

Artigos  
científicos

# Análise espaço-temporal da expansão dos plantios florestais comerciais no Brasil sob a condição de minimização de impactos negativos e potenciais conflitos

Alessandro Ribeiro Campos  
Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais  
Fundação Estadual do Meio Ambiente – Feam/MG

## Resumo

O Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas – PNDF pretende conduzir o potencial florestal brasileiro e consolidar o setor como uma atividade estratégica para o desenvolvimento do país, ampliando a área atual de 7,2 milhões para 10,6 milhões de hectares nos próximos 10 anos. Porém o Plano não apresenta claramente ações territoriais voltadas à ocupação de áreas já convertidas, negligenciando a possibilidade de impactos negativos marginais e potenciais conflitos com outros usos do solo. A fim de simular espaço-temporalmente um cenário de direcionamento territorial da meta de expansão dos plantios florestais comerciais no Brasil, foi desenvolvido um modelo de mudança de uso da terra espacialmente explícito. O modelo integra componentes de macro e micro-escala, de rentabilidade e favorabilidade climática, para simular a dinâmica espacial dos plantios. A alocação apresentou um nível de acerto de 70% (janela de análise de 61 células), adequado para a escala. Os resultados indicaram a possibilidade de expandir, conforme meta do PNDF, os plantios florestais comerciais no Brasil com o mínimo conflito (5% de sobreposição) com o cenário de expansão agrícola e sem necessidade de conversão adicional de ecossistemas florestais naturais. Para tanto são necessárias políticas públicas que efetivem o direcionamento da expansão do setor.

**Palavras-chave:** Silvicultura; Uso e mudança de uso do solo; Gestão territorial

## Abstract:

*The National Plan for the Development of Planted Forests - NPDP aims to strategically consolidate the forestry sector as a mean for achieving Brazil's development goals. This policy aims to expand the current area of planted forests from 7.2 million (2015) to 10.6 million hectares (2025). The NPDP, however, does not addresses the territorial implications of establishing its goals. The policy neither specifies which type of land is targeted for fulfilling its ambitious goals nor it assesses negative impacts or potential conflicts it may raise. This work focus on developing a spatially explicit model of land use change for simulating scenarios for the expansion of commercial monocultures of Eucalyptus and Pinus in Brazil. The model integrates macro and micro-scale components, of profitability and climatic favorability, to simulate the spatial dynamics of silvicultural systems in such a way conflicts of the new plantations with other uses are minimal and natural ecosystems are, as much as possible, preserved. The spatial allocation presented a level of accuracy of 70% that was considered adequate for the purposes of this study. The results indicated the possibility of expanding the commercial forest plantations in Brazil with the least conflict (5% overlap) with the scenario of agricultural expansion and without the need to convert natural forest ecosystems. For that, public policies are needed to effectively guide the expansion of the sector.*

**Key-Words:** Forestry; Use and change of land use; Territorial management

alessandro.campos@meioambiente.mg.gov.br

## Introdução

Ao mesmo tempo em que se evidencia uma continuada diminuição da cobertura florestal nativa do planeta em cerca de 13 milhões de hectares por ano (UNEP, 2011), os plantios florestais comerciais estão prestes a se tornar a forma mais significativa do desenvolvimento florestal nas próximas décadas (FAO, 2010). Considerando a ampliação da demanda por madeira e produtos florestais de caráter sustentável (IPCC, 2012), há fortes indicações de que a expansão de plantios florestais persistirá continuamente (FAO, 2011), requerendo conseqüentemente um contínuo aumento da área ocupada.

Na medida em que mais florestas nativas devem ser protegidas e/ou os níveis de desmatamento devem ser reduzidos, o estabelecimento de plantações se torna cada vez mais necessário para compensar reduções da oferta de madeira (BROWN, 1999), reforçando a tendência de aumento da gestão de florestas para a produção sustentável de madeira.

No passado o Brasil experimentou vários ciclos de expansão de projetos florestais, sobretudo de espécies do gênero *Eucalyptus*. Condições edafoclimáticas e fundiárias favoráveis, aliadas à política histórica de incentivo fiscal e investimento em pesquisa, proporcionaram a maior produtividade (m<sup>3</sup>/ha) do mundo e conseqüentemente o menor ciclo de colheita (ABRAF, 2013), resultando na formação de extensas áreas com plantações no país.

Atualmente a silvicultura é um segmento estratégico, sendo prioridade à agenda nacional como uma das principais opções para estimular o crescimento econômico do país (BRASIL, 2011) e, juntamente com o restauro de florestas nativas (GOUVELLO et al., 2010), contribuir positivamente para questões ambientais, como diminuição das emissões líquidas de gases de efeito estufa - GEE, aumento da proteção de recursos hídricos e de solos e redução da pressão sobre ecossistemas nativos.

Nesse sentido, o governo brasileiro e a indústria florestal estão planejando um aumento significativo na produção de produtos madeireiros, originados de plantios florestais, na próxima década, ampliando a área de plantações florestais comerciais. O Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas – PNDF (em elaboração), instituído através da Política Agrícola para Florestas Plantadas – Decreto nº 8.375/2014 (BRASIL, 2014), pretende conduzir o potencial florestal brasileiro e consolidar o setor como uma atividade estratégica para o desenvolvimento do país, tanto no campo agroindustrial quanto no energético.

A finalidade do PNDF é sobretudo fortalecer o desenvolvimento da cadeia de valor de base florestal, representado pelas florestas plantadas<sup>1</sup> e as indústrias de base florestal, em seus diversos segmentos, visando ao aumento da produção de seus bens e serviços para atendimento da demanda interna e externa de bens florestais (BRASIL, 2014). Uma das principais metas do PNDF é expandir de 7,2 milhões<sup>2</sup> para 10,6 milhões de hectares a área coberta por plantios florestais de gêneros de *Eucalyptus* e *Pinus* no período de 2015-2025. Isso representa um aumento da área de quase 50% em 10 anos.

Embora esteja expresso como estratégia de implementação, o PNDF não apresenta explicitamente o conjunto adjacente de ações territoriais diretas que permitiriam a ocupação de áreas já convertidas, que acomodariam as demandas adicionais que serão alocadas em terras e neutralizariam assim efeitos marginais. Essa expectativa de expansão da área coberta por plantios florestais comerciais suscita, portanto, incertezas e conseqüentemente preocupações.

De modo geral, a mudança no uso da terra é um dos principais processos pelos quais os seres humanos afetam o funcionamento do sistema terrestre. A mudança do uso da terra, tem implicações importantes para uma série de aspectos ligados ao ambiente físico e social, tais como: interações biosfera/atmosfera; diversidade genética e de espécies em hábitat ameaçado; condições do solo, da água e dos fluxos de sedimentos; vulnerabilidade dos ecossistemas e dos grupos sociais;

<sup>1</sup> O Decreto nº 8.375/2014 (BRASIL, 2014) define florestas plantadas como florestas compostas predominantemente por árvores de semeadura ou plantio, cultivadas com fins comerciais.

<sup>2</sup> Fonte: IBA (2016)

emissão de CO<sub>2</sub> (VELDKAMP e VERBURG, 2004; ROUNSEVELL et al, 2012) para citar apenas alguns exemplos.

Embora a relevância reconhecida do papel das plantações florestais para a mitigação da emissão de gases de efeito estufa (FAO, 2001; BENÍTEZ et al., 2007; IPCC, 2012), seus benefícios ambientais, globais e locais, também têm sido questionados quando considerados os impactos sobre a biodiversidade e no provimento de serviços ecossistêmicos (PARUELO, 2012; VIHERVAARA et al., 2012; FERNANDES et al., 2016), sobretudo com relação à prática de florestamento em monoculturas de *Eucalyptus* e *Pinus* em substituição de ecossistemas florestais nativos.

Neste contexto, as plantações florestais têm também associados inúmeros conflitos (FAO, 2010b, Gerber, 2010). A expansão das plantações industriais de árvores na América do Sul é um caso de mudança do uso da terra que já gerou conflitos nos níveis local, nacional e internacional (VIHERVAARA et al., 2012). No Brasil, apesar de sua modesta expansão em comparação com as culturas agrícolas, as plantações frequentemente formam uma parte significativa da mudança da paisagem em nível local e regional (ALSTON e MUELLER, 2010; KROGER, 2012), levando no passado a grande oposição de movimento ambientais e sociais (BRITO, 2006, ZHOURI e ZUCARELLI, 2008, KROGER, 2012).

Por outro lado, possíveis efeitos marginais e impactos negativos advindos da dinâmica que envolve a expansão da demanda por recursos terrestres (pressões, competições e conflitos), como o proposto pela PNDF, podem ser em certa medida minimizados através do planejamento territorial integrado (UNEP, 2012). Nesse sentido, através das técnicas de modelagem dinâmica, objetivou-se neste estudo simular um cenário de direcionamento territorial da futura (provável) expansão dos plantios florestais comerciais no Brasil e explorar possibilidades de equilíbrio entre as necessidades e demandas ambientais, sociais e econômicas.

Embora as estimativas da demanda futura para os produtos de base florestal sejam relativamente claras, a provável localização dessa expansão e potenciais conflitos com a floresta nativa ou outros usos da terra ainda não foram considerados. Assim, este estudo apresenta uma primeira tentativa de preencher essa lacuna projetando onde os plantios florestais podem ser alocados na próxima década de modo a produzir menos impactos e minimizando potenciais conflitos, utilizando para isso a aplicação de metodologias de modelagem de mudança de uso da terra espacialmente explícitas.

Apresentando a geografia dessa expansão, pretende-se então contribuir para a estrutura de políticas públicas estratégicas de gestão territorial, inclusive de financiamento e investimento, com foco específico na regulação da expansão da área de plantios florestais comerciais, assim como o planejamento do setor florestal brasileiro.

## Materiais e métodos

A fim de projetar espaço-temporalmente o cenário de direcionamento territorial da expansão das plantações florestais comerciais no Brasil, foi desenvolvida uma estrutura de modelagem composta por duas partes principais, ou submodelos. A primeira parte corresponde à projeção da área ocupada por plantios florestais, espacialmente distribuídos entre as regiões do Brasil considerando as expectativas da PNDF. A segunda parte refere-se ao módulo LUC (Land Use Change), em que é calculada a probabilidade de transição baseada nas condições edafoclimáticas e no potencial retorno econômico para a atividade florestal, e alocados os plantios florestais.

a) Projeção da área ocupada por florestas plantadas

<sup>3</sup> Fonte: IBA (2016)

Através da evolução histórica das plantações em projetos de expansão florestal anunciados e perspectivas regionais, o estudo preliminar das diretrizes para a estruturação da Política Nacional para Florestas Plantadas (BRASIL, 2011) projetou a distribuição espacial do crescimento entre os estados brasileiros (Tabela 1).

Esta distribuição está ligada a dois fatores principais: as diferentes condições climáticas do território brasileiro, especialmente aquelas que favorecem o estabelecimento de plantações comerciais de gêneros de *Eucalyptus* e *Pinus* (RIBEIRO et al., 2009); e a infraestrutura de transporte, diretamente relacionada aos potenciais retornos econômicos das atividades relacionadas às florestas plantadas. A distância percorrida tem alta participação no custo final da madeira (CANTO et al., 2006).

Como houve recuo da meta de expansão de área em relação ao estudo para as diretrizes (de 12 milhões para 10,6 milhões de hectares), essa redução foi aplicada linearmente para ajustar a distribuição de crescimento entre os estados à nova meta definida pelo PNDF para 2025.

Tabela 1. Área ocupada por plantios florestais dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* projetada pela PNDF

| Região/ Estado      | 2015 <sup>3</sup><br>(ha x 10 <sup>3</sup> ) | 2025<br>(ha x 10 <sup>3</sup> ) |
|---------------------|--|---------------------------------|
| <b>Sudeste</b>      | <b>2.765</b>                                 | <b>4.632</b>                    |
| Minas Gerais        | 1.432  | 2.655                           |
| São Paulo           | 1.100  | 1.625                           |
| Espírito Santo      | 229  | 318                             |
| Rio de Janeiro      | 4  | 33                              |
| <b>Sul</b>          | <b>2.105</b>                                 | <b>2180</b>                     |
| Paraná              | 955  | 809                             |
| Santa Catarina      | 658  | 699                             |
| Rio Grande do Sul   | 492  | 671                             |
| <b>Centro-Oeste</b> | <b>1.152</b>                                 | <b>1.336</b>                    |
| Mato Grosso do Sul  | 832  | 1030                            |
| Mato Grosso         | 185  | 164                             |
| Goiás               | 135  | 141                             |
| <b>Nordeste</b>     | <b>856</b>                                   | <b>1.526</b>                    |
| Bahia               | 617  | 931                             |
| Maranhão            | 210  | 377                             |
| Piauí               | 29   | 170                             |
| Outros              | 12   | 47                              |
| <b>Norte</b>        | <b>309</b>                                   | <b>923</b>                      |
| Pará                | 130  | 307                             |
| Amapá               | 63   | 314                             |
| Tocantins           | 116  | 237                             |
| Outros              | 12   | 64                              |
| <b>Total</b>        | <b>7.211</b>                                 | <b>10.600</b>                   |

b) Modelo de mudança de uso da terra

O módulo LUC, com resolução espacial de 500 metros, integra um conjunto de sub-modelos, desenvolvidos utilizando a plataforma de modelagem DINAMICA-EGO (SOARES-FILHO et al., 2013), para, a partir de um conjunto de dados geográficos que abrangem o território brasileiro, analisar a expansão dos plantios florestais comerciais. O módulo combina dois principais aspectos para obter o mapa de probabilidade de transição (SOARES-FILHO et al., 2009) da cobertura do solo para plantios florestais de Eucalyptus e Pinus: a favorabilidade climática (que indica a propensão à ocorrência dos plantios dadas as condições climáticas médias locais); e os potenciais retornos econômicos (baseados sobretudo na infraestrutura logística atualmente instalada). O mapa resultante apresenta as áreas mais ou menos propensas a serem convertidas. O modelo é estruturado a partir de uma arquitetura multiescalar, baseando-se na abordagem top-down para que a área projetada em escala regional pelo PNPf seja decomposta e alocada em microescala (nível de representação da dimensão espacial do modelo). Para isso utiliza regras locais em seu mecanismo de transição, composto por funções de autômatos celulares (SOARES-FILHO et al., 2002), para simular o padrão espacial das plantações no Brasil.

### Favorabilidade climática

A favorabilidade climática foi simulada dadas as condições climáticas médias locais em termos de disponibilidade hídrica e média termal. O modelo foi calibrado, em termos de precipitação e temperatura média, com base nas normais climatológicas distribuídas em mapas matriciais apresentadas na base de dados WorldClim (HIJMANS et al., 2005), e no cálculo dos excedentes e déficits hídricos mensais baseados nas normais climatológicas, utilizando o modelo de espacialização do Balanço Hídrico Climatológico desenvolvido por Lima et al., (2012).

Para verificar a relação entre a ocorrência atual dos plantios florestais comerciais (Eucalyptus e Pinus) e as características climáticas gerais dos locais correspondentes, optou-se por utilizar o método Weights of Evidence - WoE (GOODACRE et al., 1993; BONHAM-CARTER, 1994). 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 (SOARES-FILHO et al., 2009). Desse modo, a favorabilidade foi caracterizada como a probabilidade de 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

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

O termo  $P(\text{PixelFlorestaPlantada} | A \cap B \cap C \cap \dots \cap N)_{(x,y)}$  é a probabilidade 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.

O processo de calibração baseou-se na localização de plantações florestais no mapa de uso do solo apresentado por GOUVELLO et al (2010). A autocorrelação espacial entre os atributos da paisagem não foi significativa (coeficiente de Crammer <0,5).

### Análise de rentabilidade

O potencial retorno econômico para o setor de floresta plantada foi modelado com base no Valor Presente Líquido (VPL) do fluxo de benefícios gerados pela atividade, método de avaliação usualmente utilizado visando indicar a efetividade econômica de empreendimentos florestais (BERGER e GARLIPP, 1982; REZENDE e OLIVEIRA, 2001). Foram simuladas superfícies espaço-econômicas representando a variação espacial do VPL, conforme equação 3:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (3)$$

em que  $R_t$  = Receitas no ano  $t$ ,  $C_t$  = Custos no ano  $t$ ,  $i$  = taxa de juros ou de desconto e  $t$  = tempo em anos. Embora muito sensível à taxa de desconto utilizada, o VPL é um dos melhores métodos, conduzindo geralmente ao resultado correto (SILVA et al., 2002). Assumiu-se o horizonte de 21 anos e a uma taxa de juros de 5%.

Foi utilizado o Valor Anual Equivalente – VAE para representar a quantia anual que pagaria exatamente o VPL dentro do horizonte de tempo considerado. Esse critério, útil na comparação de investimentos com horizontes diferentes (SILVA e FONTES, 2005), é calculado segundo a equação 4.

$$VAE = \frac{VPL * i}{[1-(1+i)^{-n}]} \quad (4)$$

em que  $n$  = duração do projeto.

Baseou-se no fluxo de caixa típico e atual de projetos florestais no Brasil apresentado no Anuário da Agricultura Brasileira – AGRIANUAL 2012. O cálculo do VPL foi fundamentado nos custos comuns (que ocorrem independentemente da finalidade da exploração) e específicos (para o caso do carvão vegetal) da atividade florestal identificados por Guedes et al., (2011).

A fim de obter camadas espaço-econômicas representando a variabilidade espacial dos potenciais retornos da atividade florestal, foi desenvolvido um sub-modelo de logística, que gera camadas dos custos acumulados do transporte de madeira no Brasil, o que representa o valor de transportar uma unidade de produção para o centro de transformação / consumo mais próximo através do sistema rodoviário brasileiro. O custo unitário de transporte da madeira é calculado empregando-se a seguinte equação (SILVA et al., 2007):

$$CT = \frac{Pf}{Cap} 2D \times P \quad (5)$$

em que:  $CT$  = custo de transporte;  $Pf$  = fator indicativo do preço médio do frete no mercado por km (R\$ 2,42/km);  $Cap$  = capacidade de carga (28,6 m<sup>3</sup> ou 75 mdc);  $2D$  = distância multiplicada por dois (km) e  $P$  = produção (m<sup>3</sup>/ha).



### Cenário de análise

Para simular a expansão dos plantios florestais comerciais no Brasil no cenário alternativo de direcionamento territorial, em que não haja desmatamento diretamente associado (conversão de ecossistemas naturais para plantios comerciais de *Eucalyptus* e *Pinus*) e potencial competição com as áreas que provavelmente serão ocupadas para produção das principais commodities agrícolas, o mecanismo de alocação do módulo LUC considera duas principais restrições: estado inicial da célula é diferente das classes de uso do solo correspondentes às coberturas nativas; e apenas a área disponível de pastagens pode ser convertida.

Para isso são utilizados os resultados do modelo de simulação espacial OTIMIZAGRO (SOARES-FILHO et al., 2013). O OTIMIZAGRO é um modelo nacional espacialmente explícito que simula o uso e a mudança de uso da terra, contabilizando as emissões de carbono associadas, sob cenários de demanda agrícola e tendências de desmatamento para o Brasil. Neste estudo, os resultados do OTIMIZAGRO fornecem a paisagem base para execução das transições, de modo que a alocação de plantios florestais comerciais ocorre após (e não simultaneamente) a expansão agrícola simulada, diminuindo significativamente a possibilidade de competição com áreas de alto interesse agrícola. A restrição de conversão apenas de áreas disponíveis de pastagens representa uma minimização dos impactos negativos devido aos relativos ganhos sob o aspecto da conservação de solos e de recursos hídricos na substituição de pastagens por coberturas florestais, tais como: redução da erosão superficial (SIDLE et al., 2006); melhoria na qualidade da água (BRUIJNZEEL, 2004; WOHL et al., 2012); retenção de nutrientes (CASSMAN, 1999); e moderação das vazões máximas (ROA-GARCIA et al., 2011; OGDEN et al., 2013). Além disso, existe a possibilidade de que a área de pastagem convertida para plantios florestais nesse estudo apresente algum nível de degradação, visto que, baseado em indicadores de capacidade de suporte das pastagens, Dias-Filho (2011) estimou entre 50% a 70% da área de pastagens no Brasil estariam em algum grau de degradação.

### Validação do módulo LUC

O modelo foi validado utilizando janelas de resolução múltipla para comparar os mapas simulados e de referência dentro de um contexto de vizinhança (SOARES-FILHO et al., 2013). Para validar a mudança simulada, foram considerados os mapas de Inventário Florestal do Estado de Minas Gerais 2005-2007 (SCOLFORO et al., 2008) como paisagem inicial e final observada, usando a lógica fuzzy e uma função de decaimento exponencial em múltiplas janelas de aumento.

### Análise e discussão dos resultados

A superfície espaço-econômica resultante, apresentada na Figura 1, representa a variação espacial da rentabilidade potencial da atividade florestal baseando-se principalmente no custo de transporte, obtido pelo modelo de logística da madeira desenvolvido, além dos custos típicos da atividade e do preço médio dos produtos.



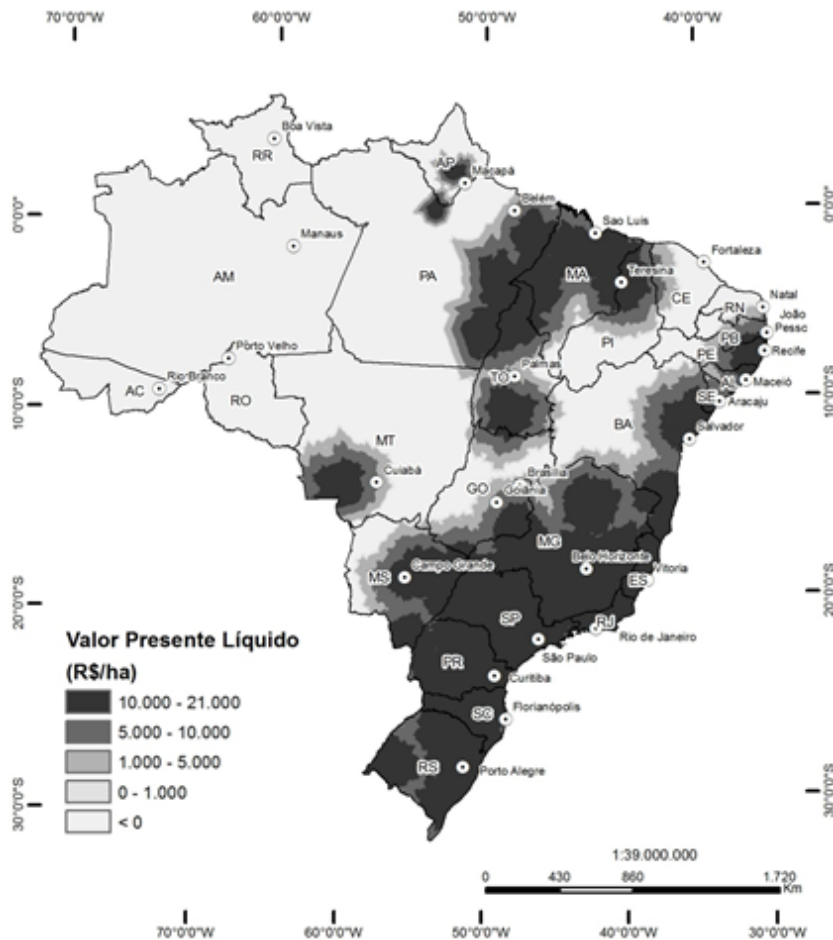


Figura 1 - Estimativa do VPL, consolidado, para a atividade de plantios florestais no Brasil.

Os resultados da estimativa do VPL para projetos de 21 anos, considerando o maior valor para cada célula resultante da rentabilidade dos produtos modelados, indicam uma faixa de retorno de até R\$ 21 mil para projetos de plantios florestais (*Eucalyptus*) no Brasil. A representação anualizada, o VAE, indica um limite de R\$ 1.100 de retorno anual para a atividade dentro do horizonte de tempo considerado. Esses valores máximos são obtidos em células dentro de um raio de 100 km aos principais centros de consumo/transformação da madeira de florestas plantadas.

Nessas regiões mais rentáveis, o retorno econômico médio obtido é de cerca de R\$ 780 hectare/ano. Tais áreas estão concentradas principalmente nas regiões sul e sudeste do Brasil, em porções das regiões nordeste e centro-oeste e em específicas áreas da região norte (nos estados de Amapá, Pará e Maranhão), associadas principalmente à localização de plantas siderúrgicas a carvão vegetal e usinas termelétricas a base de biomassa nessa região. Por outro lado, o cálculo do VPL apresentou valores negativos de retorno econômico em função do aumento da distância percorrida, considerando a presente malha rodoviária brasileira e a localização atual dos principais centros industriais consumidores de madeira de florestas plantadas, indicando que o projeto não estaria remunerando o capital investido, conforme taxa de desconto assumida. Esses casos ocorreram em quase totalidade da região norte do Brasil, em grande parte do nordeste e em certas porções da região centro-oeste. É importante chamar a atenção que as superfícies

modeladas representam a potencialidade de retornos econômicos compatível com a escala de trabalho. Assim, estão associadas às condições assumidas de localização dos principais centros industriais consumidores de madeira de florestas plantadas e a presente malha rodoviária brasileira. Além disso, variáveis como a taxa de juros, o fluxo de caixa e os preços praticados, são altamente sensíveis às condições locais, e desse modo a calibração do modelo em escalas mais detalhadas, como a regional, pode retornar diferentes superfícies espaço-econômicas. Neste caso, a superfície resultante apresentou resultados compatíveis com a dinâmica espacial das florestas plantadas no Brasil, cujas áreas encontram-se concentradas nas regiões sudeste e sul (IBA, 2016), terras de altos retornos econômicos potenciais. Isso sugere que esse tipo de abordagem responde satisfatoriamente para a simulação de trajetórias de mudança no uso da terra. A Figura 2 apresenta a favorabilidade climática modelada para plantios florestais. Como regiões com características climáticas afins acabam obtendo pesos semelhantes, as regiões mais favoráveis indicadas no mapa são aquelas cujas características climáticas são próximas das características dos locais onde o plantio ocorre e que, desse modo, está associado ao nível de rendimento registrado e destacado por diversos estudos.

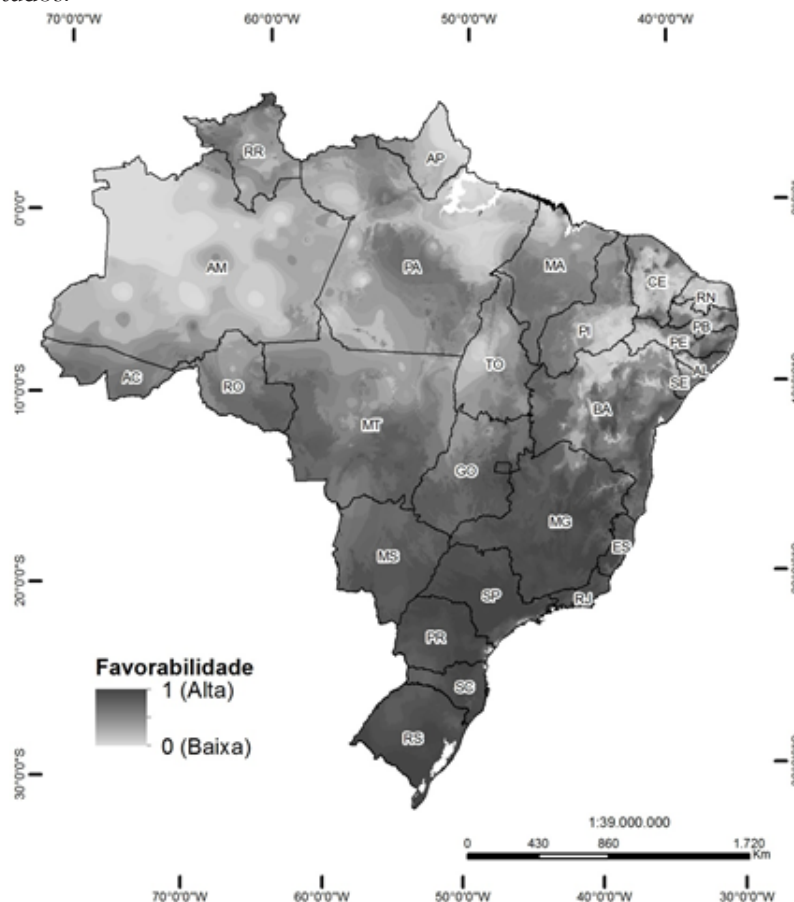


Figura 2 - Favorabilidade climática simulada para plantios florestais

Os resultados indicam que os lugares mais prováveis para ocorrência de florestas plantadas seguem a distribuição atual de plantios no Brasil, como esperado, o que está associado aos níveis de retorno observados. O padrão apresentado no mapa também é concomitante com as restrições mais baixas para a implementação da produção de *Eucalyptus* e *Pinus* (RIBEIRO et al., 2009).

Além disso, o mapa permite observar um padrão concordante com o esperado pelo nível de menor restritividade de exigências climáticas estabelecidas para implantação de povoamentos de produção de espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*.

O modelo obteve um nível de precisão de 50% para uma análise de janela de 21 células, o que significa que a probabilidade de obtê-lo é maior do que a probabilidade de erro. Para uma análise de tamanho de janela de 61 células, o nível de precisão de 70%, o que demonstra que o modelo tem uma boa capacidade de simular a localização de plantios florestais no Brasil, dada a escala da análise. Além disso, a silvicultura no Brasil experimentou no passado vários ciclos de incentivo à expansão das formações florestais com finalidade produtiva (ANTONANGELO, 1998). Esses incentivos, heterogêneos no espaço e no tempo, resultaram em projetos florestais implantados muitas vezes independentes de viabilidade econômica, já que os incentivos fiscais compensavam o baixo retorno. Isso certamente prejudica a previsão espacial. Os plantios florestais comerciais simulados foram alocados principalmente em áreas próximas aos principais centros de consumo/transformação da madeira de florestas plantadas devido à proximidade aos mercados consumidores e correspondentes maiores retornos econômicos apresentados pelo VPL. Característica compatível com a análise de rentabilidade de projetos florestais, cujo custo de transporte tem considerável representação (CANTO et al., 2006; SILVA et al., 2007). O resultado da simulação de mudança do uso da terra são séries temporais de mapas de uso da terra na resolução de 500 metros. A Figura 3 apresenta o padrão de uso da terra no ano de 2025.



Figura 3 - Padrão de uso da terra para o Brasil em 2025 resultante da simulação

A Figura 4 apresenta as estimativas de densidade, pelo método Kernel, dos plantios florestais no Brasil em 2010 e para 2025, resultado da alocação espacial simulada. Essa representação expressa a tendência de expansão das formações florestais em direção às regiões centro-oeste, norte e nordeste. Sob esse aspecto, tem destaque os estados do Pará, Maranhão e principalmente Mato Grosso do Sul.

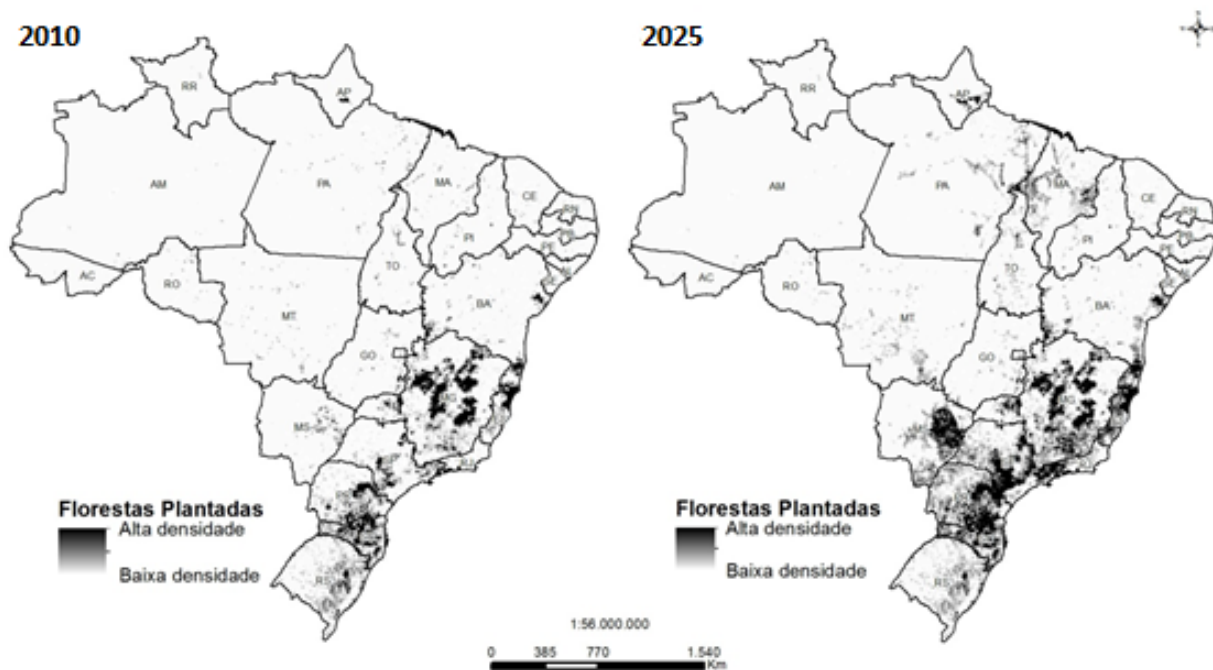


Figura 4 - Mapas de densidade Kernel da localização das florestas plantadas em 2010 e 2025 (simulado)

Além de compatível com a dinâmica recentemente verificada dos plantios entre as regiões, a expansão das áreas de floresta plantada foi predominante nos estados com mercado regional de madeira estabelecido, principalmente para celulose e papel e carvão vegetal. No caso da celulose e papel, devido ao crescimento esperado da produção nacional, que apresenta uma das maiores taxas dentre os produtos modelados, e o nível de consumo da madeira produzida por florestas plantadas. A expansão das formações florestais em direção às regiões centro-oeste, norte e nordeste está ajustada com a dinâmica tendencial da segunda geração do desenvolvimento florestal brasileiro (BRASIL, 2011) que se volta principalmente para os estados do Mato Grosso do Sul, Tocantins e Maranhão.

Para destacar o resultado da expansão das florestas plantadas sobre o padrão de uso do solo e da quantidade de mudança no uso da terra, as informações de tipo de cultura agrícola calculado pelo OTIMIZAGRO foram agregadas em uma classe. Esse tipo de uso do solo é mantido constante durante a simulação porque não foi objeto da modelagem nesse estudo. A Tabela 2 resume as tendências na área de cada classe para o Brasil em 2025 segundo o cenário proposto neste estudo.

Tabela 2 – Sumário das simulações de mudança de uso da terra pelo modelo

|   | <b>2010<sup>4</sup></b><br><b>(Milhões ha)</b> | <b>2025<sup>5</sup></b><br><b>(Milhões ha)</b> | <b>2011 - 2025</b><br><b>(%)</b> |
|---|--|--|----------------------------------|
| Agrícola  | 48,8   | 63,1   | +29%                             |
| Pastagem  | 229,9  | 195,8  | -14,8%                           |
| Plantios florestais comerciais<br>( <i>Eucalyptus e Pinus</i> ) | 6,5  | 10,6   | +63%                             |

<sup>4</sup>Fonte: Gouvello et al., (2010)

<sup>5</sup> Área agrícola baseada em Gouvello et al., (2010) e Pastagem e Plantios florestais comerciais resultantes da simulação

Um resultado evidente é o declínio da área de pastagens, em cerca de 15%, tendo cedido áreas para a atividade agrícola e para plantios florestais. A expansão dos plantios florestais comerciais responde por quase 30% da redução de 34,1 milhões de hectares das áreas de pastagens. De modo geral, as projeções e a simulação indicaram que se considerarmos esses plantios florestais em áreas antropizadas, somente essa expansão implica em uma redução de 5% das áreas de pastagens. Os ecossistemas nativos, inseridos ou não em áreas de conservação da natureza, não foram afetados por estes processos de expansão, uma vez que foram consideradas apenas transições a partir de pastagens. Do mesmo modo, os resultados indicaram que a expansão de florestas não interferiu na expansão agrícola projetada, na medida em que todas as áreas foram alocadas, segundo microrregiões, sem necessidade de realocação em outras localidades para evitar a competição com a produção de alimentos. A identificação das áreas ocupadas com pastagens potencialmente conversíveis (com potencial rentabilidade para a atividade florestal) demonstra a viabilidade de expandir as florestas plantadas no Brasil de modo compatível com as expectativas de elevação do nível de desenvolvimento do setor florestal, conciliando-a a estratégias de gestão territorial que visem minimizar potenciais conflitos e efeitos marginais da mudança do uso da terra. A alocação satisfatória por esse estudo dos 10,6 milhões de hectares de área ocupada pelos plantios florestais comerciais em 2025, somada à expansão agrícola projetada pelo OTIMIZAGRO e a restrição ao desmatamento adicional, reforça a possibilidade da utilização das pastagens, potencialmente conversíveis (climática e economicamente) para os plantios comerciais, acompanhar o desenvolvimento dessas atividades. A indisponibilidade de bases especializadas referentes à condição das pastagens não viabilizou uma análise mais detalhada desse aspecto. Por fim, a análise dos resultados da simulação indica que, de acordo com o cenário apresentado, dois processos de mudança no uso da terra foram responsáveis pela queda da área de pastagens no período: a expansão global de área cultivada, devido à crescente demanda de produção agrícola; e a expansão dos plantios florestais. Em trajetórias paralelas, essa expansão também poderia resultar no deslocamento das terras de pastagens existentes, compensando as perdas com conversão de áreas naturais. Isso demonstra a necessidade de analisar a dinâmica de mudança do uso da terra a partir de uma perspectiva integrada.

## Considerações finais

A plataforma e os métodos utilizados mostraram-se capazes de modelar a dinâmica espacial das florestas plantadas no Brasil. Os resultados da simulação fornecem informações importantes para a avaliação da atividade florestal futura sob o aspecto de mudança de uso da terra. A análise de rentabilidade representou uma importante consideração para simular a ocorrência dos plantios florestais, na medida em que indica uma maior possibilidade para obtenção de sucesso em projetos florestais nessas áreas. As superfícies espaço-econômicas podem ser integradas às ferramentas de modelagem econômico-ambiental existentes, utilizadas para analisar as trajetórias de mudança no uso da terra. Além disso, essa representação da rentabilidade potencial pode dar suporte a programas e planos de fomento florestal que promovem a inserção remunerada dos produtores rurais na cadeia produtiva florestal. A abordagem descrita neste trabalho é geral e permite que sejam incorporadas em sua continuidade outras estratégias de gestão territorial e outras preocupações, como as consequências da mudança do uso da terra sobre a biodiversidade e sobre as emissões de gases de efeito estufa relacionados com a conversão das terras, que pode neutralizar os potenciais benefícios da substituição de combustíveis fósseis. O direcionamento territorial, como demonstrado nesse estudo, é importante para possibilitar a utilização e gestão de forma tão eficiente quanto possível das terras disponíveis. Através do direcionamento territorial é possível a ampliação da oferta de produtos florestais produzidos de forma sustentável, atendendo a uma demanda crescente do mercado e das políticas públicas nacionais e internacionais.

A expansão do setor desvinculada de uma política pública mais territorializada e direcionada para ocupação daquelas áreas com potencial para recuperação produtiva (as pastagens como áreas já antropizadas, mas subutilizadas), poderiam, dentre outros, neutralizar esses benefícios em termos de mitigação de gases de efeito estufa.

Se, no futuro, as necessidades humanas devem ser satisfeitas de forma sustentável, é agora essencial resolver estes conflitos e avançar para uma utilização mais eficaz e eficiente da terra e dos seus recursos naturais. O planejamento e a gestão territorial integrada são uma forma eminentemente prática de o conseguir.



## Referências Bibliográficas

- ANTONANGELO, A.; BACHA, C.J.C. As Fases da silvicultura no Brasil. RBE, Rio de Janeiro, n. 52, p. 207-238, 1998.
- ABRAF. Anuário estatístico 2012: ano base 2012. Brasília: Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas; 2013.
- BERGER, R.; GARLIPP, R.C.D. Custo-preço: uma alternativa financeira na avaliação da produção florestal. Circular técnica 141. Piracicaba: IPEF, 1982.
- BONHAM-CARTER, G. F. Geographic Information Systems for geoscientists: modelling with GIS. 1st ed. Kidlington, UK: Elsevier Science Ltd, 1994.
- BRASIL. Diretrizes para a estruturação de uma política nacional de florestas plantadas. Brasília: Secretaria de Assuntos Estratégicos/Presidência da República, 2011. 104 p.
- BRASIL. Decreto nº 8.375, de 11 de dezembro de 2014. Define a Política Agrícola para Florestas Plantadas. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2014/Decreto/D8375.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2014/Decreto/D8375.htm)>. Acesso em: 18 dez. 2016. Publicado no Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil em 12 dez. 2014.
- BROWN, S. Opportunities for mitigation carbon emissions through forestry activities. Winrock International. Arlington, p. 1-5. 1999.
- BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 104, p. 185-228. 2004.
- CANTO, J.L.; MACHADO, C.C.; GONTIJO, F.M.; JACOVINE, L.A.G. Colheita e transporte florestal em propriedades rurais fomentadas no estado do Espírito Santo. Revista Árvore, n. 6, p. 989-998, 2006.
- CASSMAN, K. G. Ecological intensification of cereal production systems Yield potential, soil quality, and precision agriculture. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 96, n. 11, p. 5952-5959, 1999.
- DIAS-FILHO, M.B. Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação. 4. Ed. Belém: Ed. do Autor, 2011, 215p.
- FAO. Planted forest in sustainable forest management: A statement of principles. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2010.
- FAO. State of the world's forests. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2011.
- FERNANDES, G.W.; COELHO, M.S.; MACHADO, R.B.; FERREIRA, M.E.; AGUIAR, L.M.S.; DIRZO, R.; SCARIOT, A.; LOPES, C.R. Afforestation of savannas: an impending ecological disaster. Natureza & Conservação n. 14, p. 146-151, 2016.
- 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: The World Bank, 2010. 292 p.
- GUEDES, I.C.L.; COELHO-JUNIOR, L.M.; OLIVEIRA, A.D.; MELLO, J.M.; REZENDE, J.L.P.; SILVA, C.P.C. Economic analysis of replacement regeneration and coppice regeneration in eucalyptus stands under risk conditions. Cerne, n. 3, p. 393-401, 2011.
- HIJMANS, R.J.; CAMERON, S.E.; PARRA, J.L.; JONES, P.G.; JARVIS, A. (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25: 1965-1978.
- IBA. Relatório Anual 2016: ano base 2015. Brasília: Indústria Brasileira de Árvores; 2016.
- LIMA, L. S.; OLIVEIRA, L. J. C.; SOARE FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O. H. Balanço hídrico climatológico espacializado para o Brasil. XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 23 a 28 de Setembro de 2012, Gramado, RS. Anais.
- OGDEN, F. L.; CROUCH, T. D.; STALLARD, R. F.; AND HALL, J. S. Effect of land cover and use on dry season river runoff, runoff efficiency, and peak storm runoff in the seasonal tropics of Central Panama, Water Resources Research, v. 49, p. 1-20, 2013.
- REZENDE, J. L. P., OLIVEIRA, A. D. Análise econômica e social de projetos florestais. Viçosa, MG: UFV, 2001. 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: Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Monteiro, J.E. (Org.). Brasília, DF: INMET, 2009.



- ROA-GARCIA, M. C.; BROWN, S.; SCHREIER, H.; LAVKULICH, L. M. The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. *Water Resources Research*, v. 47, n. 5, May 2011.
- ROUNSEVELL, M.D.A.; ARNETH, A.; BROWN, D.G.; DE NOBLET-DUCOUDRÉ, N.; ELLIS, E.; FINNIGAN, J.; GALVIN, K.; GRIGG, N.; HARMAN, I.; LENNOX, J.; MAGLIOCCA, N.; PARKER, D.; O'NEIL, B.; VERBURG, P.H.; YOUNG, O. (2012). Incorporating human behaviour and decision making processes in land use and climate system models. GLP Report No. 7. GLP-IPO, São José dos Campos.
- 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.
- SIDLE, R. C.; ZIEGLER, A. D.; NEGISHI, J. N.; NIK, A. R.; SIEW, R.; TURKELBOOM, F. Erosion processes in steep terrain: truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology Management*, v. 224, p. 199-225, 2006.
- SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G., VALVERDE, S. R. Economia florestal. Viçosa, MG: UFV, 2002. Silva, M.L.; Fontes, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra (VET). *Revista Árvore*, n. 6, p. 931-936, 2005.
- SILVA, M.L.; OLIVEIRA, R.J.; VALVERDE, S.R.; MACHADO, C.C.; PIRES, V.A.V. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos. *Revista Árvore*, n. 6, p. 1073-1079, 2007.
- SOARES-FILHO, B.S.; LIMA, L.S.; HISSA, L.V.; COSTA, W.L., RODRIGUES, H.O.; FERREIRA, B.M.; et al. OTIMIZAGRO: Uma Plataforma Integrada de Modelagem de Uso e Mudanças no Uso da Terra para o Brasil. Final report. Belo Horizonte (MG): Centro de Sensoriamento Remoto, Universidade Federal de Minas Gerais; Relatório n.º.: 978-85-61968-04-5, 2013.
- 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. Belo Horizonte: Centro de Sensoriamento Remoto. Disponível em: [http://csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/Dinamica\\_EGO\\_guidebook.pdf](http://csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/Dinamica_EGO_guidebook.pdf) f. 2009.
- SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H.O.; FOLLADOR, M. A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. *Environmental Modelling & Software*, n. 43, p. 80-87, 2013.
- UNEP. Forests in a green economy: a synthesis. St-Martin-Bellevue, França: United Nations Environmental Programme; 2011.
- VELDKAMP, A.; VERBURG, P.H. Modelling land use change and environmental impact. *Journal of Environmental Management*, n. 72, p. 1-3, 2004.
- WOHL, E.; BARROS, A.; BRUNSELL, N.; CHAPPELL, N. A.; COE, M.; GIAMBELLUCA, T. W.; GOLDSMITH, S.; HARMON, R.; HENDRICKX, J. M. H.; JUVIK, J. O.; MCDONNELL, J. J.; OGDEN, F. L.: The hydrology of the humid tropics. *Nature Climate Change*, v. 2, p. 655-662, 2012. DOI: 10.1038/nclimate1556.