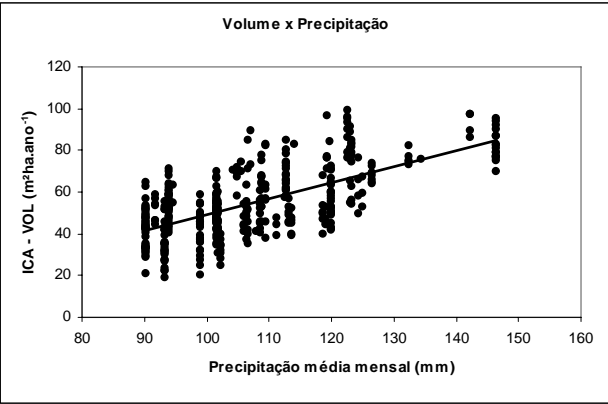


FIGURA 15 Relação entre a precipitação e o incremento anual volumétrico, aos 7 anos de idade.

O incremento anual não demonstrou nenhum ponto de estabilização. Assim, para a área onde ocorreu este estudo, quanto maior for a precipitação maior será o crescimento.

5.4.4 Efeito do déficit e do excedente hídrico

Para as variáveis provenientes do balanço hídrico, déficit e excedente hídrico, todas as variáveis do povoamento demonstraram o mesmo comportamento. Como apresentado para altura, a correlação foi maior em florestas mais velhas do que em florestas mais jovens.

Nos gráficos das Figuras 16 e 17 está representada a correlação entre excedente e deficiência hídrica, com o incremento anual em altura dominante. Nota-se uma correlação muito baixa, principalmente para déficit hídrico.

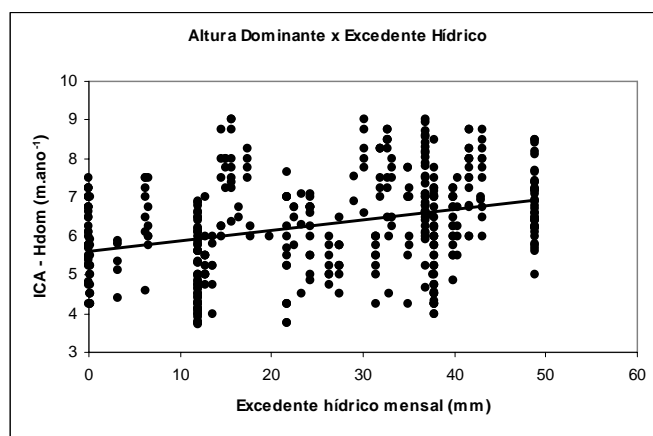


FIGURA 16 Relação entre o excedente hídrico e o incremento anual em altura dominante, aos 3 anos de idade.

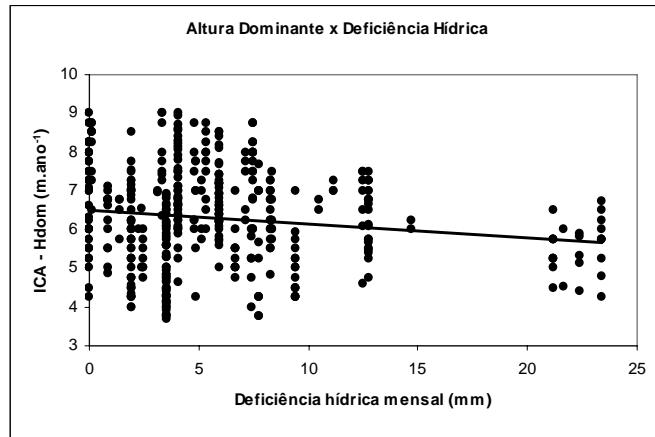


FIGURA 17 Relação entre deficiência hídrica e o incremento anual em altura dominante, aos 3 anos de idade.

Para os sete anos de idade, a correlação é maior (Figura 18 e 19). Como apresentado para as florestas de 3 anos de idade, quanto maior a deficiência hídrica menor o crescimento e quanto maior o excedente maior o crescimento.

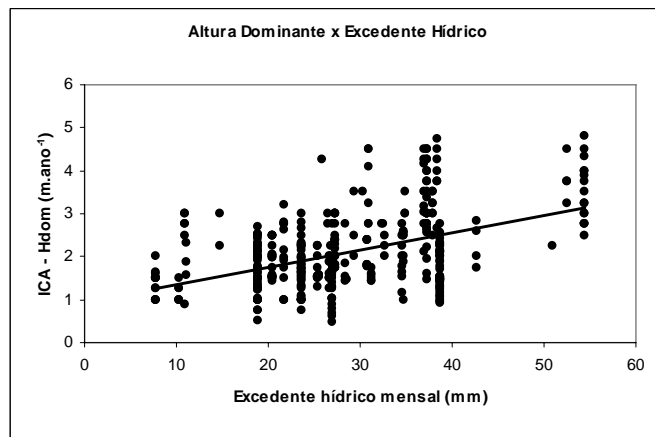


FIGURA 18 Relação entre a precipitação e o incremento anual em altura dominante, aos 7 anos de idade.

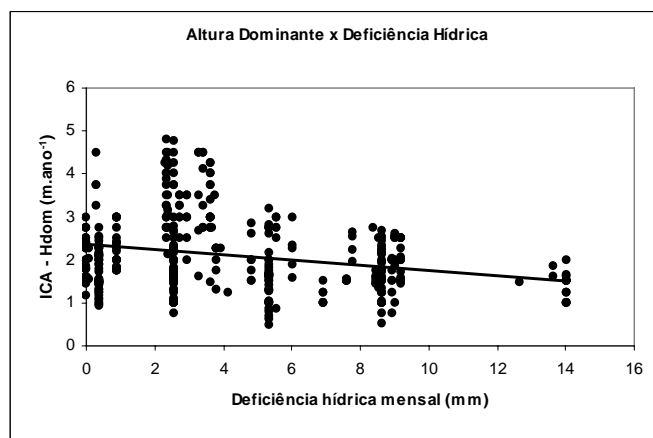


FIGURA 19 Relação entre a deficiência hídrica e o incremento anual em altura dominante, aos 7 anos de idade.

5.5 Seleção de variáveis para construção de modelos biométricos com variáveis ambientais

Uma característica das variáveis ambientais é a de que elas apresentam correlações entre si, conforme apresentado por Landsberg & Gower (1997), Kimmins (1997) e Maestri (2003). Este fato torna-se muito importante quando se deseja construir modelos utilizando estas variáveis como independentes, pois pode gerar uma dependência dos resíduos, violando princípios básicos da análise de regressão. Na Tabela 7 são apresentadas as correlações lineares entre as variáveis ambientais, em que se percebe o quanto elas estão correlacionadas.

TABELA 7 Correlação linear simples entre as variáveis ambientais

Médias	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Tmed (°C)	Rad (MJ.m ⁻²)	Ppt (mm)	DPV (kPa)	ETP-P (mm)	ETP-R (mm)	Def (mm)	Exc (mm)
Tmax(°C)	1,00	0,51	0,84	0,90	-0,32	0,77	0,83	0,33	0,58	-0,49
Tmin (°C)	0,51	1,00	0,87	0,79	0,44	0,35	0,84	0,90	-0,21	0,14
Tmed (°C)	0,84	0,87	1,00	0,97	0,12	0,68	0,98	0,76	0,16	-0,17
Rad (MJ.m ⁻²)	0,90	0,79	0,97	1,00	-0,07	0,74	0,96	0,61	0,33	-0,33
Ppt (mm)	-0,32	0,44	0,12	-0,07	1,00	-0,35	0,06	0,57	-0,74	0,93
DPV (kPa)	0,77	0,35	0,68	0,74	-0,35	1,00	0,69	0,14	0,67	-0,52
ETP-P (mm)	0,83	0,84	0,98	0,96	0,06	0,69	1,00	0,73	0,22	-0,22
ETP-R (mm)	0,33	0,90	0,76	0,61	0,57	0,14	0,73	1,00	-0,50	0,28
Def (mm)	0,58	-0,21	0,16	0,33	-0,74	0,67	0,22	-0,50	1,00	-0,68
Exc (mm)	-0,49	0,14	-0,17	-0,33	0,93	-0,52	-0,22	0,28	-0,68	1,00

Diversas variáveis apresentaram valores de correlação superiores a 0,90, como é o caso da temperatura média e da radiação com a evapotranspiração potencial (0,98 e 0,96) e da precipitação com o excedente hídrico (0,93). Existem, também, muitos valores de correlação acima de 0,80.

Dessa forma, a análise de componentes principais foi utilizada para definir as variáveis que melhor explicam as variações do sistema, atenuando os efeitos da autocorrelação.

Na Tabela 8 são apresentadas as quatro componentes principais selecionadas para representar a variação total dos dados ambientais, com suas variâncias totais e acumuladas.

TABELA 8 Análise de componentes principais das variáveis ambientais médias.

Componente principal	Autovalores	Variância total (%)	Autovalores acumulados	Variância acumulada (%)
1	5,6	55,7	5,6	55,7
2	3,5	34,7	9,0	90,4
3	0,5	5,4	9,6	95,8
4	0,2	2,2	9,8	98,0

A primeira componente foi capaz de explicar 55,7% da variância total, a segunda explicou 34,7% e as quatro componentes juntas explicaram 98% da variação total.

O gráfico da Figura 20 representa o comportamento da variância absoluta para cada um dos autovalores, no qual fica evidente que os autovalores 1 a 3 representam grande parte da variação.

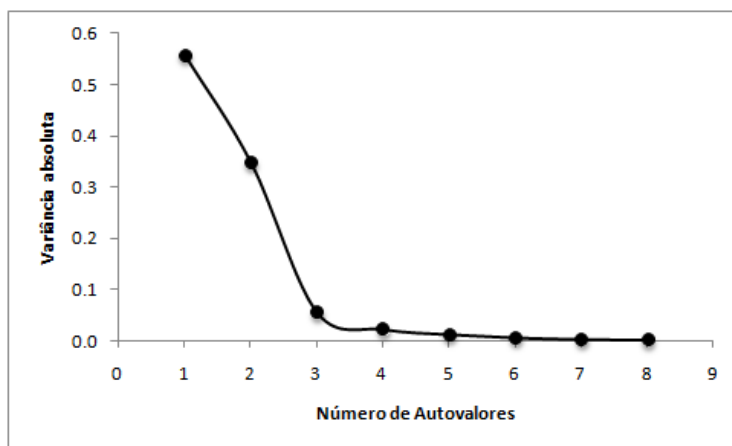


FIGURA 20 Comportamento da variância absoluta para cada um dos autovalores.

As variáveis mais significativas para explicar o sistema de variáveis ambientais foram:

- 1) excedente hídrico mensal;
- 2) precipitação mensal;
- 3) temperatura média;
- 4) déficit de pressão de vapor do ar.

Na Tabela 9 apresentam-se as componentes principais selecionadas para representar a variação total dos dados ambientais. Além das médias mensais das variáveis, incluíram-se também os valores de desvio padrão.

TABELA 9 Análise de componentes principais das variáveis ambientais médias e seus desvios padrão.

Componente principal	Autovalores	Variância total (%)	Autovalores acumulados	Variância acumulada (%)
1	7,2	35,8	7,2	35,8
2	5,8	28,9	12,9	64,7
3	4,2	20,9	17,1	85,7
4	1,0	5,0	18,1	90,7
5	0,8	3,8	18,9	94,5

A primeira componente foi capaz de explicar 35,8% da variância total; a segunda explicou 28,9% e as quatro componentes juntas explicaram 94,5% da variação total.

O gráfico da Figura 21 apresenta o comportamento da variância absoluta para cada um dos autovalores, evidenciando que os quatro primeiros componentes são capazes de explicar grande parte da variação.

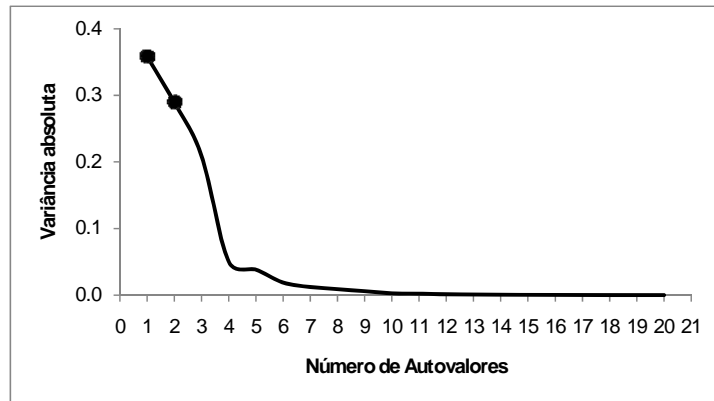


FIGURA 21 Comportamento da variância absoluta para cada um dos autovalores, baseando-se na média e no desvio padrão das variáveis.

Considerando os valores médios e os desvios padrões, as variáveis mais significativas para explicar a variação ambiental foram:

- 1) déficit de pressão de vapor;
- 2) temperatura média;
- 3) evapotranspiração real mensal;
- 4) temperatura mínima – desvio padrão;
- 5) evapotranspiração potencial mensal.

Entre as cinco variáveis selecionadas, a única que representou a variação foi o desvio padrão da média da temperatura mínima mensal.

6 CONCLUSÕES

Para a região em estudo há correlação entre o incremento corrente anual em altura dominante, área basal e volume com as variáveis do ambiente.

Os maiores valores de correlação linear e incremento, tanto para área basal, altura dominante e volume, foram precipitação mensal, déficit e excedente hídrico.

Com os dados do inventário florestal contínuo foi possível encontrar tendências claras entre o crescimento florestal e as variáveis ambientais e também os valores ótimos destas variáveis para o crescimento florestal.

As variáveis que apresentaram maior significância para serem utilizadas em conjunto com modelos híbridos foram: excedente hídrico mensal, precipitação mensal, temperatura média e déficit de pressão de vapor do ar.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon, 1970. 506p.
- BATTAGLIA, M.; SANDS, P.J.; CANDY, S.G. Process-based forest productivity models and their application in forest management. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.120, p.193-201, July 1999.
- BINKLEY, D. A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 190, p.265-271, Mar 2004.
- CAMPOS, J.C.C.; RIBEIRO, J.O.; PAULA NETO, F. **Inventário florestal nacional, reflorestamento**: Minas Gerais. Brasília: IBDF, 1984. 126p.
- CAVEDON, A.D.; SHINZATO, E. **Levantamento de reconhecimento de solos**: projeto Porto Seguro/Santa Cruz Cabralia. Salvador: CPRM-SUREG/AS, 2000. 112p.
- COMINS, H. N.; MCMURTRIE R. E.; Long-term response of nutrient-limited forests to CO_2 enrichment; equilibrium behavior of plant-soil models. **Ecological Applications**, Washington, v.3, n.4, p.666-681, Nov. 1993.
- DINIZ, A.F.; SANTOS, R.L.; SANTO, S.M. Avaliação dos riscos de seca para o município de Feira de Santana- BA associado à influência do El Niño no semi-árido do nordeste brasileiro. **Revista + Geografias**, Feira de Santana, v.1, p.18-24, 2008.
- GONZÁLEZ, M.A.S.; FORMOSO, C.T. Análise conceitual das dificuldades na determinação de modelos de formação de preços através de análise de regressão. **Revista Engenharia Civil**, Braga, n.8, p.65-75, 2000.
- FERRAZ-FILHO, A.C. **Modelo de projeção em altura dominante com adição de variáveis ambientais**. 2006. 40p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- JOHNSON, R.; WICHERN, D. **Applied multivariate statistical analysis**. 4.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 767p.
- KIMMIS, J.P.; COMEAU, P.G.; KURZ, W. **Forest ecology**: a foundation for sustainable management. 2.ed. New Jersey: Prentice Haal, 1997. 596p.

LANDSBERG, J. Physiology in forest models: history and the future. **FBMIS**, London, v.1, p.49-63, 2003.

LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. **Applications of physiological ecology to forest management**. San Diego: Academic, 1997. 354p.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam. v. 95, p.209-228, Aug. 1997

LEITE, H.G.; GUIMARÃES, D.P.; CAMPOS, J.C.C. Descrição e emprego de um modelo para estimar múltiplos volumes de árvores. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.19, p.1-21, nov./dez. 1995.

MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais**. 2003. 143p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

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. 191p. Dissertação (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro.

PARTON, W.J.; MCKEOWN, T.; KRICHNER, V.; OJIMA D. **Century user's manual**. Fort Collins: Colorado State University. 1992. 234p.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

RASTETTER, E.B.; RYAN, M.G.; SHAVER, G.R.; MELILLO, J.M.; NADELHOFFER, K.J.; HOBBIE, J.E.; ABER, J.D. A general biogeochemical model describing the responses of the C and N cycles in terrestrial ecosystems to changes in CO₂, climate, and N deposition. **Tree Physiology**, Oxford, v.9, p.101-126, Oct. 1991.

RUNNING, S.W.; GOWER, S.T. Forest-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications. **Tree Physiology**, Oxford, v.9, p.147-160, Oct. 1991.

SOUZA, M.J.H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H.G.; LEITE, F.P.; MINUZZI, R.B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da bacia do rio doce. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.30, p.399-410, maio/jun. 2006.

SANDS, P.J.; LANDSBERG, J.J. Parameterisation of 3-PG for plantation-grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.163, p.273-292, June 2002.

SOUZA, M.J.H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H.G.; LEITE, F.P.; MINUZZI, R.B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da bacia do rio doce. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.30, p.399-410, 2006.

STAPE, J.L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil**. 2002. 225p. Ph.D. Thesis. (Doctor of Philosophy)-Colorado State University, Colorado.

STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; JACOB, W.S.; TAKAHASHI, E.N. Twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential productivity in Eucalyptus plantations at landscape scales in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.223, p.358-362, 2006.

STAPE, J.L.; GOMES, A.N. Influência dos estresses hídricos e nutricionais no crescimento de plantios de eucaliptos no nordeste do Brasil. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 10., 1996, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: UFSM-Centro de Ciências Rurais, 1996, 1996.

TEMPS, M. **Adição da precipitação pluviométrica na modelagem do crescimento e da produção e da produção florestal em povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** 2005. 116p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CAPÍTULO 3

MODELOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO COM VARIÁVEIS AMBIENTAIS

1 RESUMO

Este trabalho teve por objetivo comparar e desenvolver metodologias de inclusão de variáveis ambientais em modelos de crescimento e produção. A área de estudo está localizada no extremo sul do estado da Bahia, compreendendo uma área de plantio de aproximadamente, 96.000 ha de *Eucalyptus urograndis*. A base de dados para o estudo foi composta por dados dendrométricos provenientes do Inventário Florestal Contínuo, dados climáticos oriundos de estações meteorológicas e dados edáficos advindos de classificação de solos. O período estudado compreendeu os anos de 1994 a 2006. A inclusão das variáveis ambientais nos modelos de crescimento e produção foi feito por duas maneiras: modelo de índice de sítio e modelo de área basal. Os resultados principais foram: a) a temperatura média mensal foi a única variável ambiental que apresentou significância estatística quando incluída em um modelo de classificação de sítio; b) a utilização do índice de sítio, estimado pelo modelo com variáveis ambientais, no modelo de crescimento e produção, melhorou a dispersão dos resíduos e a precisão do modelo; c) na inclusão de variáveis ambientais em um modelo de projeção de área basal, as variáveis selecionadas foram a precipitação média mensal e o déficit de pressão de vapor; d) A utilização da área basal projetada por meio do modelo com variáveis ambientais em um modelo volumétrico melhorou em 9,3% sua precisão, contudo, a tendência de superestimar os maiores volumes se manteve. O erro padrão da estimativa foi de 30,70m³/ha; e) os dois métodos de inclusão de variáveis ambientais em modelos de crescimento e produção foram eficientes. Todavia, as melhores estatísticas e comportamento dos resíduos foram observados quando se utilizou as variáveis ambientais no modelo de classificação de sítio.

CHAPTER 3

GROWTH AND YIELD MODELS WITH ENVIRONMENTAL VARIABLES

2 ABSTRACT

This study aimed to compare and to develop approaches for incorporation of environmental variables in forest growth and yield model. The study area is located in the extreme south of Bahia state, with a planting area of approximately 96,000 ha of *Eucalyptus urograndis*. The database for the study consisted of dendrometric data from the Forest Inventory; climate data from weather stations and edaphic data from soil classification. The study's period was between 1994 and 2006. The incorporation of environmental variables in models of growth and production was done by two ways: site index model and basal area model. The main results were: a) the temperature was the only environmental variable that was statistically significant when included in a site index model; b) the use of site index model, estimated by the model with environmental variables in the growth model production, improved the accuracy of the model; c) the incorporation of environmental variables in a model projection of basal area, selected variables were the rainfall and the vapor pressure deficit; d) the use of area basal model, with environmental variables in a model volume, improved 9.3% accuracy, however, the tendency to overestimate the largest volumes remained. The standard error of estimate was 30.70 m³; e) the two methods for incorporation environmental variables into forest growth and yield models were efficient. However, better statistics were observed when using the environmental variables in the site index model.

3 INTRODUÇÃO

Conhecer o potencial produtivo de uma floresta ao longo do tempo é ponto fundamental para o planejamento florestal. Os modelos de crescimento e produção são a principal ferramenta utilizada para a determinação desta produtividade. Assim, quanto maior a precisão dos mesmos, melhor será a qualidade das decisões provenientes do planejamento.

Os primeiros modelos de crescimento e produção foram desenvolvimentos para espécies de crescimento lento e para populações florestais com idades de rotação altas (Clutter et al., 1983; Alemdag, 1991; Thrower & Goudie, 1992). Desta, os modelos biométricos tradicionais que consideram as características do sítio, a idade e a densidade da população como variáveis explicativas do crescimento geraram bons resultados, tendo em vista a estabilidade do crescimento. Contudo, quando a espécie avaliada apresenta acentuado ritmo de crescimento e sua idade de rotação é mais curta, essa estabilidade não é verificada e os referidos modelos nem sempre apresentam inferência eficazes.

O crescimento do eucalipto no Brasil tem uma das taxas mais aceleradas do mundo e estudos comprovaram sua sensibilidade às variáveis de solo e clima (Stape, 2002), demonstrando que os tradicionais modelos biométricos utilizados para projeção de crescimento nem sempre são eficazes para a sua inferência.

Para Maestri (2003), estes fatos sugerem que o estabelecimento de um vínculo via modelagem, entre as variáveis ambientais e a capacidade produtiva do povoamento florestal, parece contribuir para a melhoria das estimativas volumétricas. Todavia, como a previsão meteorológica tem precisão diminuída com o aumento do intervalo de inferência, a validade do uso de variáveis do ambiente nos modelos de crescimento está relacionada, segundo Snowdon et al. (1998), a: previsão de produção de áreas não povoadas pela essência florestal de

interesse; atualização das informações de inventário florestal com o uso de dado climáticos de uma estação meteorológica associada e análise de risco por meio da simulação de diferentes cenários ambientais.

O desenvolvimento de modelos associando variáveis do ambiente e produção florestal foi realizado por vários pesquisadores, entre os quais é importante citar os trabalhos desenvolvidos por Soares (1999), Snowdon et al. (1998), Snowdon et al. (1999) e Maestri (2003). Estes trabalhos se diferenciam pelas variáveis ambientais utilizadas, pelo método de seleção das mesmas para compor os modelos e pela forma pela qual estas são incluídas na modelagem do crescimento e da produção.

Esta grande gama de possibilidades de utilização das variáveis ambientais sugere um estudo comparativo entre as diferentes metodologias aplicadas. Dessa forma, este trabalho foi realizado com o objetivo de comparar e desenvolver metodologias de inclusão de variáveis ambientais em modelos de crescimento e produção.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização

A área de estudo está localizada no extremo sul do estado da Bahia, compreendendo uma área de plantio de aproximadamente 96.000ha de *Eucalyptus urograndis*.

A precipitação média anual na região é de 1.200 mm, com extremos de 1.600 mm junto ao litoral e de 900 mm no setor noroeste da área de plantio. A temperatura média é de 24°C, com pequena amplitude. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é classificado em dois tipos (Cavedon & Shinzato, 2000):

- a) Tropical Equatorial (Af): chuvoso, quente e úmido, característico do litoral, envolvendo uma faixa de, aproximadamente, 50 km de largura, com precipitações elevadas, variáveis entre 900 a 2.000 mm anuais e temperatura média de 23,8°C e
- b) Tropical de Monção (Am): formando uma estreita faixa paralela à anterior, também quente e úmida, mas com precipitações inferiores ao Af, porém, compensadas pela elevada média anual.

Na área do empreendimento florestal são identificados dois compartimentos regionais de relevo: Planalto Costeiro e Planalto Pré-Litorâneo. O Planalto Costeiro está associado a relevo de topos tabulares do Grupo Barreiras; o Planalto Pré-Litorâneo está associado a relevos de topos planos com serras e maciços montanhosos (Cavedon & Shinzato, 2000).

São predominantes os solos da classe Argissolos Amarelos, apresentando horizonte B textural com muitas derivações nas classes texturais, desde arenosos a muito argilosos, com ocorrência frequente de camada adensada em subsuperfície, com alto grau de coesão (Cavedon & Shinzato, 2000).

4.2 Base de dados

A base de dados para o estudo foi composta por dados dendrométricos provenientes do Inventário Florestal Contínuo, dados climáticos oriundos de estações meteorológicas e dados edáficos advindos da classificação de solos da empresa. O período estudado compreendeu os anos de 1994 a 2006.

Para o estudo foram selecionados todos os talhões pertencentes a um mesmo clone amplamente distribuído em toda a área florestal, implantados com espaçamento de 12m² por planta (5,00x2,40 m ou 4,00x3,00 m), conferindo aproximadamente 833 árvores por hectare.

4.2.1 Inventário florestal contínuo

O inventário florestal contínuo inicia-se aos dois anos de idade, quando são alocadas parcelas permanentes com 22 plantas, conferindo uma área de cerca de 264 m². As parcelas são remedidas anualmente até o ano de corte e a intensidade amostral é de, aproximadamente, uma parcela a cada 15 ha.

Nas parcelas medem-se: a Circunferência à Altura do Peito (CAP – tomada a 1,30m do solo), de todas as árvores; a altura total das cinco primeiras árvores e a altura total das árvores dominantes que, selecionadas com base no conceito de Assmann (1970), correspondem às três árvores mais grossas da parcela.

Administrativamente, os plantios se dividem em projetos e talhões. É com base nessas divisões que os dados são estratificados para o processamento do inventário. Projetos são áreas contíguas plantadas em um mesmo ano. Eles são subdivididos em talhões, que são as menores unidades nas quais se aplica um único manejo (clone, espaçamento, preparo do solo, adubação, etc.). O tamanho dessas unidades é, basicamente, em função de uma melhor operacionalização da colheita.

Para a estimativa das alturas totais foi utilizada a relação hipsométrica descrita abaixo, proposta por Campos et al. (1984). Uma equação foi ajustada para cada projeto.

$$HTest = \exp \left[\beta_0 + \frac{\beta_1}{DAP} + \beta_2 \cdot \ln(Hdom) \right] + \varepsilon ,$$

em que

HTest - altura estimada

DAP – diâmetro à altura do peito, tomado a 1,30 m do solo

Hdom – altura dominante

Ln - logaritmo neperiano

β_{is} - parâmetros estimados

ε - Erro

Já para estimativa de volume, foi utilizado o modelo abaixo, proposto por Leite et al. (1995). Equações foram ajustadas para cada combinação de projeto e idade.

$$V_i = \beta_0 DAP^{\beta_1} HT^{\beta_2} \exp^{\frac{tx}{DAP}} \left[1 - \left(\frac{di}{DAP} \right)^{1+\beta_4 \cdot di} \right] + \varepsilon ,$$

V_i – volume estimado para a *iésima* árvore

DAP – diâmetro à altura do peito, tomado a 1,30 m do solo

HT - altura total

di – diâmetro comercial

tx – variável binária (0 para volume com casca e 1 para volume sem casca)

e = base dos logaritmos neperianos

β_{is} - parâmetros estimados

ε - Erro

Para este estudo, foram utilizados dados de 860 parcelas permanentes, medidas anualmente. O número total de medições foi 3.938, sendo, no mínimo duas e, no máximo, 8 medições por parcela. Em média, cada parcela foi medida 4,6 vezes.

4.2.2 Dados climáticos

Na área de estudo existem sete estações meteorológicas automáticas, apresentadas na Tabela 1, juntamente com sua localização geográfica.

TABELA 1 Relação e localização das estações meteorológicas na região de estudo.

<i>Número</i>	<i>UTMX</i>	<i>UTMY</i>
1	454384	8154589
2	409504	8199904
3	437163	8192378
4	473651	8246166
5	455335	8221263
6	437163	8192378
7	470853	8183942

Cada talhão estudado foi associado a uma estação meteorológica em função distância. Para tanto, determinou-se o centro geométrico de cada talhão, utilizando-se os polígonos de Thiessen, conforme apresentado por Maestri (2003), Temps (2005) e Ferraz-Filho (2006), e calculou-se sua distância em

relação a cada uma das estações. A menor distância definiu a associação entre a estação meteorológica e o talhão.

Das estações meteorológicas foram obtidos dados diários de precipitação pluviométrica, temperaturas média, mínima e máxima, radiação solar e déficit de pressão de vapor do ar. Todas as variáveis foram consideradas em bases mensais, cuja forma de cálculo e unidades estão apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2 Variáveis ambientais obtidas das estações meteorológicas, unidades de medição e forma de obtenção.

Variáveis – Estações Meteorológicas	Unidade	Forma de obtenção
Precipitação pluviométrica	mm.mês ⁻¹	Soma
Temperatura média	°C	Média
Temperatura mínima	°C	Média
Temperatura máxima	°C	Média
Radiação solar	MJ.m ⁻²	Média
Déficit de pressão de vapor do ar	KPa	Média

4.2.3 Dados de solo

Os dados de solo são provenientes de levantamento semidetalhado realizado pela própria empresa. A validação deste levantamento se deu pela amostragem de solos a cada 3 ha, possibilitando a identificação do tipo de solo, bem como de suas características.

Para este trabalho foram utilizadas as características texturais dos solos. Para tanto, o *layer* de solos foi inserido no mapa das parcelas de inventário contínuo e, para cada parcela, pode-se determinar o solo correspondente, bem como suas características texturais. Tais características estão apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3 Características texturais dos solos existentes na área de estudo.

Código	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)
1	75	18	7
2	59	33	8
3	56	38	6
4	57	35	8
5	63	40	7
6	47	45	8
7	61	43	6
8	49	42	9
9	37	56	7
10	51	41	8
11	53	40	7
12	56	38	6
13	59	34	7
14	58	34	8
15	58	33	9
16	63	29	8
17	67	25	8
18	70	21	9
19	74	17	9

4.2.4 Balanço hídrico do solo

Para avaliar as características hídricas do sistema foi realizado o balanço hídrico climatológico sequencial utilizando o método de Thornthwaite-Mather.

O balanço hídrico nada mais é do que o cômputo das entradas e saídas de água de um sistema. Pereira et al. (1997) afirmam que a entrada de água no solo se dá pela precipitação pluviométrica (P), ascensão capilar (AC) do lençol freático para a região das raízes e pela entrada lateral (Run In, RI). Já as saídas são representadas pela drenagem profunda (DP) do excesso de água para baixo da zona de raízes, pelo escoamento superficial (Surface Run Off, SRO) que ocorre normalmente em solos encharcados após sucessivos dias de chuva, pela saída lateral (Run Off, RO) e pela evapotranspiração real (ER) das plantas.

Portanto, em um intervalo de tempo qualquer, o balanço hídrico do solo pode ser assim equacionado:

$$\Delta A = (P + AC + RI) - (DP + SRO + RO + ER)$$

em que ΔA é a variação no armazenamento entre o início e o fim do intervalo de tempo.

Para situações de cálculo do balanço hídrico em regiões extensas, a ascensão capilar é compensada pela drenagem profunda, a drenagem lateral se autoanula (Run In = Run Off) e o escoamento superficial (SRO) é desprezado. Assim, a água armazenada no solo (ARM) neste mesmo intervalo de tempo (Δt ou $t - [t-1]$) é dada por:

$$ARM_t = ARM_{t-1} + P - ER - EXC$$

em que o excesso (EXC) é definido quando $ARM > CAD$, ou seja, quando a capacidade de armazenamento do solo atinge seu máximo limite, a quantidade de água adicional é perdida do volume deste controle. O déficit de água no solo é a diferença entre a evapotranspiração real (ET_r) e a evapotranspiração potencial (ET_p), quando $ET_r < ET_p$, o que significa falta de água para as plantas realizarem a máxima taxa de evapotranspiração possível.

A evapotranspiração também foi calculada pelo método de Thornthwaite-Mather. Segundo Pereira et al. (1997), a evapotranspiração real (ET_r) é uma função empírica dependente da água armazenada no solo (ARM), da alteração (ALT) nesse armazenamento de um período para o outro e da diferença entre precipitação e evapotranspiração potencial no período considerado. Por esse método, a água armazenada no solo para o período t é calculada por:

$$ARM_t = CAD \cdot e^{\frac{NegAcum_t}{CAD}}$$

em que CAD é a capacidade de armazenamento de água do solo e NegAcum é a diferença entre P-ETp, quando P<ETp. Utiliza-se este procedimento para cálculo de ARM para os períodos em que P-ETp for negativo.

A evapotranspiração também poderia ser determinada pelo método de Penman-Monteith contudo, não haviam informações de velocidade do vento, necessária para o cálculo, para todas as estações no período estudado.

A capacidade de armazenamento utilizada foi de 200 mm, por se encontrar entre a faixa encontrada na literatura. Segundo Pereira et al. (2002), em espécies florestais, a CAD varia de 150 a 300 mm. Stape & Gomes (1996) utilizaram CAD de 200 mm para a contabilização do balanço hídrico em plantios de eucalipto entre 3 e 8 anos. Neves (2000) determinou a CAD para plantios de eucalipto, no litoral do Espírito Santo, de 168 mm. Souza et al. (2006), estudando o efeito da disponibilidade hídrica em povoamentos de eucalipto, também optaram por utilizar CAD de 200 mm.

Com o valor da CAD determinado, quando houver um período chuvoso em que P-ETp seja positivo, então ARM será:

$$ARM_t = ARM_{t-1} + (P - ETp)$$

Se a precipitação for maior que a evapotranspiração potencial (P-ETp>0), então, a evapotranspiração real é igual à evapotranspiração potencial (ETr=ETp), pois não estará faltando água no sistema e as plantas estarão evapotranspirando na máxima taxa possível (potencial). Se P - ETp<0, então, a ETr será igual à P + |ALT|.

O déficit de água no solo, ou déficit hídrico (DEF), é dado por $ETp-ETr$. O excedente hídrico (EXC), por sua vez, é a quantidade de água que sobra no período chuvoso.

O balanço hídrico normal é calculado para o ciclo de um ano. Para outros períodos, menores ou maiores que um ano, utiliza-se o balanço hídrico sequencial, uma vez que este permite conhecer o que ocorreu, em termos de disponibilidade hídrica do solo, deficiência e excedente hídricos em períodos específicos. A diferença básica no cálculo desses dois tipos de balanço hídrico está na inicialização do cálculo. No balanço sequencial, por não ser um ano cíclico (normal), deve-se iniciar o balanço somente quando houver uma sequência de períodos com $(P-ETP)>0$ que seja suficiente para garantir $ARM = CAD$.

Na Tabela 4 são apresentadas as variáveis obtidas por meio do balanço hídrico e suas unidades de medida. Estas variáveis são calculadas e utilizadas em base mensal.

TABELA 4 Variáveis provenientes do balanço hídrico do solo e suas unidades de medida.

Variáveis – Balanço hídrico	Unidade
Déficit de água no solo	mm.mês ⁻¹
Excedente de água no solo	mm.mês ⁻¹
Evapotranspiração potencial	mm.mês ⁻¹
Evapotranspiração real	mm.mês ⁻¹

4.2.5 Combinação das variáveis ambientais com dados do inventário

Como citado por Maestri (2003), a correta interpretação e modelagem do efeito das variáveis ambientais no crescimento somente será possível se uma perfeita adequação entre as medições dos povoamentos em um inventário florestal e tais variáveis foi criteriosamente realizada.

Dentro deste princípio, os dados foram pareados de duas maneiras distintas. A primeira foi quando o modelo de crescimento e produção se baseava na taxa de crescimento, ou no incremento anual. Para estes casos, as variáveis fixas para cada parcela, como textura do solo e altitude, foram desconsideradas, uma vez que a mesma parcela foi comparada de um ano para outro. Assim, foram pareados os dados de incremento corrente anual (ICA) do volume e ou da área basal com os valores médios, base mensal, das variáveis ambientais ocorridas no período de tempo entre a medição 1 e a medição 2, que formaram o ICA a ser avaliado.

Landsberg & Gower (1997) salientam que a variação das condições ambientais ao longo de um período também oferece impacto no crescimento florestal. Dessa forma, como sugerido por Maestri (2003), determinou-se também o desvio padrão de cada variável ambiental entre a medição 1 e a medição 2. Os desvios foram pareados com os dados do inventário, tal como as médias.

A segunda forma de combinar os dados do inventário com as variáveis ambientais ocorreu para a modelagem do índice de sítio, em que se procurou relacionar a altura dominante numa determinada idade com as variáveis do ambiente. Neste caso, foram envolvidas as variáveis constantes das parcelas ao longo do tempo, como altitude e solo. Para este caso, computou-se a média e o desvio padrão da média dos valores mensais de cada variável, entre a data do plantio e a data da medição do inventário.

4.3 Inclusão das variáveis ambientais nos modelos de crescimento e produção

Foram utilizadas duas formas de inclusão de variáveis ambientais nos modelos de crescimento e produção. A primeira delas foi por meio do modelo de classificação de sítio e a segunda utilizando o modelo de área basal.

4.3.1 Modelo de classificação de sítio

A primeira forma de incluir variáveis ambientais em um modelo de crescimento e produção foi associá-las ao modelo de classificação de sítio e, posteriormente, utilizar esta classificação no modelo de crescimento e produção.

Para Maestri (2003), a capacidade produtiva de um sítio está relacionada ao valor assintótico que a função pode alcançar. Assim, se forem interpretados os parâmetros do modelo de Chapman & Richards, pode-se afirmar que a inserção de um coeficiente modificador (M_A) associado ao parâmetro A pode representar bem o efeito das variáveis do ambiente na classificação de sítio.

O modelo proposto por Chapman & Richards é dado por:

$$Hd = A.[1 - \exp(B.Id)]^{\left(\frac{1}{1-C}\right)}$$
$$Hd = A.[1 - \exp(B.Id)]^{\left(\frac{1}{1-C}\right)} + \varepsilon$$

em que

Hd = altura das árvores dominantes estimadas para a idade Id;

A = parâmetro que corresponde ao valor assintótico;

B = parâmetro associado à inclinação da curva de crescimento;

C = parâmetro associado ao ponto de inflexão da curva.

ε = Erro

O fator modificador inserido em A é dado por:

$$M_A = d_1 + d_2 VA_1 + d_3 VA_2 + \dots$$

em que

M_A = fator modificador de A;

VA_{is} = variáveis ambientais selecionadas;

d_{is} = coeficientes da regressão.

E sua inclusão no modelo obedeceu à seguinte forma:

$$Hd = A \cdot M_A \cdot [1 - \exp(B \cdot Id)]^{\left(\frac{1}{1-C}\right)} + \varepsilon$$

em que

HD, A, M_A , B, Id, C e ε foram definidos anteriormente.

Para esse ajuste, foram utilizados dados de parcelas permanentes, porém, tratados como valores temporários, ou seja, sem pareamento de remedições. Adicionalmente, a cada observação de altura dominante e idade, relacionou-se uma série de variáveis do ambiente. As variáveis estáticas, como textura do solo e altitude, foram consideradas diretamente. As variáveis dinâmicas, como precipitação, déficit de água e evapotranspiração, entre outras, tiveram suas médias e desvios mensais calculados desde o plantio de cada povoamento até a data da medição considerada e foram, então, pareadas aos dados de altura dominante e idade da parcela.

4.3.1.1 Seleção das variáveis para compor o modelo

Um conjunto de dados composto por inúmeras variáveis do ambiente apresenta que certa complexidade e correlações entre elas ocorrem frequentemente, o que é chamado de multicolinearidade. Um procedimento de

modelagem contendo tais características entre variáveis necessita de uma simplificação, sob pena de aumentar a complexidade do modelo pelo aumento do número de variáveis e, também, de influenciar negativamente as estimativas pela correlação entre variáveis independentes (Maestri, 2003).

Conforme Gonzáles & Formoso (2000), a multicolinearidade afeta significativamente os coeficientes da equação de regressão, alterando o valor e até o sinal em relação ao que ocorreria se não houvesse esse problema. Na presença de correlação alta, os coeficientes de regressão estimados tendem a ser imprecisos e as estimativas dos coeficientes podem oscilar consideravelmente de um subconjunto de dados para outro. Quando isso ocorre, as estimativas dos mínimos quadrados ainda são não-tendenciosas e eficientes, porém, o erro padrão dos coeficientes tende a ser grande e o teste baseado na estatística t de Student calculará significância menor que a real. Outro efeito da multicolinearidade é que se torna difícil obter interpretações sobre o efeito isolado de cada uma das variáveis.

Quando um conjunto de dados é composto de inúmeras variáveis, a identificação de quais são as mais expressivas para a explicação das variações do sistema recai em um problema típico tratado pelas técnicas de estatística multivariada. Os dados de variáveis aleatórias, por meio de procedimentos de álgebra matricial, são explorados de forma a se conhecer melhor sua capacidade de representação de um sistema aleatório qualquer. Dentre as técnicas de estatísticas multivariadas, a análise de componentes principais (ACP) apresenta-se como ferramenta importante para a averiguação das variáveis que mais explicam a variabilidade geral de um conjunto de dados.

Para Johnson & Wichern (1998), a ACP está relacionada com a explicação da estrutura de covariância por meio de poucas combinações lineares das variáveis originais em estudo. Os objetivos desta análise são: reduzir a dimensão original dos dados e facilitar a interpretação das análises realizadas.

Em geral, a explicação de toda a variabilidade do sistema determinado por p variáveis só pode ser efetuada por p componentes principais. No entanto, grande parte dessa variabilidade pode ser explicada por um número r de componentes, sendo $r < p$. A ACP tem as seguintes propriedades:

- a) são funções lineares das variáveis aleatórias originais;
- b) são ortogonais entre si, ou seja, são independentes umas das outras;
- c) a variação total entre eles é igual à variação total nas variáveis aleatórias originais; consequentemente, informações em função de diferenças entre as variáveis aleatórias observadas não são perdidas na transformação;
- d) a variação associada com cada componente é decrescente, em que a primeira componente principal irá representar a máxima proporção possível da variação total, a segunda irá representar a máxima proporção da variação remanescente e assim em diante.

O conjunto de todas as variáveis ambientais foi, então, analisado pela técnica de estatística multivariada de ACP, obtendo-se tantas componentes (autovalores) quanto era o número de variáveis. Dentro de cada componente, cada uma das n variáveis teve um peso relativo (coeficientes dos autovetores) que serviu de base para a identificação das variáveis com maior explicação da variabilidade do sistema e baixa correlação entre si, minimizando o efeito da multicolinearidade. Assim, dentro de cada componente principal, a variável que apresentou o maior coeficiente (valor modular) foi escolhida. O critério para a seleção do número de componentes foi o método de validação cruzada. Esta análise foi realizada no software Statistica 8.0.

Selecionadas as variáveis, utilizaram-se transformações do tipo: $\frac{1}{x}$, x^2 , $\ln(x)$ e \sqrt{x} para avaliar se elas explicariam melhor as variações no crescimento do que as variáveis originais. Para tanto, o modelo

$M_A = d_1 + d_2VA_1 + d_3VA_2 + \dots$ foi ajustado pelo método *stepwise*, tendo como critério de seleção de modelos o Akaike Information Criterion, ou AIC. Para este ajuste utilizou-se o software R, função *stepAIC*.

Para muitos pesquisadores, o AIC é melhor do que os demais métodos de seleção de modelos (F-parcial, R^2, \dots), uma vez que ele é baseado na distância entre um modelo de aproximação e o modelo real (hipotético), denominada de distância de Kulbach-Leibler. Esta distância pode ser conceitualizada como uma distância direta entre dois modelos e, segundo Wada e Kashiwagi (1990), é a mais fundamental de todas as medidas de informação pela simplicidade e propriedades aditivas, tornando-a uma base racional para seleção de modelos.

A fórmula para o cálculo do AIC para modelo linear é:

$$AIC = n.Ln(SQR) + 2p$$

em que

n = tamanho da amostra;

SQR = soma de quadrados dos resíduos;

Ln = logaritmo neperiano;

p = número de parâmetros do modelo.

Assim, no procedimento de regressão *stepwise*, a cada entrada de uma variável é examinada a sua exclusão, assim como a daquelas já presentes no modelo. O modelo selecionado em cada passo será o que apresentar menor valor de AIC.

4.3.1.2 Modelo de crescimento e produção

Uma vez ajustado o modelo de classificação de sítio, o mesmo foi utilizado no modelo de Clutter (1963), dado por:

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{S} + \beta_2 \frac{1}{Id_2} + \beta_3 \ln(AB_2) + \varepsilon$$

$$\ln(AB_2) = \ln(AB_1) \left(\frac{Id_1}{Id_2} \right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{Id_1}{Id_2} \right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{Id_1}{Id_2} \right) S + \varepsilon$$

em que

V_2 = volume futuro (m^3/ha);

\ln = logaritmo neperiano;

S = índice de sítio (m) – idade de referência 7 anos;

Id_1 = idade atual (anos);

Id_2 = idade futura (anos);

AB_2 = área basal futura (m^2/ha);

AB_1 = área basal corrente (m^2/ha);

β_{is} e α_{is} = parâmetros do modelo e

ε = Erro

Uma característica deste modelo é apresentar multicolinearidade. Para contornar este problema, Seiler (2004) recomenda a regressão em dois estágios, uma variante do método convencional, exemplificada a seguir. Suponha que se pretenda construir uma regressão de Y com as variáveis independentes A , B , C e D . Suponha também que D seja explicada pelas variáveis A , B , C , F e G . Nota-se que ocorre multicolinearidade porque uma variável independente D é explicada por outras variáveis independentes (A , B , C). A solução recomendada,

quando ocorre esse tipo de problema, consiste em executar a regressão de D com A, B, C, F, G e obter valores previstos para D, que indicaremos por “pD”. Em seguida, executa-se a regressão de Y com A, B, C, ”pD”. Assim, ao substituir a variável D por “pD”, os coeficientes estimados nesta última regressão são confiáveis e podem ser interpretados da mesma forma que na regressão convencional.

4.3.2 Modelo de área basal

Soares (1999) incluiu a precipitação anual no modelo de área basal e, posteriormente, este modelo dentro do modelo de volume segundo formulação compatível apresentada por Clutter (1963). Neste trabalho, utilizou-se uma metodologia semelhante, no entanto, foi incluído um modificador de área basal, M_{AB} . Este foi determinado da mesma maneira que M_A . O modelo de área basal passou, então, a assumir a seguinte forma:

$$\ln(AB_2) = \ln(AB_1) \left(\frac{Id_1}{Id_2} \right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{Id_1}{Id_2} \right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{Id_1}{Id_2} \right) S + \alpha_2 \left(1 - \frac{Id_1}{Id_2} \right) M_{AB} + \varepsilon$$

em que

\ln = logaritmo neperiano;

S = Índice de sítio (m) – idade de referência 7 anos;

Id_1 = Idade atual (anos);

Id_2 = Idade futura (anos);

AB_2 = Área basal futura (m²/ha);

AB_1 = Área basal corrente (m²/ha);

α_{is} = parâmetros do modelo;

M_{AB} = modificador do modelo de área basal, função das variáveis ambientais;

ε = Erro

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Inclusão das variáveis no modelo de sítio

Os resultados que serão apresentados inicialmente se referem à inclusão das variáveis ambientais no modelo de classificação de sítio. Iniciando pelo ajuste do modelo sem as variáveis ambientais, para comparações futuras, passando pela seleção das variáveis, ajuste do modelo com as variáveis selecionadas e finalmente a estimativa do volume.

5.1.1 Ajuste do modelo sem variáveis ambientais

A primeira tentativa de inserir as variáveis do ambiente em um modelo de crescimento e produção foi por meio do modelo de classificação de sítio. O modelo utilizado foi o de Chapman & Richards, que foi inicialmente ajustado sem a adição das variáveis ambientais. O resultado deste ajuste pode ser observado na Tabela 5.

TABELA 5 Parâmetros e estatísticas do ajuste do modelo de Chapman & Richards, sem variáveis ambientais.

Parâmetro	Estimativa	Estatísticas
A	33,42170	$R^2 = 90,12\%$
B	-0,424228	$S_{xy} = 1,80 \text{ m}$
C	0,376544	$S_{xy}\% = 6,9\%$

O parâmetro A, valor assintótico, foi de 33,4 m, sugerindo que esta é a altura dominante máxima média atingida pela floresta. O erro padrão da estimativa (S_{xy}), que significa o erro médio para estimativa da altura dominante em função da idade, foi de 1,8 m ou 7%. O coeficiente de determinação (R^2) foi

de 90%, mostrando que, de toda a variação em altura dominante, este foi o percentual explicado pela idade.

O gráfico da Figura 1 apresenta a relação entre a altura dominante real e a estimada em função da idade.

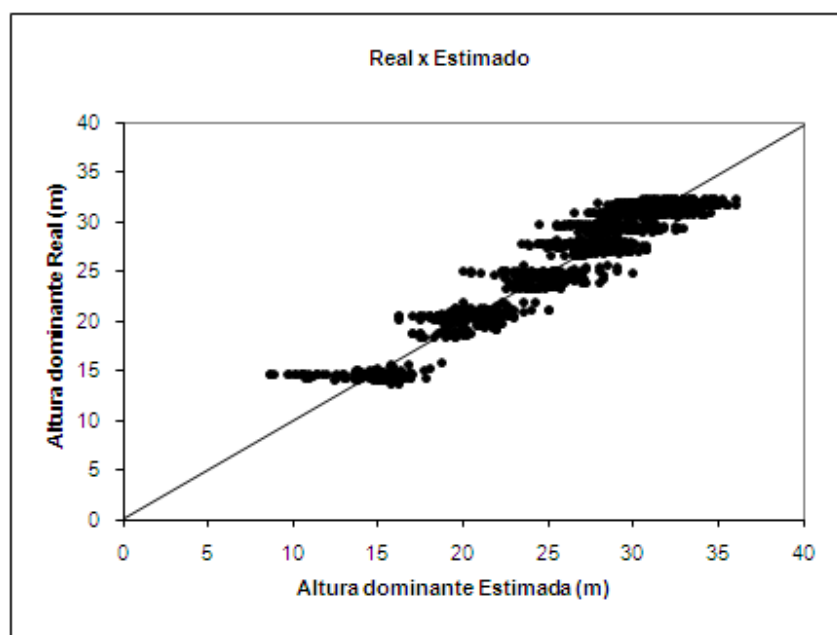


FIGURA 1 Relação entre a altura dominante real e estimada pelo modelo de Chapman e Richards, sem a inclusão de variáveis ambientais.

Neste gráfico pode-se perceber que há uma pequena tendência de superestimativa das alturas dominantes para as florestas de dois anos. Entretanto, não é objetivo discutir aqui as características da dispersão dos resíduos sem, antes, possuir o modelo com variáveis ambientais que será o objeto de comparação.

Da classificação de sítios obtiveram-se três classes: índice 34 m para a classe I; 31 m para a classe II e 28 m para a classe III, sendo a idade de referência de 7 anos. Na Figura 2 observa-se o formato das curvas de sítio para cada classe.

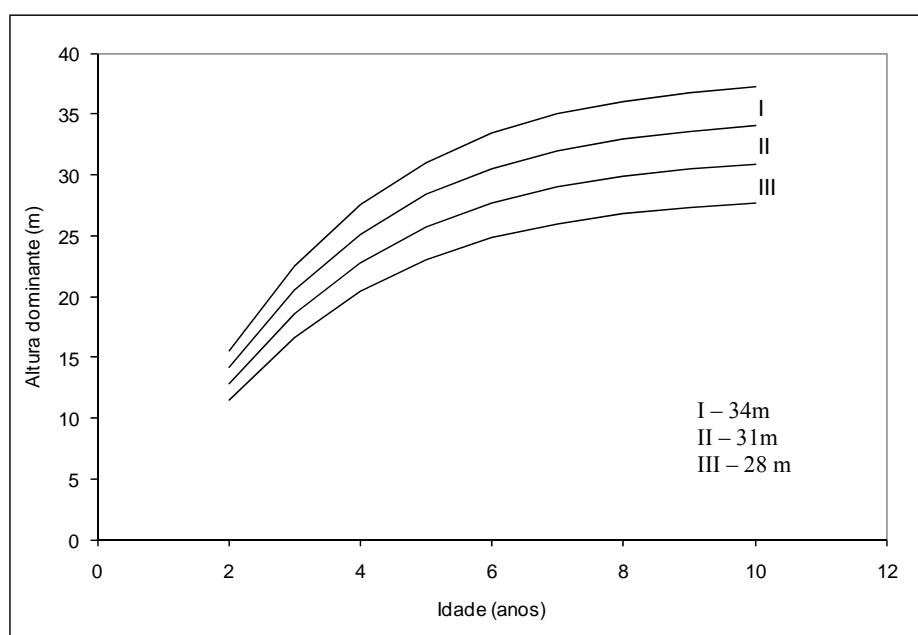


FIGURA 2 Família de curvas de sítio, sem variáveis ambientais, apresentando três classes de sítio.

Para uma família de curvas de sítio, uma característica importante é a estabilidade das parcelas do inventário. Estabilidade é a característica na qual uma parcela, uma vez classificada em uma determinada classe de sítio, permanece nesta mesma classe com o passar do tempo. No entanto, é comum, principalmente nas primeiras idades, que as parcelas mudem pelo menos uma vez de classe de sítio. Os dados da Tabela 6 demonstram o quão estável foi a classificação realizada, podendo-se perceber que 17% das parcelas jamais

mudaram de classe de sítio, 67% mudaram uma vez de classe e as demais, 16%, mudaram duas vezes de classe.

TABELA 6 Estabilidade da classificação de sítio

Número de mudança de classe	% de parcelas
0	17%
1	67%
2	16%

A estabilidade é uma importante ferramenta a ser analisada na comparação e na seleção de famílias de curvas de sítio.

5.1.2 Seleção das variáveis ambientais

A seleção inicial para as variáveis participarem do modelo de sítio foi realizada por meio da análise de componentes principais.

Na Tabela 7 são apresentadas as componentes selecionadas para representar a variação total dos dados ambientais. Além das médias mensais das variáveis, incluíram-se também os valores de desvio padrão.

TABELA 7 Análise de componentes principais das variáveis ambientais médias e seus desvios padrão.

Componente Principal	Autovalores	Variância total (%)	Autovalores acumulados	Variância acumulada (%)
1	12,0	59,8	12,0	59,8
2	4,0	20,1	16,0	79,9
3	2,3	11,4	18,2	91,2
4	0,9	4,7	19,2	95,9
5	0,6	2,8	19,8	98,8

A primeira componente foi capaz de explicar 59,8% da variância total, a segunda explicou 20,1% e as cinco componentes juntas explicaram 98,8% da variação total.

Dentro de cada componente principal, observaram-se os valores dos autovetores e aqueles com maior valor absoluto foram selecionados como os mais importantes. Assim, para todas as variáveis ambientais testadas, as mais importantes foram:

- a) temperatura média (°C) - Tmed
- b) evapotranspiração real mensal (mm) ETP-R
- c) precipitação mensal (mm) PPT
- d) evapotranspiração potencial mensal (mm) EVP-P
- e) temperatura mínima (°C) Tmin

Apenas as variáveis climáticas foram selecionadas para compor o modelo. As variáveis fixas das parcelas, como textura do solo e altitude, não se mostraram importantes para explicar a variação total.

Em estudo semelhante, Maestri (2003) encontrou, como variáveis explicativas da variação total, praticamente as mesmas variáveis encontradas neste estudo, que são: temperatura média, desvio padrão da evapotranspiração potencial, temperatura mínima e precipitação mensal, comprovando que as variáveis selecionadas realmente são as mais importantes.

Selecionadas as variáveis, o fator modificador da assíntota A, do modelo de Chapman & Richards, é dado por:

$$M_A = d_1 + d_2 T_{med} + d_3 ETPR + d_4 PPT + d_5 ETPP + d_6 T_{min}$$

Uma tentativa de tentar explicar melhor a variação da assíntota em função das variáveis ambientais foi realizar transformações do tipo: $\frac{1}{x}$, x^2 , $\ln(x)$ e \sqrt{x} nas variáveis selecionadas por ACP, para avaliar se estas explicariam melhor as variações no crescimento do que as variáveis originais

Para selecionar as variáveis, utilizou-se o procedimento *stepwise* e o critério de Akaike para a seleção do melhor modelo. Com exceção da evapotranspiração potencial, em que o seu inverso explicou melhor a variação do crescimento em altura dominante, as demais variáveis permaneceram iguais.

Dessa forma, o coeficiente modificador de A passou a ser constituído por:

$$M_A = d_1 + d_2 T_{med} + d_3 ETPR + d_4 PPT + d_5 \frac{1}{ETPP} + d_6 T_{mim}$$

5.1.3 Ajuste do modelo com variáveis ambientais

Na Tabela 8 são apresentados os parâmetros ajustados e as estatísticas do modelo de Chapman & Richards ajustadas com variáveis ambientais.

TABELA 8 Parâmetros e estatísticas do ajuste do modelo de Chapman & Richards com variáveis ambientais.

Parâmetro	Estimativa	Estatísticas
A	14,47640	$R^2 = 92,36\%$
B	-0,481288	$S_{xy} = 1,59 \text{ m}$
C	0,449681	$S_{xy}\% = 6,1\%$
d_1	-19,99420	
d_2	0,610016	
d_3	0,0109042*	
d_4	0,0000967*	
d_5	814,47900	
d_6	-0,0704151*	

* parâmetros não significativos, a 5% de probabilidade, pela distribuição t.

Nota-se que as estatísticas aqui apresentadas são superiores àquelas apresentadas na Tabela 5. No entanto, algumas variáveis não apresentaram efeitos significativos no modelo, como a evapotranspiração real, a precipitação e a temperatura mínima, representadas pelos parâmetros d_3 , d_4 e d_6 , respectivamente. Assim, um novo ajuste foi realizado, excluindo-se estas variáveis. Os resultados estão apresentados na Tabela 9.

TABELA 9 Parâmetros e estatísticas do ajuste do modelo de Chapman & Richards com variáveis ambientais, considerando apenas os parâmetros significativos.

Parâmetro	Estimativa	Estatísticas
A	13,3422	$R^2 = 92,06\%$
B	-0,497329	$S_{xy} = 1,60 \text{ m}$
C	0,475581	$S_{xy}\% = 6,1\%$
d_1	-19,9410	
d_2	0,612822	
d_5	822,7310	

Novamente, neste ajuste, as estatísticas foram, quando comparadas com o modelo de sítio ajustado sem variáveis ambientais, superiores. No entanto, antes da análise dos resíduos é necessário analisar a correlação entre as variáveis ambientais temperatura média e evapotranspiração potencial. A correlação linear simples entre essas duas variáveis é de 98%. Assim, parece lógico que o modelo apresente uma multicolinearidade problemática.

Para comprovar a existência desta característica, foi utilizado o Variance Inflation Factor (VIF) que, segundo Draper & Smith (1980), é dado por:

$$VIF_k = \frac{1}{1 - r_k^2}$$

em que

VIF_k = *Variance Inflation Factor* da variável k;

r_k = correlação da variável k com as demais variáveis explicativas do modelo.

De acordo com os mesmos autores, um valor de VIF menor do que 1 mostra que não existe multicolinearidade; para valores de 1 a 10 existe uma multicolinearidade aceitável, que não trará danos às estatísticas e inferências do modelo; já os valores de VIF maior que 10 representam uma multicolinearidade problemática.

Para as variáveis evapotranspiração potencial e temperatura média, o valor de VIF encontrado foi de 25,25. Dessa forma, a multicolinearidade é alta e uma forma de corrigi-la é excluindo uma das variáveis do modelo. A variável evapotranspiração potencial foi excluída e o modelo final passou a ser composto apenas pela temperatura média, como apresentado a seguir:

$$Hd = A.(d_1 + d_2 \cdot Tmed) [1 - \exp(B.Id)]^{\left(\frac{1}{1-c}\right)}$$

Um novo ajuste foi realizado e os resultados estão apresentados na Tabela 10. Como nos casos anteriores, todas as estatísticas do modelo de sítio com a variável ambiental temperatura média foram superiores àquelas do modelo de sítio convencional.

TABELA 10 Parâmetros e estatísticas do ajuste do modelo de Chapman & Richards com variáveis ambientais, considerando apenas os parâmetros significativos.

Parâmetro	Estimativa	Estatísticas
A	18,345	$R^2 = 91,96\%$
B	-0,538445	$S_{xy} = 1,61 \text{ m}$
C	0,487706	$S_{xy}\% = 6,1\%$
d_1	5,18354	
d_2	-0,157777	

O erro padrão da estimativa (S_{xy}) foi de 1,61 m, enquanto para o modelo sem a variável temperatura média, foi de 1,80 m. Estes valores demonstram que houve um ganho de 11,05% em precisão na estimativa da altura dominante. Maestri (2003), em um trabalho semelhante, utilizou a precipitação e a temperatura média como modificadores da assíntota em um modelo de Chapman & Richards e conseguiu um ganho de 6,9% em relação ao modelo original sem variáveis ambientais.

O gráfico apresentado na Figura 3 apresenta a relação entre a altura dominante real e a estimada em função da idade.

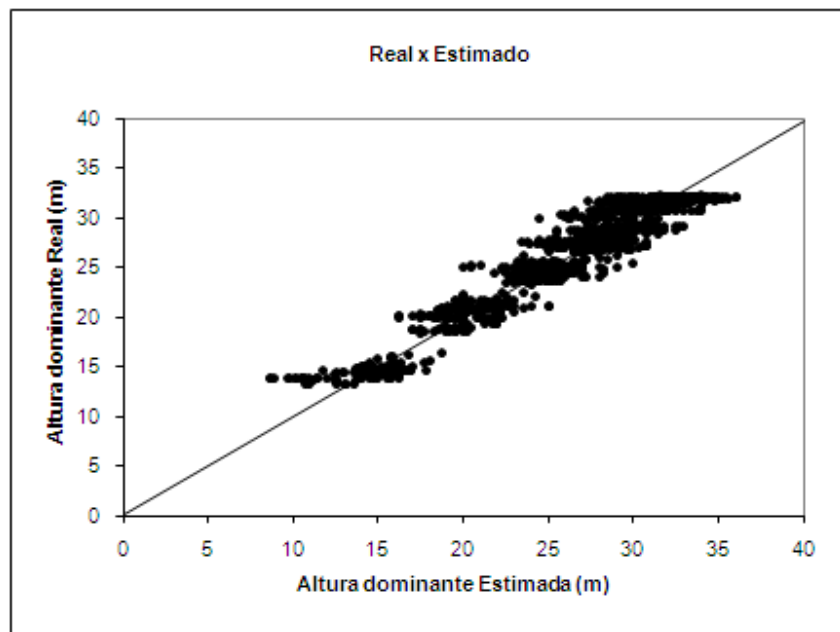


FIGURA 3 Relação entre a altura dominante real e estimada pelo modelo de Chapman e Richards, com variáveis ambientais.

Comparando-se estes com aquele apresentado para o ajuste sem variáveis ambientais não é possível perceber nenhuma alteração significativa, uma vez que o ajuste inicial não apresentou fortes tendências de super ou subestimativas. A superestimativa observada para os dois anos de idade persistiu, embora agora de maneira atenuada. Em síntese, há uma aproximação maior dos resíduos em relação ao zero, o que já era esperado, tendo em vista o menor valor do erro padrão da estimativa.

A estabilidade da classificação também foi analisada e está apresentada na Tabela 11.

TABELA 11 Estabilidade da classificação de sítio com as variáveis ambientais.

Número de mudança de classe	% de parcelas
0	22%
1	68%
2	10%

Houve melhora na estabilidade e o percentual de parcelas que não mudou de classe subiu de 12% para 17%. Já o percentual de parcelas que mudaram duas vezes de classe diminuiu de 16% para 10%. Este fato comprova que a instabilidade, muitas vezes observadas nas classificações de sítio pode, em parte, ser explicadas pelas variações do ambiente.

Na Tabela 12 é apresentado o comportamento da curva de sítio média de acordo com a variação da temperatura. Para a construção desta tabela, determinou-se a média e o desvio padrão da temperatura média para a área em estudo, tendo sido encontrados 21,96°C e 0,32°C, respectivamente. Partindo desses valores, determinou-se a altura dominante para classes de temperatura média variando 0; $\pm 1,5$; $\pm 2,5$ e $\pm 3,5$ desvios em relação à média.

TABELA 12 Variação dos valores de altura dominante, em função da variação da temperatura média e da idade.

Tmed (°C)	Idade (anos)						
	2	3	4	5	6	7	8
20,84	15,4	22,6	27,3	30,3	32,1	33,2	33,9
21,16	15,0	22,0	26,6	29,5	31,3	32,3	33,0
21,48	14,6	21,4	25,9	28,7	30,4	31,5	32,1
21,96	14,0	20,5	24,8	27,5	29,1	30,1	30,7
22,44	13,4	19,6	23,7	26,3	27,9	28,8	29,4
22,76	13,0	19,0	23,0	25,5	27,0	27,9	28,5
23,08	12,5	18,4	22,2	24,7	26,1	27,0	27,6

Por se tratar de uma espécie como o eucalipto, para o qual a luminosidade é altamente favorável ao crescimento, não era de se esperar que o

aumento da temperatura fosse inversamente proporcional ao crescimento. Contudo, este resultado se explica pela alta correlação entre a temperatura e a evapotranspiração potencial (0,98).

Com os dados da Tabela 12 construiu-se o gráfico apresentado na Figura 4, em que se observa o comportamento da curva média, e das demais curvas, considerando uma variação de $0,32^{\circ}\text{C}$ na temperatura.

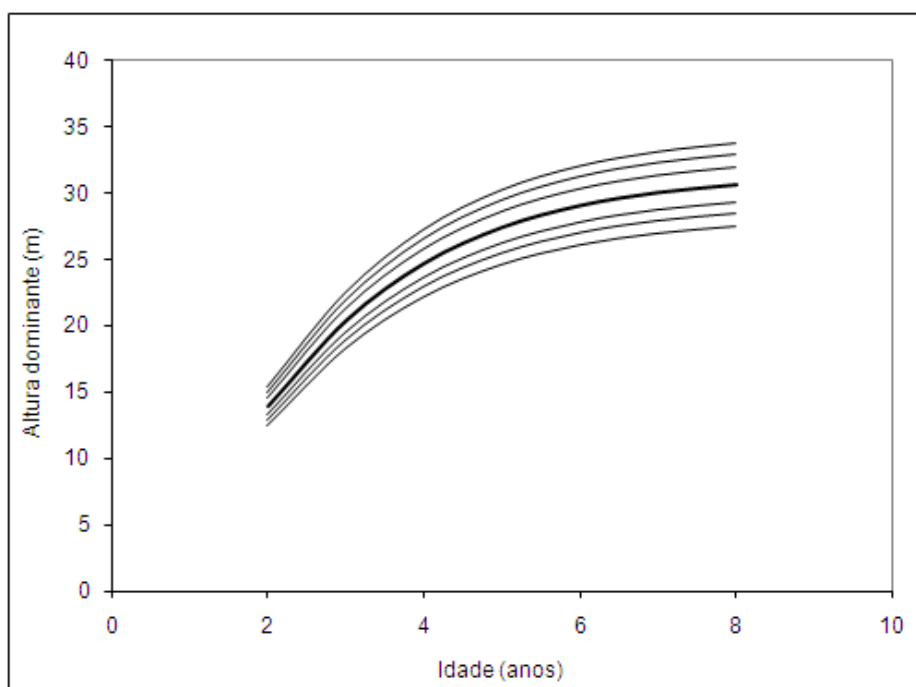


FIGURA 4 Curva média para a temperatura de $21,96^{\circ}\text{C}$ e suas variações, em função do aumento ou da diminuição da temperatura média anual.

5.1.4 Estimativas de volume

Para saber o efeito da inclusão das variáveis ambientais na estimativa do volume do povoamento utilizou-se o modelo de sítio com e sem variáveis

ambientais no modelo de Clutter (1963). Os modelos foram ajustados pelo método do ‘ajuste simultâneo’ e os resultados estão apresentados na Tabela 13.

TABELA 13 Parâmetros e estatísticas do ajuste do modelo para projeção volumétrica com e sem variáveis ambientais.

Parâmetros	Sem variáveis ambientais	Estatísticas	Com variáveis ambientais	Estatísticas
β_0	3,79585	$R^2 = 96,7\%$	4,33157	$R^2 = 96,5\%$
β_1	-29,3825	$S_{xy} = 16,26 \text{ m}^3$	-52,0147	$S_{xy} = 15,08 \text{ m}^3$
β_2	-1,44336	$S_{xy}\% = 5,7\%$	-1,24295	$S_{xy}\% = 5,2\%$
β_3	1,01498		1,07739	
β_4	3,12914		11,1091	
β_5	*		-0,2575	

* parâmetro não significativo, pelo teste de t, apresentando p-value=0,3109

O parâmetro β_5 , que contém o parâmetro índice de sítio, não foi significativo para o modelo sem variáveis ambientais. A adição da temperatura média anual tornou-o significativo. O modelo sem variáveis ambientais apresentou erro padrão da estimativa de 16,26 m³/ha contra um erro de 15,08 m³/ha. Assim, a adição da precipitação no modelo de sítio e posterior ajuste do modelo de Clutter (1963) ofereceu um ganho de 7,3%.

Os gráficos das Figuras 5 e 6 apresentam a dispersão de resíduos do modelo ajustado com e sem variáveis ambientais. A diferença se deu na maior concentração dos resíduos próximo ao zero, quando o modelo foi ajustado com variáveis ambientais.

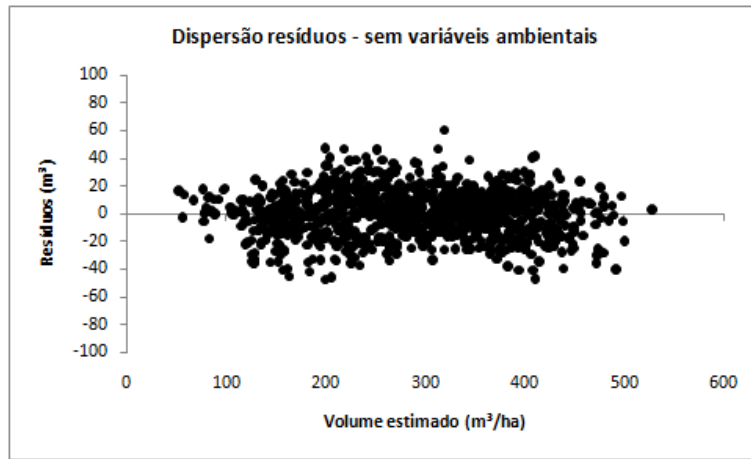


FIGURA 5 Dispersão de resíduos para o modelo volumétrico ajustado com os valores de índice de sítio, sem variáveis ambientais.

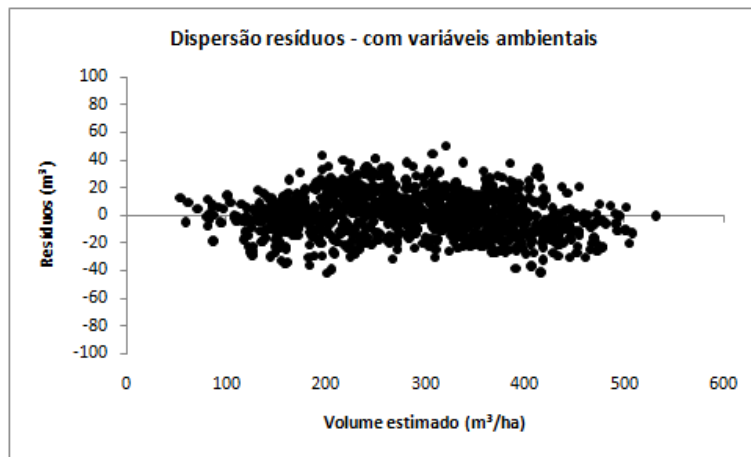


FIGURA 6 Dispersão de resíduos para o modelo volumétrico ajustado com os valores de índice de sítio, com variáveis ambientais.

5.2 Inclusão das variáveis no modelo de área basal

Nos itens a seguir serão apresentados os resultados da inclusão das variáveis ambientais no modelo de área basal.

5.2.1 Ajuste do modelo sem variáveis ambientais

O modelo para estimativa de área basal foi inicialmente ajustado sem variáveis ambientais. Os resultados podem ser observados na Tabela 14.

TABELA 14 Parâmetros e estatísticas do ajuste do modelo para projeção da área basal.

Parâmetro	Estimativa	Estatísticas
A	4,403610	$R^2 = 96,9\%$
B	-0,021169	$S_{xy} = 1,20 \text{ m}^2$ $S_{xy}\% = 5,0\%$

O erro padrão da estimativa (S_{xy}), que significa o erro médio para estimativa da altura dominante em função da idade, foi de 1,2 m² ou 5%. O coeficiente de determinação (R^2) foi de, aproximadamente, 97%. Os gráficos das Figuras 8 e 9 representam a relação entre a área basal real e a estimada e também a dispersão dos resíduos absolutos.

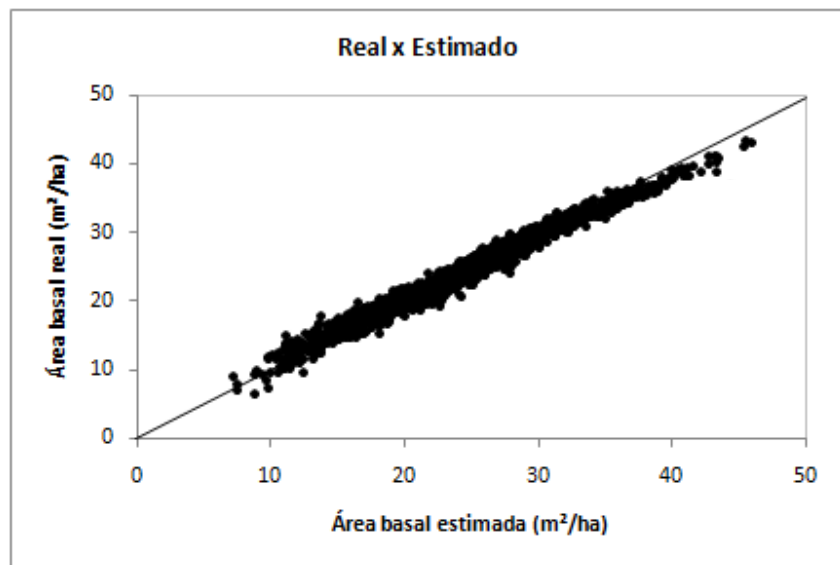


FIGURA 8 Relação entre área basal real e área basal estimada, sem a inclusão de variáveis ambientais.

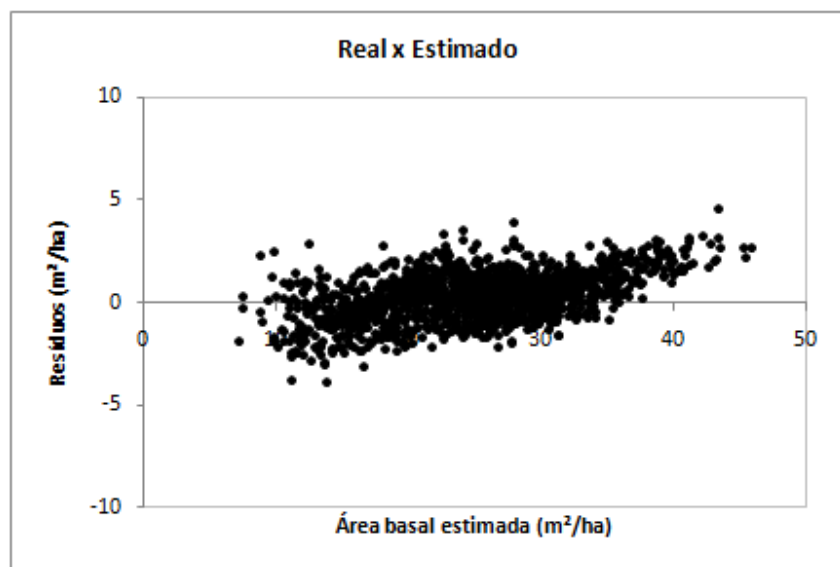


FIGURA 9 Dispersão de resíduos para o modelo de área basal, sem a inclusão de variáveis ambientais.

Apesar de as estatísticas apresentarem que o ajuste foi muito bom, pelos gráficos pode-se perceber que há uma tendência de superestimar os menores valores de área basal e subestimar os maiores.

5.2.2 Seleção das variáveis ambientais

Diferente da seleção das variáveis ambientais para inclusão no modelo de sítio, em que foram considerados sua média e desvio padrão desde a data do plantio até a data de medição, aqui se considera o efeito do ambiente no incremento anual em área basal. Assim, os valores médios e desvio padrão são calculados no período entre uma medição e outra.

As variáveis selecionadas por ACP, apresentadas no segundo capítulo deste trabalho foram:

- a) déficit de pressão de vapor (kPa);
- b) temperatura média (°C);
- c) evapotranspiração real mensal (mm);
- d) temperatura mínima (°C) – desvio padrão;
- e) precipitação média mensal (mm).

Partindo destas variáveis, buscou-se determinar o fator modificador de área basal (M_{AB}), como apresentado abaixo.

$$M_{AB} = d_1 + d_2 DPV + d_3 T_{med} + d_4 ETPR + d_5 T \min(d) + d_6 PPT + \varepsilon$$

Como realizado para o modelo de índice de sítio, transformações do tipo: $\frac{1}{x}$, x^2 , $\ln(x)$ e \sqrt{x} foram realizadas, para avaliar a possibilidade de melhor explicar o crescimento em área basal. Para tanto, o procedimento stepwise e o critério de Akaike para seleção do melhor modelo foram utilizados.

O inverso do déficit de pressão de vapor (DPV) explicou melhor o incremento anual em área basal do que somente DPV. As demais variáveis permaneceram iguais. Dessa forma, o coeficiente modificador de M_{AB} passou a ser constituído por:

$$M_{AB} = d_1 + d_2 \frac{1}{DPV} + d_3 T_{med} + d_4 ETPR + d_5 T \min(d) + d_6 PPT + \varepsilon$$

5.2.3 Ajuste do modelo com variáveis ambientais

O modelo ajustado com todas as variáveis ambientais apresentou parâmetros não significativos, pelo teste t de Student, considerando $\alpha=0,05$, para as variáveis T_{med} , $ETPR$, T_{min} . Dessa forma, o modelo final foi:

$$\ln(AB_2) = \ln(AB_1) \left(\frac{Id_1}{Id_2} \right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{Id_1}{Id_2} \right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{Id_1}{Id_2} \right) S + d_1 \left(d_2 \frac{1}{DPV} + d_3 PPT \right) + \varepsilon$$

Na Tabela 15 são apresentados os resultados do ajuste, parâmetros e estatísticas.

TABELA 15 Parâmetros e estatísticas do modelo de projeção em área basal com variáveis ambientais.

Parâmetro	Estimativa	Estatísticas
α_0	4,25519	$R^2 = 97,5\%$
α_1	-0,02783	$S_{xy} = 1,0 \text{ m}^2$
d_1	0,00859	$S_{xy}\% = 5\%$
d_2	0,06806	
d_3	0,30328	

O erro padrão da estimativa (S_{xy}) foi de $1,0 \text{ m}^2/\text{ha}$; já para o modelo sem variáveis ambientais foi de $1,2 \text{ m}^2/\text{ha}$. Estes valores demonstram que houve

um ganho de 17% em precisão na estimativa da área basal. Além desse ganho significativo na precisão das estimativas, o gráfico de Real x Estimado (Figura 10) e o gráfico de dispersão dos resíduos (Figura 11) demonstram que as tendências apresentadas pelo modelo sem variáveis ambientais de superestimar os menores valores de área basal e subestimar os valores maiores foram amenizadas e praticamente desapareceram.

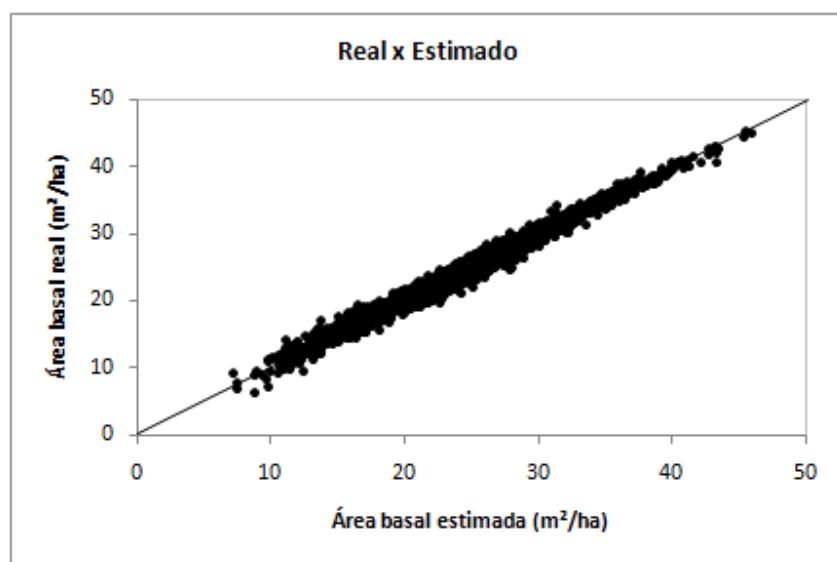


FIGURA 10 Relação entre área basal real e área basal estimada, com a inclusão de variáveis ambientais.

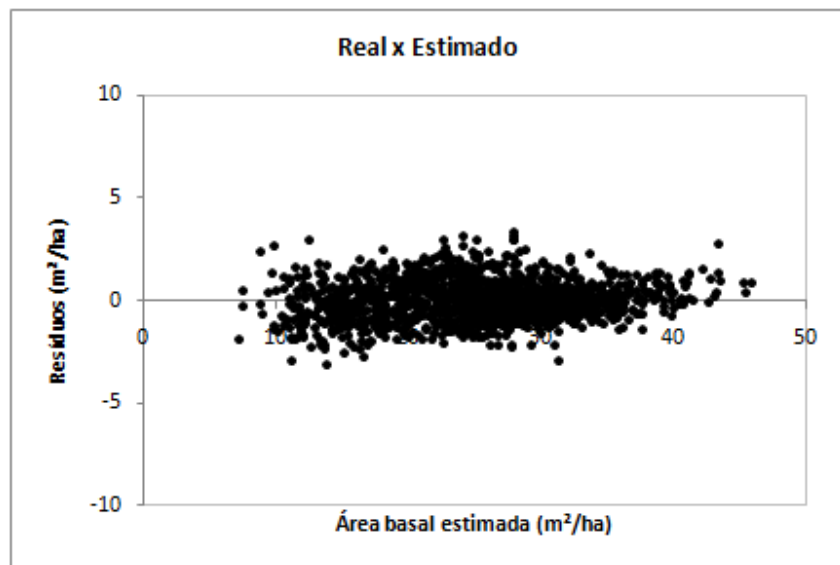


FIGURA 11 Dispersão de resíduos para o modelo de área basal, com a inclusão de variáveis ambientais.

Na Tabela 16 apresenta-se o comportamento da área basal em função da idade e da variação do déficit de pressão de vapor (DPV). Para a construção da tabela, foi utilizado o valor médio da precipitação, 106 mm/mês, e os valores de DPV variando em 0; $\pm 1,5$; $\pm 2,5$ e $\pm 3,5$ desvios em relação à média, sendo a média de $0,40 \text{ MJ/m}^2$ e o desvio padrão de $0,10 \text{ MJ/m}^2$. Considerou-se o índice de sítio de 31 m e a área basal média para cada classe de idade.

TABELA 16 Variação da área basal em função da idade e dos valores de déficit de pressão do vapor do ar.

	Idade 1	2	3	4	5	6	7	8
	Idade 2	3	4	5	6	7	8	9
DPV (MJ/m ²)	0,10	16,2	17,6	23,3	27,4	31,8	34,8	37,3
	0,20	16,2	17,5	23,2	27,3	31,6	34,6	37,2
	0,30	16,1	17,5	23,1	27,1	31,5	34,4	37,0
	0,40	16,0	17,4	23,0	27,0	31,3	34,3	36,8
	0,50	15,9	17,3	22,9	26,8	31,2	34,1	36,6
	0,60	15,8	17,2	22,8	26,7	31,0	33,9	36,4
	0,70	15,8	17,1	22,7	26,6	30,8	33,7	36,2

Observando-se os valores estimados de área basal para uma mesma idade, percebe-se sua diminuição à medida que o DPV aumenta. A variação não é muito grande, sendo de 16,2 m²/ha com DPV de 0,10 MJ/m² e de 15,8 m²/ha quando o DPV aumentou para 0,80 MJ/m², aos dois anos de idade. Aos sete anos, a variação da área basal foi de 31,8 para 30,8 m²/há, quando o DPV aumentou de 0,10 para 0,70 MJ/m².

Na Tabela 17 é apresentada a mesma análise, no entanto, variando-se a precipitação em 0; ±1,5; ±2,5 e ±3,5 desvios em relação à média, sendo a média de 106 mm/mês e o desvio padrão de 22,8 mm/mês. O valor do DPV foi constante e igual a 0,40 MJ/m².

TABELA 17 Variação da área basal em função da idade e dos valores de precipitação.

	Idade 1	2	3	4	5	6	7	8
	Idade 2	3	4	5	6	7	8	9
Precipitação (mm/mês)	26	13,0	14,1	18,7	21,9	25,4	27,8	29,9
	49	13,8	15,0	19,8	23,3	27,0	29,5	31,7
	72	14,6	15,9	21,0	24,7	28,6	31,3	33,7
	106	16,0	17,4	23,0	27,0	31,3	34,3	36,8
	140	17,5	19,0	25,1	29,5	34,2	37,5	40,2
	163	18,6	20,2	26,7	31,3	36,3	39,7	42,7
	186	19,7	21,4	28,3	33,2	38,6	42,2	45,3

Ao contrário do que foi observado para o déficit de pressão de vapor, em que a variação da área basal foi pequena, com o aumento dos valores médios mensais de precipitação as variações foram grandes. Para a área basal projetada da idade 6 para a idade 7, o valor passou de 25,4 m²/ha, quando a precipitação mensal foi de 26 mm/mês, para 38,6 m²/ha, quando a precipitação aumentou para 186 mm/mês.

5.2.4 Estimativas volumétricas

Ajustados os modelos e estimados os valores de área basal, com e sem as variáveis ambientais, pode-se inferir sobre o efeito das mesmas no volume. Para tanto, ajustou-se o seguinte modelo:

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{S} + \beta_2 \frac{1}{Id_2} + \beta_3 \ln(AB_2) + \varepsilon$$

Os parâmetros estimados e as medidas de precisão para o modelo com as variáveis do ambiente e para o modelo convencional estão apresentados na Tabela 18.

TABELA 18 Parâmetros e estatísticas do ajuste do modelo para projeção volumétrica com e sem variáveis ambientais.

Parâmetros	Sem variáveis ambientais	Estatísticas	Com variáveis ambientais	Estatísticas
β_0	2,80269	$R^2 = 96,7\%$	2,63246	$R^2 = 97.1\%$
β_1	-8,9855	$S_{xy} = 33,6 \text{ m}^3$	-9,8655	$S_{xy} = 30,7 \text{ m}^3$
β_2	-2,02794	$S_{xy}\% = 10\%$	-1,58382	$S_{xy}\% = 9\%$
β_3	1,11727		1,15283	

Todos os parâmetros foram significativos estatisticamente, apresentando valores de p -value próximos de zero, por meio do teste T. A adição da área basal estimada com as variáveis ambientais melhorou o desempenho do modelo. O modelo sem variáveis ambientais apresentou erro padrão da estimativa de 33,5 m^3/ha contra um erro de 30,7 m^3/ha , quando as variáveis ambientais foram adicionadas. O ganho em precisão foi de 9,3%. Observando-se os gráficos de resíduos, nota-se que os modelos se mostraram semelhantes, com tendência de superestimar os volumes maiores.

Na Tabela 19 é apresentada a mesma simulação realizada na Tabela 17, no entanto, agora o cálculo é para volume. Os valores de precipitação e idade estão apresentados na tabela, o índice de sítio utilizado foi de 31 m, o valor do déficit de pressão de vapor foi de 0,40 MJ/m^2 .

TABELA 19 Variação volumétrica em função da idade e dos valores de precipitação.

		Estimativas volumétricas							
		Idade 1	2	3	4	5	6	7	8
Precipitação (mm/mês)	Idade 2	3	4	5	6	7	8	9	
		26	96,4	120,9	180,9	229,3	282,6	322,4	358,0
		49	103,3	129,5	193,7	245,6	302,7	345,3	383,4
		72	110,6	138,7	207,5	263,0	324,2	369,8	410,6
		106	122,6	153,7	230,0	291,5	359,3	409,9	455,1
		140	135,9	170,4	254,9	323,1	398,2	454,4	504,4
		163	145,6	182,5	273,0	346,0	426,5	486,6	540,3
		186	155,9	195,5	292,4	370,6	456,8	521,2	578,6

Como foi observado para área basal na Tabela 17, o volume também variou significativamente com a variação da precipitação. Para a idade 7, o volume estimado foi menor do que 300 m³/ha, com precipitação média mensal de 26 mm e superior a 450 m³/ha, quando a precipitação mensal foi de 186 mm. Obviamente, esta variação é muito grande, contudo, deve-se levar em conta que, com as atuais condições ambientais, a probabilidade de ocorrer precipitação média mensal de 26 ou de 186 mm, durante um ciclo de 7 anos tende a zero. Deve-se considerar também que a variação climática é cíclica e, durante um grande período de tempo, os valores tendem para a média. Em outras palavras, em 7 anos ocorrerão anos secos, mas também anos chuvosos e a precipitação média tenderá para a média. Todavia, o modelo apresentado é muito útil para explicar variações no crescimento, em função da precipitação.

5.3 Comparação das metodologias utilizadas para inclusão de variáveis ambientais em modelos de crescimento e produção.

Os dois métodos aqui apresentados para inclusão de variáveis ambientais em modelos de crescimento e produção se mostraram eficientes. No método 1: inclusão de variáveis ambientais no modelo de índice de sítio e posterior utilização desta classificação no modelo de Clutter (1963), a variável temperatura mensal média foi a que melhor representou as variações climáticas. A incorporação desta variável reduziu o erro padrão da estimativa para índice de sítio em 6,9% e em 5,3% a estimativa volumétrica.

No método 2: inclusão da variável ambiental no modelo de projeção de área basal e posterior inclusão desta em um modelo de projeção volumétrica, as variáveis DPV e precipitação mensal média foram as selecionadas para representar as variações ambientais. O ganho em precisão para explicar a variação em área basal foi 17% e de 9,3% para o volume.

Embora no método 2 haja uma melhora percentual da precisão superior à apresentada no método 1, este apresentou tendência de superestimar os maiores volumes. Este fato está refletido nos valores de S_{yx} , que foram de 15,08 m^3/ha no método 1 e de 30,70 m^3/ha método 2.

6 CONCLUSÕES

A temperatura média mensal foi a única variável ambiental que apresentou significância estatística quando incluída em um modelo de classificação de sítio.

A utilização do índice de sítio, estimado pelo modelo com variáveis ambientais, no modelo de crescimento e produção, melhorou a dispersão dos resíduos e a precisão do modelo. O erro padrão da estimativa foi de 15,08m³/ha.

Na inclusão de variáveis ambientais em um modelo de projeção de área basal, as variáveis selecionadas foram a precipitação média mensal e o déficit de pressão de vapor.

A utilização da área basal projetada por meio do modelo com variáveis ambientais em um modelo volumétrico melhorou em 9,3% a precisão do modelo, contudo, a tendência de superestimar os maiores volumes se manteve. O erro padrão da estimativa foi de 30,70m³/ha.

Os dois métodos de inclusão de variáveis ambientais em modelos de crescimento e produção foram eficientes. Todavia, as melhores estatísticas e comportamento dos resíduos foram observados quando se utilizou as variáveis ambientais no modelo de classificação de sítio.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPOS, J.C.C.; RIBEIRO, J.O.; PAULA NETO, F. **Inventário florestal nacional, reflorestamento**: Minas Gerais. Brasília: IBDF, 1984. 126p.

CAVEDON, A.D.; SHINZATO, E. **Levantamento de reconhecimento de solos**: projeto Porto Seguro/Santa Cruz Cabralia. Salvador: CPRM-SUREG/SA, 2000. 112p.

CLUTTER, J.L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, New Brunswick, v.9, p.354-371, 1963.

CLUTTER, J.L.; FORTSON, J.C.; PIENAAR, L.V.; BRISTER, G.H.; BAILEY, R.L. **Timber management**: a quantitative approach. New York: John Wiley, 1983. 333p.

DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 2.ed. New York: J. Wiley, 1980. 709p.

FERRAZ-FILHO, A.C. **Modelo de projeção em altura dominante com adição de variáveis ambientais**. 2006. 40p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

JOHNSON, R.; WICHERN, D. **Applied multivariate statistical analysis**. 4.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 767p.

LANDSBERG, J.J.; GOWER, S.T. **Applications of physiological ecology to forest management**. San Diego: Academic, 1997. 354p.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam. v. 95, p.209-228, Aug. 1997

LEITE, H.G.; GUIMARÃES, D.P.; CAMPOS, J.C.C. Descrição e emprego de um modelo para estimar múltiplos volumes de árvores. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.19, p.1-21, nov./dez. 1995.

MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais**. 2003. 143p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

- 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. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro.
- PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- SEILER, M.J. **Performing financial studies: a methodological cookbook**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004. 448p.
- SNOWDON, P.; JOVANOVIC, T.; BOOTH, T.H. Incorporation of indices of annual climatic variation into growth models for *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.117, p.187-197, 1999.
- SNOWDON, P.; WOOLLONS, R.C.; BENSON, M.L. Incorporation of climatic indices into models of growth of *Pinus radiata* in a spacing experiment. **New Forests**, Dordrecht, v.16, p.101-123, 1998.
- SOARES, C.P.B. **Um modelo para o gerenciamento da produção de madeira em plantios comerciais de eucalipto**. 1999. 71p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SOUZA, M.J.H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H.G.; LEITE, F.P.; MINUZZI, R.B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da bacia do Rio Doce. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.30, p.399-410, maio/jun. 2006.
- STAPE, J.L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil**. 2002. 225p. Ph.D. Thesis (Doctor of Philosophy)-Colorado State University, Colorado.
- STAPE, J.L.; GOMES, A.N. Influência dos estresses hídricos e nutricionais no crescimento de plantios de eucaliptos no nordeste do Brasil. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 10., 1996, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: UFSM-Centro de Ciências Rurais, 1996.

TEMPS, M. **Adição da precipitação pluviométrica na modelagem do crescimento e da produção e da produção florestal em povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** 2005. 116p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

THROWER, J.S.; GOUDIE, J.W. Estimating dominant height and site index of even-aged interior douglas-fir in british Columbia. **Western Journal Applied Forestry**, New York, v.7, p.20-25, 1992.

WADA, Y.; KASHIWAGI, N. Selecting statistical models with information statistics. **Journal of Dairy Science**, Palo Alto, v.73, n.2, p.3575-3582, 1990.