Aplicação da lógica *fuzzy* e análise multicritério para o zoneamento de *Pinus* no estado do Espírito Santo

Igor Oliveira Ribeiro 1,2
Fabricia Benda de Oliveira 3
Carlos Henrique Rodrigues de Oliveira 4
Thaiane Rodrigues de Sousa 1

1 Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA
Caixa Postal 2223 – 69080-971 - Manaus - AM, Brasil
2 Universidade do Estado do Amazonas - UEA
69050-010 - Manaus - AM, Brasil
igorgeoinformacao@gmail.com, thaianesousar@gmail.com

3 Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Centro de Ciências Agrárias - CCA
Departamento de Engenharia Rural
Caixa Postal 16 – Guararema - 29500-000 - Alegre - ES, Brasil
fabriciabenda@cca.ufes.br

4 Instituto Federal do Espírito Santo - IFES
Campus Ibatiba/ES
Avenida 7 de Novembro, 40 – Centro, Ibatiba - ES - Brasil
carlos.oliveira@ifes.edu.br

Abstract. This study aimed to evaluate and select areas in the state of Espírito Santo with climate and soil aptitude for species *Pinus elliottii var. elliottii* using *fuzzy* logic, multicriteria analysis and geographic information systems (GIS). To elaborate the zoning species used the multicriteria analysis through the intercession of the criteria, with average climatic factors as elements of air temperature, precipitation, evapotranspiration and water deficit whose data were from 110 meteorological stations and restrictions as major watercourses, the road system and areas with greater than 45, where 0 was applied weight to the restrictive criteria and the weights determined by the analytic hierarchy process for the slope factors. Observed areas with good climate and soil aptitude in the south in places with altitudes above 500 meters where temperatures and water deficiency are minor and include the main producing municipalities of this species (Venda Nova do Imigrante, Afonso Cláudio, Domingos Martins and Conceição do Castelo). However, other regions of the state had low aptitude due to high temperatures and especially water deficits. Through the use of geographic information that assists decision making in the survey areas for the deployment of culture pine by analyzing spatial information system tool, the results show that the state has a restricted region with the potential to increase the crop production to meet market needs.

Palavras-chave: aptidão, pinucultura, balanço hídrico, agroclimático, aptitude, culture of pines, water balanced.

1. Introdução

As espécies do gênero *Pinus* são cultivadas desde a década de 40 no Brasil, com destaque para as regiões sul e sudeste. A implantação destas espécies exóticas é considerada uma alternativa econômica sustentável e de alto potencial no cenário nacional e mundial, uma vez que se desenvolvem em diversos tipos de ambiente, produzindo madeira para os mais diversos fins, sendo amplamente utilizada em setores que estão em expansão e desenvolvimento no país, como os de papel e celulose, painéis e serraria. Atualmente, o *Pinus elliottii* var. *elliottii* e o *Pinus taeda* são as espécies mais plantadas no país, desempenhando um importante papel

na redução da pressão sobre os ecossistemas naturais (OLIVEIRA et al., 2011; CASTRO et al., 2010; GRODZKI et al., 2009). Dentre as espécies do gênero pinus que se adaptaram as condições climáticas do estado do Espírito Santo, temos o *Pinus elliottii* var. *elliottii* cuja madeira é muito utilizada para a obtenção de resina nas indústrias de móveis e naval. Porém, a falta de informações sobre as áreas com os fatores edafoclimáticos mais adequados para o cultivo desta espécie não permite, muitas vezes, o alcance de alta produtividade (OLIVEIRA et al., 2011; CASTRO et al., 2010).

Segundo ABRAF (2013), no ano de 2012 o Brasil possuía uma área plantada com eucalipto e pinus de 6,66 milhões de hectares, dos quais 23,4% são de plantios de pinus. Deste percentual, o estado do Espírito Santo, que está entre os 10 maiores do país em plantio de pinus, participa com cerca de 0,16%, correspondendo a uma área plantada de 2.546 ha (ABRAF, 2013). A maior parte dessa produção se concentra na região serrana, com destaque para os municípios de Venda Nova do Imigrante, Afonso Cláudio, Domingos Martins e Conceição do Castelo. Mesmo apresentando grande potencial econômico no mercado interno e externo houve um decréscimo de 3,1% na área plantada de pinus e eucalipto no país, no período de 2006 a 2012. Diante deste cenário observa-se a necessidade de estimular e aumentar o cultivo do pinus, já que este se manteve praticamente estagnado nos últimos 3 anos (ABRAF, 2013).

Para alcançar tal resultado, o planejamento e a organização de projetos florestais são de fundamental importância, uma vez que permitem saber quais as áreas adequadas ao plantio, diminuindo os riscos de implantação da cultura em locais que podem ocasionar diversos problemas ao produtor, como a baixa produtividade da cultura, impactos ambientais, dificuldade em conseguir financiamentos, morte por déficit hídrico, incidência de pragas e doenças, entre outros. Com isso, para auxiliar a expansão da pinucultura no Estado do Espírito Santo, a definição das áreas com aptidão climática para este cultivo constitui uma análise importante (CASTRO et al., 2010). Assim, o presente trabalho teve como objetivo delimitar áreas potenciais para a implantação desta cultura no estado do Espírito Santo, através da delimitação da aptidão climática utilizando análise multicritério e lógica *fuzzy*.

2. Metodologia

2.1 Dados meteorológicos

Para a realização deste trabalho foram utilizados os dados de precipitação média de 110 estações pluviométricas e/ou meteorológicas, com uma série histórica mínima de 20 anos, pertencentes ao Instituto Capixaba de Pesquisas e Extensão Rural (INCAPER), ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e a Agência Nacional das Águas (ANA), localizadas em municípios do estado do Espírito Santo e fora do estado, oriundos do banco de dados da pesquisa de Castro (2008) sobre diferentes espécies de pinus no estado.

2.2 Fatores

2.2.1 Cálculo das estimativas de temperatura média do ar (T_{ar})

A partir de um levantamento realizado, observou-se um reduzido número de estações meteorológicas que possuem uma série histórica de medidas contínuas e sem falhas no estado do Espírito Santo, o que proporciona poucas informações sobre esta variável climática. Por este motivo, optou-se por utilizar a metodologia do estudo de Castro et al. (2010) onde determinou-se os coeficientes de um modelo linear para cada mês do ano, através de regressão linear, que teve como variáveis independentes a altitude, a latitude e a longitude das estações para estimar os valores médios mensais de temperatura do ar através da equação 1.

$$\gamma_i = \beta_0 + \beta_1 \text{Alt} + \beta_2 \text{Lat} + \beta_3 \text{Long} + \varepsilon_i \quad \text{(Eq. 1)}$$

Em que: γ_i = temperaturas normais (médias, máximas e mínimas) mensais (i=1, 2, ..., 12) e anual (i=13) estimadas em °C;

Alt = altitude (m);

Lat = latitude, em graus decimais (entrada com valores negativos);

Long = longitude em graus decimais (entrada com valores negativos);

β0, β1, β2 e β3 = parâmetros de regressão; e

ε_i= erro aleatório.

2.2.2 Balanço Hídrico Climatológico

No presente estudo foram realizados os cálculos dos balanços hídricos climatológicos, para a capacidade de armazenamento de água (CAD) igual a 300 milímetros (mm), CAD máximo dos tipos de solos presente no estado de acordo com estudos de Silva et al. (2013), utilizando os dados mensais de precipitação média (P) e de estimativas de temperatura média do ar obtidos para as estações em estudo e aplicando o método proposto por Thornthwaite e Mather (1955), através do programa "BHnormal", elaborado em planilha eletrônica do Excel por Rolim et al. (1998), que permite as estimativas dos parâmetros climáticos de evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), armazenamento de água no solo (CAD), negativa acumulada (NEG ACUM), alteração de água no solo (ALT), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC).

2.2.3 Espacialização das variáveis climáticas

De posse dos resultados do balanço hídrico climatológico para cada estação meteorológica, as variáveis de precipitação, temperatura média do ar, evapotranspiração e deficiência hídrica foram espacializadas através dos métodos de interpolação propostos para cada variável por Castro et al. (2010), em que para a precipitação e evapotranspiração utilizou-se o método da krigagem linear e para a deficiência hídrica utilizou-se o método da krigagem esférica. Além das varáveis climáticas, inseriu-se no estudo o levantamento do IBGE (2005) das classes pedológicas presentes no estado do Espírito Santo, a fim de obter melhores resultados quanto à aptidão da cultura. A partir disso, originaram-se os mapas temáticos de cada variável climática e pedológica, sendo estes utilizados para a execução da análise multicritério e, por fim, na determinação das áreas aptas à pinucultura de acordo com as exigências da espécie.

2.3 Restrições

2.3.1 Levantamento das variáveis restritivas

Em consonância com a legislação ambiental brasileira, em que a Lei 12.651/12 considera as faixas marginais de alguns cursos d'água, as encostas com mais de 45º de declividade, como áreas de preservação permanente (APP) e a Lei 10.932/04 que diz que ao longo das faixas de domínio público das rodovias é obrigatória a reserva de uma faixa não-edificável, buscou-se utilizar essas áreas ou locais em que não é possível ocorrer à implantação de monoculturas devido às condições citadas como critérios restritivos (BRASIL, 2004; BRASIL, 2012). Além disso, é importante observar as peculiaridades da Lei 12.651/12, popularmente conhecida como o novo Código Florestal Brasileiro, onde as delimitações das faixas de APP variam de acordo com a largura dos cursos d'água. No entanto, no contexto do

geoprocessamento, ainda não há uma base vetorial que considere essas variações da hidrografia do estado. Com isso, para este estudo optou-se por generalizar e considerar que os cursos d'água possuem largura máxima de 10 metros, utilizando APPs com larguras de 30 metros conforme determinado por lei. As restrições adotadas neste estudo consistiram em: 1 - Distância mínima de 30m ("buffer") de qualquer coleção hídrica ou curso d'água; 2 - Áreas com declividade ≥ 45º e; 3 - Distância mínima de 15m ("buffer") do sistema viário (BRASIL, 2004; BRASIL, 2012).

2.4 Exigências edafoclimáticas da espécie pinus

O pinus, de ocorrência natural no sudoeste dos Estados Unidos, requer clima fresco com inverno frio, chuvas uniformemente distribuídas, disponibilidade de umidade constante durante o ano e baixa deficiência hídrica, sendo resistente a geadas e tolerante a ventos. Na região de ocorrência natural da espécie, a precipitação está entre 650 e 2500 mm, com período de seca de 2 a 4 meses, ou seja, com precipitação <40 mm. No Brasil, a fim de se ter um melhor rendimento da extração de resina recomenda-se plantar em regiões com temperaturas mais elevadas, mas de forma geral, é indicado para plantio em toda região sul e parte do sudeste, além de poder ser cultivado em áreas de altitude elevada (KRONKA et al., 2005). De acordo com Van Goor (1967), no Brasil, os solos mais recomendáveis para o bom desenvolvimento desta espécie de pinus são os latossolos mais argilosos e os argissolos (podzólicos). As exigências edafoclimáticas do pinus para o seu desenvolvimento foram determinadas com base nas referências da literatura, como mostra a tabela 1.

Tabela 1. Exigências climáticas e edáficas do *Pinus elliottii* var. *elliottii*.

Exigências climáticas		
P (mm)	**T_{ar}(ºC)**	**DEF (mm)**
>900	$15 \geq T_{ar} \leq 24$ (a)	≤50(b)
	Exigências edáficas	
Alta	Solos de textura arenosa, média e argilosa.	
Baixa	Neossolo quartzarênico e solos arenosos; áreas com solos que apresentam profundidade inferior a 50 cm ou com solos muito pedregosos.	

P= precipitação, T_{ar}= temperatura média do ar, DEF= deficiência hídrica. Fonte: (a) CARPANEZZI et al. (1986); (b)GOLFARI et al. (1978).

2.5 Lógica *Fuzzy* e Análise Multicritério

2.5.1 Funções *fuzzy* e valores de importância aplicados as variáveis climáticas

A partir dos mapas temáticos de cada variável, aplicou-se uma reclassificação utilizando determinadas funções de pertinência *fuzzy* em uma escala contínua variando de adequabilidade 0 (menos adequada) a 255 (mais adequada) e os critérios restritivos foram mantidos no seu caráter booleano rígido [0 – 1]. Com isso, a partir dos parâmetros das exigências climáticas estabelecidos para a espécie levantados na literatura, foram

determinados os pontos de controle das funções de pertinência *fuzzy* de cada fator, como mostra a tabela 2. Através da matriz de comparação par-a-par do método AHP (Processo de Hierarquização Analítica), que utiliza a escala de SAATY (1977), estimou-se o peso de cada variável.

Tabela 2. Funções *fuzzy*, pontos de controle e a ponderação (peso) aplicadas as variáveis climáticas.

Variável	**Função *fuzzy***	**Pontos de controle**				**Peso***
		A	B	C	D	
T_{ar}	Sigmoidal simétrica	0	900	1600	1600	0,3621
DEF	Sigmoidal monotônica decrescente	0	15	24	26	0,3621
P	Sigmoidal monotônica crescente	50	50	50	360	0,1607
Solos	Escala [0 – 255]	-	-	-	-	0,0389

P= precipitação, T_{ar}= temperatura média do ar, DEF= deficiência hídrica.

2.6 Zoneamento de aptidão edafoclimática para o pinus

Por fim, para encontrar as áreas mais adequadas à implantação do cultivo da espécie no estado, considerando os diversos critérios adotados neste estudo, simultaneamente, aplicou-se a técnica da análise multicritério utilizando os mapas com padronização *fuzzy* de cada variável com seus respectivos pesos e os mapas dos critérios restritivos, gerando o mapa de zoneamento de aptidão edafoclimática para a cultura.

3. Resultados e Discussão

A partir da análise multicritério e de acordo com as exigências edafoclimáticas da espécie em relação às variáveis de precipitação pluviométrica, deficiência hídrica, temperatura média do ar e tipos de solo, obteve-se o mapa de aptidão climática para o pinus no Estado do Espírito Santo, considerando uma capacidade de armazenamento de água no solo de 100 mm, como mostra a figura 1. Observa-se que o estado possui uma área com aptidão para a cultura concentrada na região sul e serrana (valores de adequabilidade próximos a 255 – 19,4% da área) e, nas demais regiões, possui baixa aptidão (valores de aptidão menores que 127 – 80,6% da área).

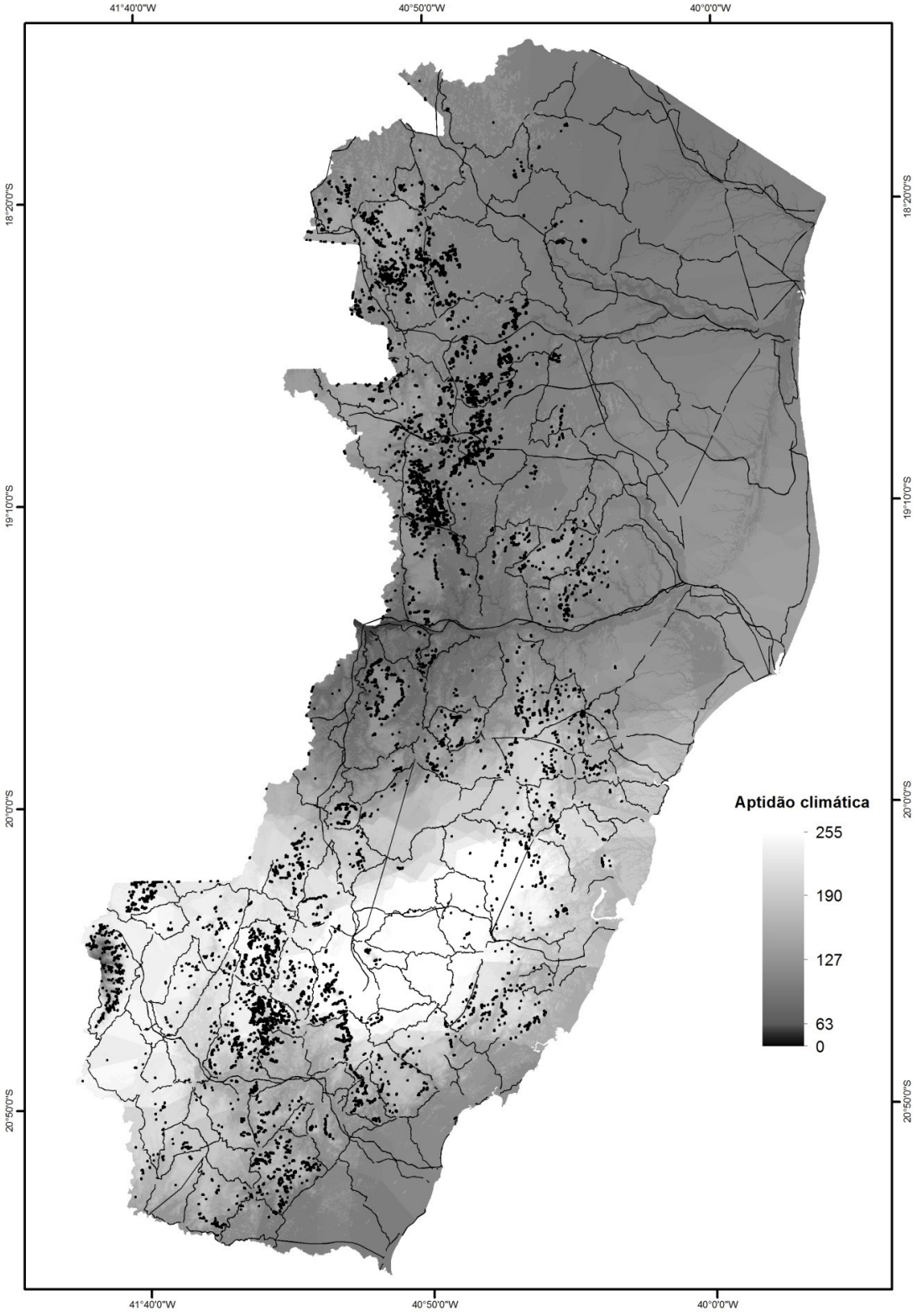


Figura 1. Mapa de aptidão climática para o pinus no Estado do Espírito Santo.

O zoneamento gerado através da lógica *fuzzy* e análise multicritério apresentou melhores resultados quando comparado com os mapas gerados pela lógica booleana nos trabalhos de

Castro et al. (2010) e Oliveira et al. (2011) que encontraram somente áreas aptas e inaptas. Ao comparar os resultados com os dos trabalhos citados acima, observa-se algumas diferenças marcantes, como a mudança abrupta entre regiões aptas e inaptas na região serrana do estado, devido a aplicação da lógica booleana pelos autores (mais restritivo), o que não ocorre nos resultados apresentados no presente estudo, onde para a mesma região, há uma faixa de transição entre as áreas menos adequadas e mais adequadas (gradiente de adequabilidade). Observa-se que o presente estudo apresenta uma maior quantidade de áreas adequadas quando comparado com as áreas aptas dos estudos dos autores citados anteriormente, tal diferença está relacionada ao tipo de lógica.

Depois de realizada a análise espacial, observa-se que o estado possui uma área restrita com aptidão para a cultura, concentrando-se na região sul e serrana, com altitudes acima de 500 metros, onde as temperaturas são amenas, há risco de geadas e a deficiência hídrica é menor, confirmando o que Castro (2010) recomendou para o estado, com destaque para os municípios de Venda Nova do Imigrante, Afonso Cláudio, Domingos Martins e Conceição de Castelo, que são os locais onde se tem a maior parte desta cultura. Por ser uma espécie com pouca tolerância à deficiência hídrica (até 50 mm), observa-se áreas com menor adequabilidade na maior parte do estado, sendo em sua maioria consideradas marginais a pinucultura, pois temos deficiências hídricas elevadas em grande parte do território com destaque para a região norte, como por exemplo, as áreas dos municípios de Itaguaçu, Baixo Guandu e região oeste de Colatina (CASTRO, 2008).

Com relação aos critérios restritivos em estudo, baseados na legislação brasileira, levando em consideração as áreas com declividade maior ou igual a 45º, as margens dos principais rios do estado, como Rio Itapemirim e Rio Doce, bem como as principais rodovias estaduais observa-se que estes critérios restringem áreas relativamente significantes, diminuindo a quantidade de áreas aptas a pinucultura. O estado do Espírito Santo possui uma pequena quantidade de áreas aptas ao cultivo do pinus, sendo que a maioria das áreas inaptas se deve à deficiência hídrica e temperaturas elevadas. No entanto, estas áreas podem ter uma melhora no desenvolvimento e na produtividade do cultivo quando manejadas e irrigadas de forma correta e planejada.

4. Conclusão

A aplicação da análise multicritério e da lógica *fuzzy* permitiram a avaliação da adequabilidade das áreas para o cultivo de pinus de forma adequada, encontrando valores de adequabilidade próximos a 255 em 19,4% da área. No entanto, esta necessita de uma análise aprofundada com relação à atribuição de funções pertinência *fuzzy* e pesos atribuídos na análise multicritério, bem como dos critérios a serem utilizados.

Agradecimentos

Pelo presente trabalho, agradecemos ao apoio da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) e a Universidade do Estado do Amazonas (UEA), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo (GEOBASES), do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a Agência Nacional das Águas (ANA) e ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. Anuário estatístico ABRAF 2013: ano base 2012. 2013. Disponível em: < http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13_BR.pdf>. Acesso em 19 out. 2016.

BRASIL. Lei nº 10.932, de 03 de agosto de 2004. Altera o art. 4º da Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, que "Dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências". Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 04 ago. 2004, p. 1. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/>. Acesso em: 04 abr. 2016.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Institui o novo Código Florestal. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 28 maio 2012, p. 1. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/>. Acesso em: 04 abr. 2016.

Carpanezzi, A. A.; Ferreira, C. A.; Rotta, E.; Nami KAWA, I. S.; Sturion, J.A.; Pereira, J. C. D.; Montagner, L. H.; Rauen, M. de J.; Carvalho, P. E. R.; Silveira, R. A.; Alves, S. T. **Zoneamento ecológico para plantios florestais no estado do Paraná**. Brasília: EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Florestas, 89 p. 1986.

Castro, F. S. **Zoneamento agroclimático para a cultura do Pinus no Estado do Espírito Santo.** Alegre, 2008. 101f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.

Castro, F. S; Pezzopane, J.E.M; Pezzopane, J. R. M; Cecílio, R. A.; Xavier, A. C. Zoneamento agroclimático para espécies do gênero Pinus no estado do Espírito Santo. **Floresta**, v. 40, n. 1, p. 235-250, 2010.

Golfari, L.; Caser, R. L.; Moura, V. P. G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil** (2a. aproximação). Brasília: PRODEPEF, PNUD/FAO/IBDF/BRA-45, 1978. 66 p. (Série Técnica, 11).

Grodzki, L.; Durigan, M.E.; Caramori, P.H.; Oliveira, D.; Morais, H. Pinus. In: Monteiro, J.E.B.A. (Org.) **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola.** Brasília-DF: INMET, 2009. cap. 28, p.477-488.

IBGE. Mapa interativo de solos do Brasil. 2005. Disponível em: < http://mapas.ibge.gov.br/>. Acesso em: 2 fev. 2016.

Kronka, F. J. N.; Bertolani, F.; Ponce, R. H. **A cultura do pinus no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 156 p. 2005.

Oliveira, L.T.; Pezzopane, J. E. M.; Cecílio, R. A. Potencial impacto das mudanças climáticas no zoneamento do Pinus no Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 1, p. 37-49, 2011.

Rolim, G.S.; Sentelhas, P.C.; Barbieri, V. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial**. Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, p.133-137, 1998.

Saaty, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, n.15, p.234-281, 1977.

Silva, K. R. da.; Cecílio, R.A; Xavier, A. C; Pezzopane, J.R.M.; Garcia, G. O. Zoneamento edafoclimático para a cultura da seringueira no Espírito Santo. **Irriga Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, Botucatu, v. 18, n. 1, p. 1-12, 2013.

Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R. **The water balance. Publications in Climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p., 1955

van Goor, C. P. **Reflorestamento com coníferas no Brasil, aspectos ecológicos dos plantios na Região Sul, particularmente com *Pinus elliottii* e *Araucaria angustifolia* no Estado de São Paulo.** Silvicultura em São Paulo, v. 4, n. 4/5, p.349-366, 1967.