

Favorabilidade climática para calibração de modelo LUCC de florestas plantadas para o Brasil

Alessandro Ribeiro Campos¹

¹ Fundação Estadual de Meio Ambiente - FEAM
CEP 31630-900 – Belo Horizonte - MG, Brasil
alessandro.campos@meioambiente.mg.gov.br

Abstract. To the extent that LUCC models become more complex, involving certain spatio-temporally variable factors and a set of data growing, the need to improve techniques for calibration also increases. In spatially explicit models of land use change and land cover comprising planted forests is such a feature, especially in the calibration process for the modeling of local features associated with the current level of income of the Brazilian forestry without the use of complex physiological models. Thus, the aim of this study was to present the results of modeling of climate favorable to the occurrence of planted forests in Brazil and its use for calibration of LUCC models. The methodology used is the average weather for Brazil in terms of annual rainfall, mean annual temperature and calculating the annual water deficit, and the Weights of Evidence applied as an empirical method to verify the relationship between the actual occurrence of the formations and the variables selected. As a result, it was observed that the characteristics shown by the calibrated coefficients were consistent with the currently expected level of easing climatic requirements. The use of favorability showed gains in terms of correct allocation of plantations by LUCC model, considering the spatial correlation in the context of proximity between the simulated and observed landscape the final reference. Finally, we hope to contribute to the continued improvement of environmental modeling and sustainability assessment of future forest activity under the aspect of change of land use.

Palavras-chave: spatial modelling, land use and cover change, planted forest, modelagem espacial, mudança de uso e cobertura da Terra, florestas plantadas.

1. Introdução

A necessidade de preenchimento das lacunas de conhecimento da interação entre homens e o sistema terrestre têm levado ao desenvolvimento de uma ampla variedade de abordagens e plataformas de modelagem, principalmente de modelos espacialmente explícitos e dinâmicos que permitem a simulação do uso da terra (Soares-Filho et al, 2009; NAS, 2013), denominados *Land Use and Cover Change* – LUCC. Embora, por definição, qualquer modelo fique aquém de incorporar todos os aspectos da realidade, ele fornece informações valiosas sobre o comportamento do sistema sob uma série de condições (Velkamp e Lambin, 2001).

De modo geral, tais modelos são normalmente desenvolvidos baseados no conjunto de três grandes componentes (Schneider e Pontius Jr, 2001): mapas de uso e cobertura da terra de mais de um ponto no tempo; uma função de mudança que opera as transições entre os tipos de cobertura da terra, resultando na modificação dos valores e do arranjo espacial de um mapa inicial; e o mapa de saída simulado.

Sendo uma simplificação de um sistema complexo e a representação de uma realidade específica, diferentes abordagens empíricas têm sido utilizadas para explicar os padrões espaciais da mudança através da estrutura correlativa entre os padrões de uso da terra e os padrões espaciais. Tal processo delimita a etapa de calibração do modelo, a partir da qual resulta a função de transição.

Nesse processo de calibração do modelo LUCC são estimados e ajustados os parâmetros e as restrições para melhorar a concordância entre os resultados do modelo e um conjunto de dados (Pontius Jr e Denman, 2004). O objetivo da calibração é, portanto, extrair os coeficientes ou valores dos parâmetros das regras da observação do padrão de uso do solo no tempo t e $t + 1$. Matematicamente, isso é generalizado como a estimativa da probabilidade da transição de estado em particular y ocorrendo a uma localização particular (i, j) , por meio de uma função de fatores de desenvolvimento (x_1, x_2, \dots, x_n) .

A função de mudança obtida nesse processo é expressa como um mapa de aptidão, ou de favorabilidade, para a transição. O valor da favorabilidade determina a sequência em que as células são selecionadas para a mudança, de modo que os maiores valores são selecionados primeiro.

Porém, na medida em que os modelos LUCC se tornam mais complexos, envolvendo determinados fatores variáveis espaço-temporalmente e um conjunto de dados cada vez maior, a necessidade de melhorar as técnicas de calibração também aumenta (Schneider e Pontius Jr, 2001). Isso ocorre, por exemplo, em modelos LUCC focados em uma visão geográfica das mudanças em curso e no futuro padrão de uso da terra associado à atividade de florestas plantadas.

Um grande desafio relacionado a esses modelos envolve, diante da amplitude das exigências climáticas para implantação de povoamentos de produção, obter no processo de calibração um mapa de favorabilidade à mudança (para floresta plantada) que represente as características climáticas locais associadas ao atual nível de rendimento (Campos, 2013). Isso poderia ser resolvido por modelos de base fisiológica, porém tais modelos requerem um grande número de parâmetros iniciais difíceis de obter, o que torna a sua aplicação pouco prática.

Nas últimas décadas a produtividade das formações comerciais no país se elevou significativamente, alcançando em 2012 o patamar de aproximadamente 40,7 m³/ha/ano, o maior incremento médio anual dentre os países produtores segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF. Esse nível foi possibilitado pelas atividades de pesquisa e desenvolvimento em prol do melhoramento genético para adaptação das principais espécies de interesse comercial às novas fronteiras do setor. Os atuais plantios estão em locais com condições edafoclimáticas anteriormente limitantes ao nível requerido para viabilizar as formações e tendem a continuar sendo em locais com características similares.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é apresentar os resultados da modelagem da favorabilidade climática à ocorrência de florestas plantadas no Brasil como método para representar indiretamente o nível tecnológico da silvicultura brasileira, e de sua utilização para calibração de modelos LUCC.

2. Metodologia de Trabalho

A modelagem da favorabilidade climática para calibração de modelos LUCC, que apórtam transições para florestas plantadas no Brasil, proposta nesse estudo foi desenvolvida a partir do método *Weights of Evidence* (Bonham-Carter, 1994; Goodacre et al., 1993) com o objetivo de verificar a relação entre a ocorrência atual das formações florestais e as características climáticas gerais dos locais correspondentes.

Trata-se de um método bayesiano tradicionalmente utilizado no campo da geoestatística que foi adaptado para o estudo das mudanças de cobertura e uso da terra por Soares-Filho et al (2002). O efeito de cada variável espacial em uma ocorrência é computado de forma independente de uma solução combinada (Bonham-Carter, 1994).

Desse modo, a favorabilidade climática foi representada como a probabilidade da ocorrência, célula a célula, de um plantio florestal dado às características normais climatológicas correspondentes, conforme Equação 1:

$$P(\text{PixelFlorestaPlantada} | A \cap B \cap C \cap \dots \cap N)_{(x,y)} = \frac{e^{\sum_{k=1}^n W_k^+(x,y)}}{1 + e^{\sum_{k=1}^n W_k^+(x,y)}} \quad (1)$$

onde

$$W_k^+ = \ln \left(\frac{P(B_k | \text{PixelFlorestaPlantada})}{(B_k | \text{PixelFlorestaPlantada})} \right) \quad (2)$$

$P(\text{FlorestPlantadaPixel} | A \cap B \cap C \cap \dots \cap N)_{(x,y)}$ é a favorabilidade de ocorrência de florestas plantadas dada a ocorrência das variáveis exploratórias climáticas A, B, C ... N na célula (x,y) e W_k^+ é o somatório dos coeficientes de peso de evidência para a categoria k das variáveis. A extração dos coeficientes baseou-se na localização das florestas plantadas do mapa de uso do solo para o Brasil em 2010 elaborado por Gouvello et al (2010).

Considerou-se a climatologia média para o Brasil em termos de precipitação e temperatura média, apresentadas sob a forma de normais climatológicas, e no cálculo do déficit hídrico anual.

As normais climatológicas de temperatura média (Figura 1-A / Tabela 1) e precipitação anual (Figura 1-B / Tabela 1) foram obtidas a partir do banco de dados *WorldClim* (Hijmans et al., 2005). Essas superfícies climáticas foram desenvolvidas com base na interpolação de dados observados para uma resolução espacial de 30 arco-segundos (aproximadamente 1 km).

Tabela 1. Variáveis espaciais com as respectivas fontes

Variável	Fonte	Resolução / Escala
Precipitação anual (mm/ano)	Normais climatológicas do banco de dados WorldClim (Hijmans et al., 2005).	30 arco-segundos
Temperatura média anual (°C)	Normais climatológicas do banco de dados WorldClim (Hijmans et al., 2005).	30 arco-segundos
Déficit hídrico anual (mm/ano)	Calculado a partir do modelo de balanço hídrico espacializado de Lima et al., 2012 com base nas normais climatológicas do banco de dados WorldClim (Hijmans et al., 2005).	30 arco-segundos

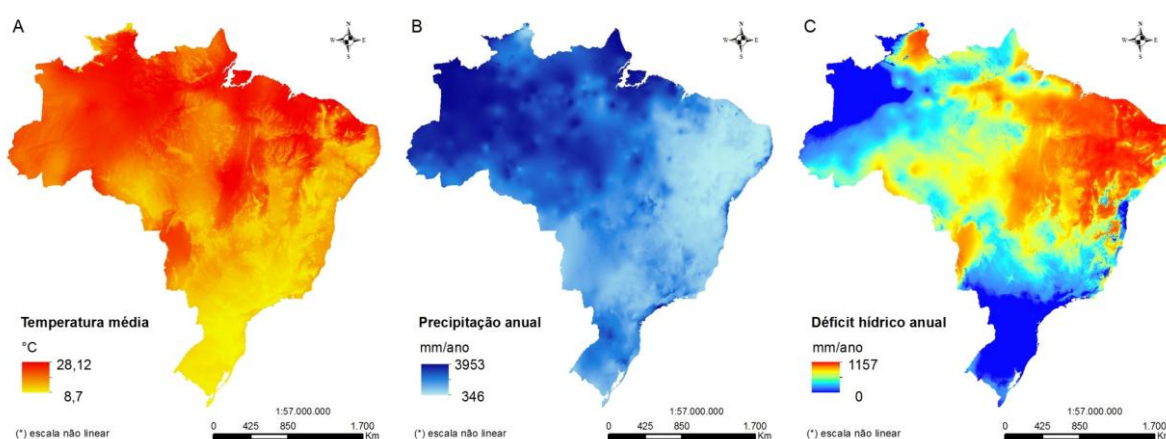


Figura 1. Variáveis climáticas. (A) Temperatura média (B) precipitação total anual (C) déficit hídrico anual

O WorldClim foi criado com base na combinação de diferentes bancos de dados que coletam e organizam informações meteorológicas de estações ao redor do mundo, entre eles, o *Global Historical Climatology Network* (GHCN), *Food and Agriculture Organization* e *World Meteorological Organization* (WMO). Foram considerados para a criação deste banco de dados a precipitação mensal, bem como as temperaturas médias, mínimas e máximas mensais obtidas dos bancos de dados citados. Os dados foram interpolados espacialmente utilizando o software ANUSPLIN, através do *Thin-plate smoothing spline algorithm*. Latitude, longitude e relevo foram as variáveis independentes no processo de interpolação. Os

dados de altimetria foram obtidos do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM, <http://srtm.csi.cgiar.org/>), inicialmente disponíveis em 90 metros de resolução e posteriormente agregados para 30 arco-segundos (aproximadamente 1 km).

O balanço hídrico climatológico - BHC (Thorntwaite e Mather, 1955) foi utilizado neste trabalho para o cálculo do déficit hídrico anual (Figura 1-C / Tabela 1). O BHC foi obtido através do modelo espacializado desenvolvido por Lima et al. (2012) e baseou-se nas normais climatológicas, assumindo uma capacidade máxima de armazenamento de água no solo (CAD) de 300 mm, conforme é indicado para espécies florestais (Pereira et al., 2002).

Uma vez que os pesos de evidência são aplicados somente a dados categóricos, foi necessário categorizar as variáveis contínuas (precipitação anual, temperatura média e déficit hídrico anual) preservando a estrutura dos dados, baseando-se no cálculo de faixas conforme Soares-Filho et al (2009). Essas faixas foram analisadas sob o aspecto de significância estatística, sendo excluídas aquelas que não apresentaram significância, e seu efeito de associação/repulsão, de modo que aquelas que não exerceram nenhum efeito para a ocorrência dos plantios foram desconsideradas.

Além disso, como requisito para aplicação deste método, a independência entre as variáveis foi testada a partir da análise de correlação entre pares aplicando os testes: X^2 , Crammer e *Joint Information Uncertainty*. Na aplicação de métodos de inferência espacial, como pesos de evidência, eliminar alta correlação entre mapas é imprescindível para obtenção de bons resultados (Bonhan-Carter 1994).

A significância de cada variável exploratória (poder de explicação) foi avaliada comparando o contraste dos pesos de evidencia (W_k^+ - W_k^-) para cada uma das variáveis categóricas, de modo que as variáveis mais importantes apresentaram os maiores contrastes e, portanto, a relação mais forte com a localização da célula de floresta plantada.

Por fim, a modelagem da favorabilidade climática foi avaliada através da utilização do mapa de aptidão, resultante desse processo, na calibração e validação do modelo LUCC espacialmente explícito para florestas plantadas no Brasil desenvolvido por Campos (2013). No processo de validação, a favorabilidade foi utilizada para simular a alocação espacial dos plantios florestais tendo como paisagem inicial e final observada os mapas do Inventário Florestal de Minas Gerais de 2005 e 2009 (Scolforo et al., 2008), visto sua disponibilidade e significativa representatividade no contexto nacional. A área a ser alocada pelo modelo foi obtida pela diferença entre esses mapas, que representa a expansão de área ocorrida no período.

A validação foi feita através do algoritmo *Calculate Reciprocal Similarity Map* (Soares-Filho et al, 2009), considerando o contexto de vizinhança para indicação da concordância espacial. Foi calculada a mínima similaridade *fuzzy* entre mapas da paisagem simulada e a paisagem observada correspondente, para cada tamanho de janela usando uma função de decaimento constante para ponderar a distribuição do estado da célula ao redor de uma célula central de forma recíproca. Foram utilizadas janelas de análise de 1 a 201 células, visto a escala e a extensão tratada pelo modelo.

Toda a metodologia descrita foi desenvolvida na plataforma de modelagem ambiental DINAMICA-EGO (Soares-Filho et al., 2002).

3. Resultados e Discussão

Embora não haja concordância a respeito de qual limiar deve ser usado para uma variável nos testes de correlação, todos os testes aplicados indicaram baixa correlação entre os pares de variáveis. A métrica *Joint Information Uncertainty* obtida para os pares foi de 0,19701 (déficit hídrico / precipitação anual), 0,16795 (déficit hídrico / temperatura média) e 0,14884 (precipitação anual / temperatura média). Complementarmente, o índice de Crammer,

inferior à 0,5 para todos os pares, sugere a procedência da utilização das variáveis climatológicas selecionadas sob o aspecto da correlação.

Os coeficientes estatisticamente significantes de peso de evidência das variáveis climatológicas obtidos na modelagem da favorabilidade climática são apresentados na Figura 2. Os valores positivos elevados indicam um favorecimento à ocorrência de florestas plantadas, de modo que quanto maior for o valor, mais forte foi a associação evidenciada. Por outro lado, valores negativos de W_k^+ indicam um efeito inibitório, enquanto que valores próximos de zero sugerem um insignificante efeito (Bonhan-Carter 1994).

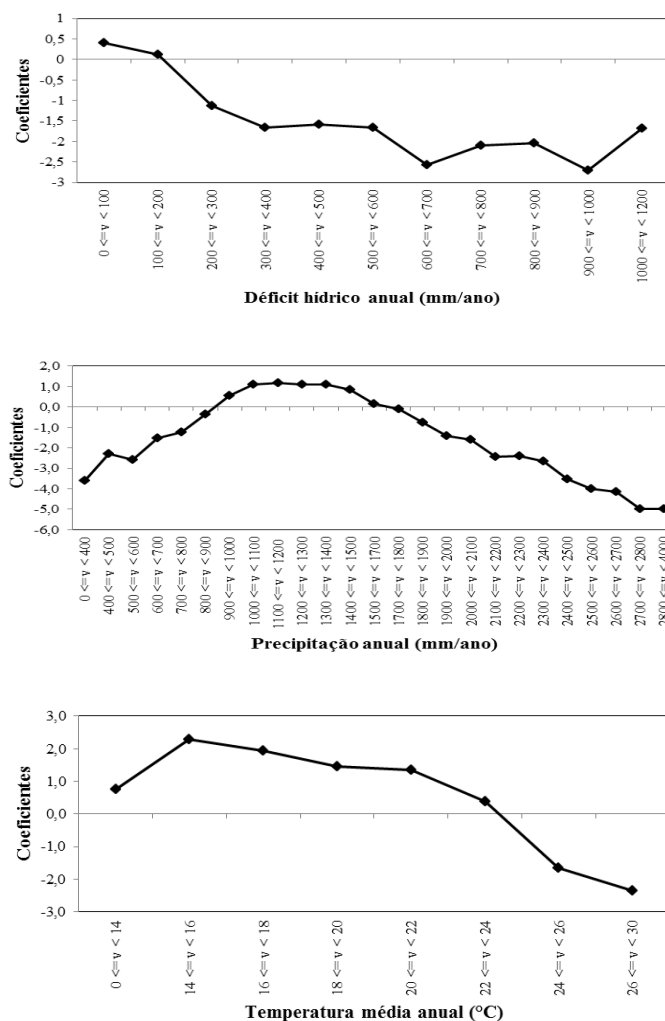


Figura 2. Coeficientes dos pesos de evidência da ocorrência dos plantios em função do déficit hídrico anual (A), da precipitação anual (B) e da temperatura média anual (C)

Nesse sentido, os coeficientes obtidos sugerem haver um crescimento do efeito inibitório do déficit hídrico anual de acordo com seu aumento, sendo a faixa entre 100 e 200 mm/ano limitante à ocorrência de florestas plantadas. De modo geral, a polaridade das faixas de precipitação total anual (inferior a 800 mm/ano e superior a 2.000 mm/ano) se apresentaram como um fator de efeito inibitório, declinando a aptidão à ocorrência dos plantios. Os coeficientes da variável temperatura média anual sugeriram que faixas superiores à 24 °C são restritivas à formação de florestas plantadas no Brasil.

A partir dessas principais características apresentadas pelos coeficientes de peso de evidência foi possível observa um padrão concordante com o esperado atualmente pelo nível de menor restritividade de exigências climáticas para implantação de povoamentos de

boa capacidade do modelo em prever localização das florestas plantadas no Brasil, tendo em vista a escala e a extensão tratada pelo modelo.

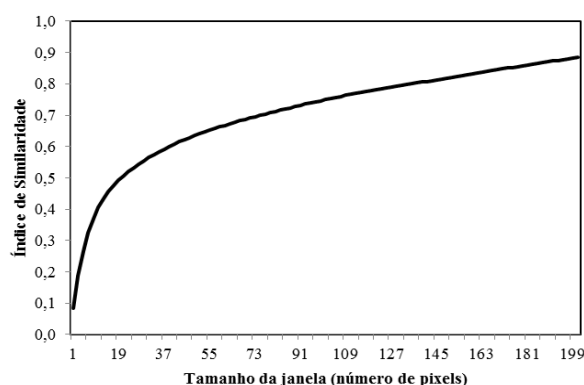


Figura 4. Índices de acerto de alocação espacial do modelo em relação ao tamanho da janela de análise.

4. Conclusões

A propensão à ocorrência de plantios florestais dadas as condições climáticas médias locais em termos de disponibilidade hídrica e média termal representou a favorabilidade climática à florestas plantadas. Esse aspecto foi caracterizado pela relação, verificada empiricamente, das variáveis climáticas e a ocorrência atual das formações florestais

A plataforma e os métodos utilizados mostraram-se capazes de modelar a dinâmica espacial das florestas plantadas no Brasil de forma satisfatória, podendo os resultados da simulação fornecer informações importantes para a avaliação da sustentabilidade da atividade florestal futura sob o aspecto de mudança de uso da terra.

Referências Bibliográficas

- Bonham-Carter, G. F. **Geographic Information Systems for geoscientists: modelling with GIS**. Kidlington, UK: Elsevier Science, 1994. 280 p.
- Campos, A.R. **Modelagem territorial de cenário da expansão das plantações de eucalipto no Brasil**, 2013. 49 p. (043C198m 2013 T). Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências/UFMG, Belo Horizonte. 2013.
- Goodacre, C. M.; Bonham-Carter, G. F.; Agterberg, F. P.; Wright, D. F. A statistical analysis of spatial association of seismicity with drainage patterns and magnetic anomalies in western Quebec. **Tectonophysics**, n. 217, p. 205-305, 1993.
- Gouvello, C.; Soares-Filho, B. S.; Nassar, A. **Estudo de baixo carbono para o Brasil: uso da terra, mudanças do uso da terra e florestas**. Washington, D.C.: The World Bank, 2010. 292 p.
- Hijmans, R.J.; Cameron, S.E.; Parra, J.L.; Jones, P.G.; Jarvis, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, n. 25, p. 1965-1978, 2005.
- Lima, L. S.; Oliveira, L. J. C.; Soares-Filho, B. S.; Rodrigues, H. O. H. Balanço hídrico climatológico espacializado para o Brasil. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 17., 2012, Gramado. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2012. Artigos, p. 1-6. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-62159-00-8. Disponível em: <http://www.sbmec.org.br/cbmet2012/pdfs/646D.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2013.
- NAS. **Advancing land change modeling: opportunities and research requirements**. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 2013. 225 p.

Pereira, A. R.; Angelocci, L. R.; Sentelhas, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

Pontius Jr, R.G.; Deanman, D.H.K. Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. **Ecological Modelling**, n. 179, p. 445-461, 2004.

Ribeiro, A.; Paiva, Y.G.; Baesso, R.C.; Almeida, A.Q.; Oliveira, A.S.; Oliveira, R.A.; Hamakawa, P.J.; Silva, M.P. Eucalipto. In: Monteiro, J.E. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. cap 12, p.289-292.

Schneider, L.C; Pontius Jr, R.G. Modeling land-use change in the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, n. 85, p. 83-94, 2001.

Scolforo, J.R.S.; Carvalho, L.M.T.; Oliveira, A.D. **Inventário florestal de Minas gerais: monitoramento dos reflorestamentos e tendências da produção em volume, peso de matéria seca e carbono, 2005-2007**. Lavras: Editora UFLA, 2008.

Soares-Filho, B. S.; Pennachin, C. L.; Cerqueira, G. DINAMICA: a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, n. 3, p. 217-235, 2002.

Soares-Filho B.S., Rodrigues H.O.; Costa, W.L. Modeling environmental Dynamics with Dinamica EGO. Centro de Sensoriamento Remoto/UFGM, 2009. Disponível em:

http://csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/Dinamica_EGO_guidebook.pdf. Acesso em: 25 jan 2014.

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

Velkamp, A.; Lambin, E.F. Predicting land-use change. **Agriculture, Ecosystems and Environmental**. n. 85, p. 1-6, 2001