

Revista Brasileira de Cartografia (2016) N<sup>o</sup> 68/1: 1-14  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **AVALIAÇÃO DA EXPANSÃO DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BIOMA CERRADO POR MEIO DE MODELAGEM DINÂMICA DA PAISAGEM**

*Assessing Sugarcane Expansion in the Cerrado Biome through a Dynamic  
Modeling of the Landscape*

**Noely Vicente Ribeiro, Laerte Guimarães Ferreira  
& Nilson Clementino Ferreira**

**Universidade Federal de Goiás – UFG**  
**Instituto de Estudos Socioambientais / Programa de Pós-Graduação em Geografia**  
**Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento - LAPIG**  
Campus II, Cx. Postal 131, CEP 74001-970, Goiânia - GO, Brasil  
noely.ribeiro@uol.com.br; laerte@iesa.ufg.br; ncferreira@gmail.com

*Recebido em 31 de Outubro, 2014/ Aceito em 18 de Agosto, 2015*  
*Received on October 31, 2014/ Accepted on August 18, 2015*

### **RESUMO**

Devido à crescente demanda por fontes alternativas de energia renováveis capazes de minimizar a emissão de gases de efeito estufa, a produção de etanol vem aumentando no Brasil, demandando grandes extensões de terra, principalmente do Cerrado brasileiro, para o cultivo de cana-de-açúcar. Por outro lado, a expansão do cultivo da cana-de-açúcar no bioma Cerrado, sem as devidas normatizações e planejamento, pode resultar em significativas consequências negativas para a biodiversidade, os recursos hídricos e os serviços ambientais em geral. Especificamente, este trabalho, a partir de uma modelagem dinâmica, que considera tanto as tendências da expansão em curso, quanto à ocorrência de áreas favoráveis à presença da cana, se propõe a avançar sobre o conhecimento de áreas potencialmente favoráveis à expansão canieira no bioma Cerrado. Os nossos resultados indicam, até 2035, um aumento de 500% na área plantada com cana atualmente, o qual poderá comprometer em até 45% as áreas agrícolas do bioma Cerrado, cujo resultado será o predomínio da monocultura de cana em vários municípios, com significativos impactos sobre várias bacias hidrográficas do bioma.

**Palavras chaves:** Cana-de-açúcar, Etanol, Modelagem Dinâmica, Bioma Cerrado, Bacias Hidrográficas.

### **ABSTRACT**

Due to the increasing demand for alternative sources of energy, renewable and able to minimize the emission of greenhouse gases, the ethanol production is growing fast in Brazil, at the expense of large extensions of land being rapidly occupied by sugarcane, especially in the Cerrado biome. On the other hand, such expansion, without proper planning, will certainly threaten the biodiversity, the water resources and other Cerrado environmental services. Within this context, in this work, focused on a dynamic modeling approach, which accounts for both the current trends, as well as the availability of suitable land, we propose a thorough understanding on how the sugarcane front may move across time and space. Our results show that the sugarcane area may increase fivefold up to 2035, and that, without proper territorial ordainment, approximately 45% of the current agricultural area may be replaced by sugarcane, inducing a dangerous monoculture over wide areas, in addition to severe impacts to many of the Cerrado watersheds.

**Keywords:** Sugarcane, Ethanol, Dynamic Modeling, Cerrado Biome, Hydrographic Basins.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os biocombustíveis têm sido considerados por inúmeros setores da sociedade como uma das mais promissoras alternativas de energia renovável capaz de diminuir a dependência por combustíveis fósseis e conseqüentemente diminuir também a emissão de gases de efeito estufa (FARRELL *et al.* 2006; RAGAUSKAS *et al.* 2006). Devido aos altos preços do petróleo e as vantagens ambientais, têm ocorrido incentivos governamentais para a produção de biocombustíveis em várias partes do mundo (KAMMEN *et al.*, 2008), sendo que a produção global praticamente triplicou, passando de 18.1 bilhões de litros em 2000, para cerca de 60.5 bilhões de litros em 2007. Os líderes da produção mundial são Estados Unidos (43%), Brasil (32%), e a União Européia (15%) (COYLE, 2007; MCGEE & HILTON, 2011). Entre os biocombustíveis mais utilizados estão o biodiesel e o etanol, produzido principalmente a partir da cana-de-açúcar, milho e beterraba (CADENAS e CABEZUDO, 1998). Em relação ao etanol derivado da cana, o Brasil ocupa lugar de destaque, haja vista ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido pela Índia, China, Tailândia, Paquistão e México (FAO, 2010).

Apesar dos reconhecidos benefícios ambientais dos biocombustíveis, muitas são as preocupações em relação aos impactos sobre a biodiversidade, sobre os recursos hídricos e sobre a produção de alimentos. Por outro lado, e ainda que sejam necessárias políticas que minimizem estes impactos, ainda existem poucas disposições legislativas, a nível global, voltadas ao ordenamento da expansão de áreas agrícolas para a produção de biocombustíveis (GROOM e GRAY, 2007).

A produção e utilização de biocombustíveis sem as devidas normatizações e planejamentos, podem resultar em significativas conseqüências negativas para a biodiversidade, uma vez que a diminuição de habitats e o comprometimento de serviços ambientais, afetados pelo uso de agrotóxicos, degradação do solo e do clima, além dos impactos associados ao transporte, refinação e queima (COOK; BEYEA; KEELER, 1991; WORLDWATCH INSTITUTE, 2006; GROOM e GRAY, 2007). A degradação de

recursos hídricos durante os processos de cultivo e processamento de biocombustíveis também geram significativos impactos sobre o meio ambiente (BERNDES 2002; NAS 2007).

No Estado de Goiás, em apenas dois anos, entre 2005 e 2007, ocorreu uma expansão de 37% das áreas cultivadas com cana-de-açúcar, sendo que aproximadamente 66% de todo este incremento ocorreu sobre áreas identificadas como uso agrícola, o que sugere uma significativa substituição de cultivos. Em relação às áreas de pastagens e remanescentes de vegetação natural, os incrementos neste período foram de 31% e 2%, respectivamente (RIBEIRO; FERREIRA, L.; FERREIRA, N., 2010a).

A necessidade de se ordenar a expansão em curso do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil motivou, por iniciativa do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento – MAPA, em parceria com o Ministério do Meio Ambiente - MMA, a elaboração do Zoneamento Agroecológico – ZAE da Cana-de-açúcar, com base em características edafo-climáticas, topografia, situação da cobertura vegetal, localização de áreas protegidas e presença de áreas urbanas e de mineração (MANZATTO *et al.*, 2009). Neste zoneamento, os biomas Pantanal e Amazônia foram excluídos como áreas de expansão, haja vista suas fragilidades e peculiaridades ambientais, pouco favoráveis ao cultivo da cana-de-açúcar.

Especificamente em relação ao bioma Cerrado, Ribeiro *et al.* (2010b) elaboraram um cenário para a expansão da cana-de-açúcar no Cerrado sobre áreas atualmente ocupadas com pastagens cultivadas, levando em consideração o cumprimento da legislação ambiental, a localização das usinas de açúcar e álcool em funcionamento, o sistema viário, a ocorrência de latossolos e as áreas de relevo plano (até 6° de declividade). A área para expansão da cana-de-açúcar apontada no cenário foi de 187.682,8 km<sup>2</sup>, cerca de 5 vezes a área cultivada até 2009, que era de 39.963,1 km<sup>2</sup>, de acordo com o mapeamento do CANASAT/INPE (RUDORFF *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2009).

Este artigo busca avançar sobre o conhecimento de áreas potencialmente favoráveis à expansão canavieira no bioma Cerrado. A partir de uma modelagem dinâmica, que leva em consideração tanto as tendências da

expansão em curso, quanto a ocorrência de áreas favoráveis à presença da cana, elaborou-se um cenário progressivo da presença da cana (até o ano de 2035), em relação ao qual são avaliados, para diferentes unidades de análise, os impactos e padrões de distribuição da cana-de-açúcar no bioma Cerrado.

## 2 - MÉTODOS UTILIZADOS

Conforme o mapeamento do Bioma Cerrado realizado no âmbito do PROBIO – Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (SANO *et al.*, 2008), baseado em imagens de satélite Landsat (2002), o Cerrado possuía 121.275.660,9 ha ocupados por vegetação nativa, 58.826.819,9 ha ocupados por pastagem e 20.707.569,6 ha de áreas agrícolas. A cana-de-açúcar até o ano de

2009 ocupava 3.996.306,8 ha de todo o Bioma, conforme pode ser visualizado na Figura 1.

O trabalho foi elaborado segundo cinco etapas principais, sendo que a primeira delas consistiu na organização da base de dados geográficos para todo o bioma Cerrado. Em seguida, foram produzidos mapas de tendência da expansão da cultura de cana-de-açúcar no cerrado, considerando o incremento ocorrido entre 2005 e 2007, e posteriormente o incremento entre 2005 e 2009. A terceira etapa foi dedicada à validação de todos os mapas de tendência, utilizando como controle o mapeamento do CANASAT/INPE para os anos de 2006, 2007 e 2008. Nesta etapa, também foi avaliado o nível de similaridade entre os mapas de tendência obtidos a partir das expansões ocorridas de 2005 a 2007 e de 2005 a 2009.

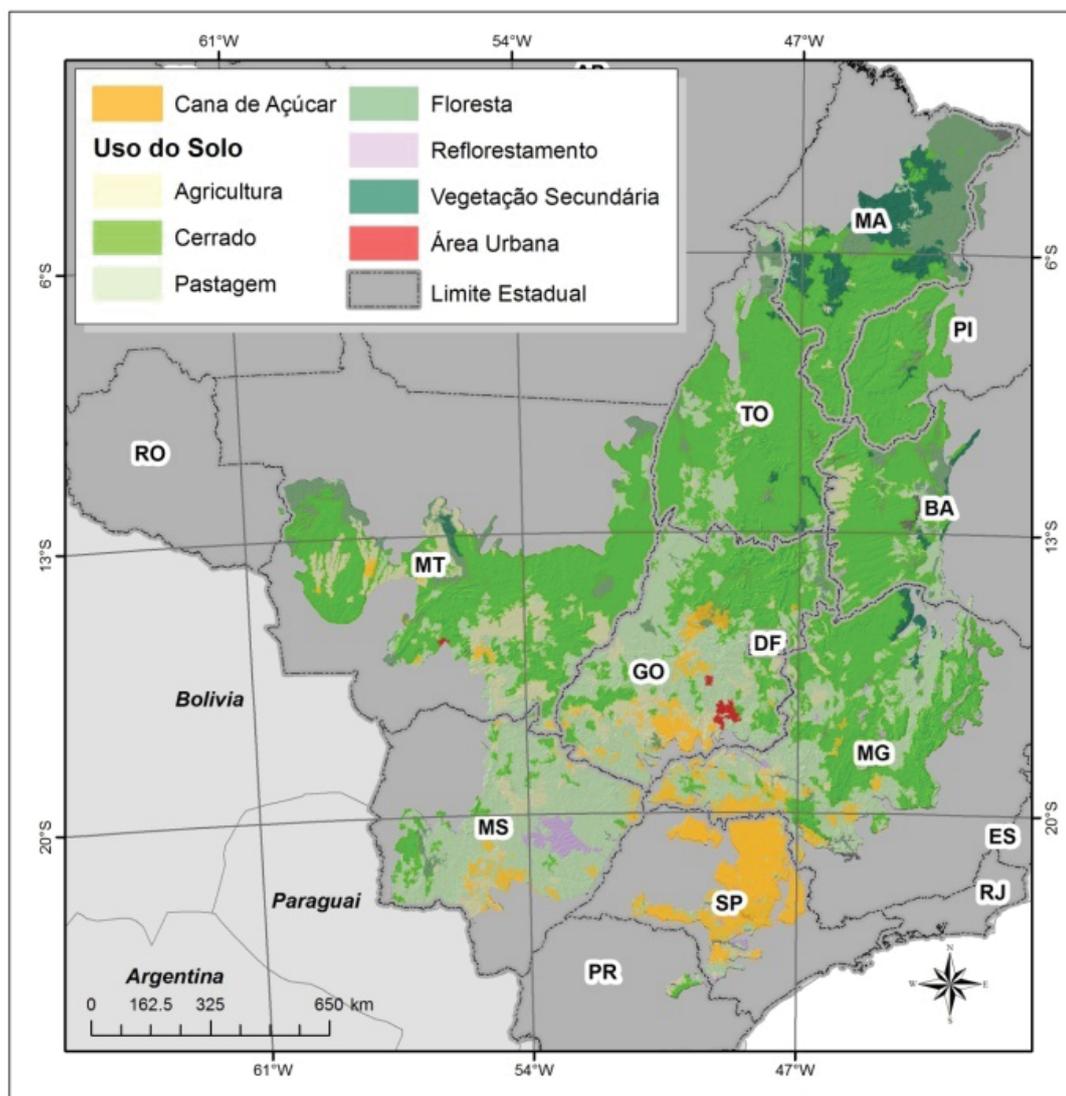


Fig. 1 - Mapa de uso e ocupação da Terra no bioma Cerrado, elaborado a partir de imagens Landsat 7 ETM+ obtidas em 2002. Fonte: MMA / PROBIO.

Na última etapa, a partir dos mapas de tendência baseados nos incrementos de 2005 a 2009, foram realizadas avaliações dos impactos futuros da expansão da cana-de-açúcar sobre o bioma Cerrado.

## 2.1 Base de Dados Geográficos

A base de dados geográficos foi organizada a partir da integração de dados oriundos de várias instituições públicas. Os diversos planos de informação que integraram a base de dados foram utilizados em vários momentos do trabalho, i.e. na geração dos mapas de tendência da expansão da cana-de-açúcar, na validação destes mapas e também na avaliação dos possíveis impactos referentes às tendências identificadas (Quadro 1).

Os dados do mapeamento anual da cana-de-açúcar, bem como o mapa de localização das usinas de açúcar e álcool, foram elaborados pelo projeto CANASAT, que tem por objetivo mapear as áreas plantadas de cana-de-açúcar no país (CANASAT/INPE, 2010; RUDORFF *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2009), e disponibilizados em meio digital via internet, por meio da página <http://www.dsr.inpe.br/canasat/>.

O mapa de declividade foi elaborado a partir dos dados altimétricos derivados das imagens SRTM (MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G., 2009), disponibilizados por meio do Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite da EMBRAPA, no âmbito da Coleção “Brasil

em Relevo” ([www.relevobr.cnpm.embrapa.br](http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br)). Quanto ao mapa de solos, disponível para consulta *online*, através do *link* <http://mapas.ibge.gov.br/solos/viewer.htm>, este foi elaborado pela Diretoria de Geociências do IBGE, através do Departamento de Recursos Naturais e das Divisões de Geociências, e pela EMBRAPA Solos - Centro Nacional de Pesquisas de Solos, a partir de compilações, conversão para o meio digital e de levantamentos de solos produzidos pelo Projeto RADAMBRASIL.

Em relação às rodovias, optou-se pelo mapa elaborado durante o Plano Nacional de Logística e Transportes - PNLT, em 2009, uma iniciativa do Ministério dos Transportes, em cooperação com o Ministério da Defesa, através do CENTRAN - Centro de Excelência em Engenharia de Transportes. No que diz respeito aos limites municipais, foram selecionadas as folhas topográficas na melhor escala disponível nas diversas regiões do País, conforme a situação vigente da Divisão Político-Administrativa do Brasil – DPA, referente ao ano-base 2000, elaborado pelo Departamento de Cartografia do IBGE.

Os limites das bacias hidrográficas utilizados nesta pesquisa correspondem àqueles definidos a partir do sistema de codificação de bacias hidrográficas, denominado Ottobacias, foi utilizado as ottobacias de nível cinco (GALVÃO & MENESES, 2005), obtidos junto a Agência Nacional das Águas (ANA/MMA), por meio do *site* [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br). Ainda no âmbito do

Quadro 1: Organização da Base de Dados

Fonte	Dado	Utilização
INPE/CANASAT	Mapeamento 2005	Mapa de tendência de expansão
	Mapeamento 2006	Validação do mapa de tendência
	Mapeamento 2007	Mapa de tendência da expansão e validação
	Mapeamento 2008	Validação do mapa de tendência
	Mapeamento 2009	Mapa de tendência de expansão e validação
	Localização de usinas	Mapa de tendência de expansão
SRTM/NASA	Declividade	Mapa de tendência de expansão
Rodovias/PNLT	Distancia de rodovias	
IBGE e EMBRAPA	Solos	
PROBIO	Uso do solo	Mapa de tendência de expansão e Análise dos impactos da expansão da cana-de-açúcar no bioma Cerrado
IBGE	Limite municipal	
SRH/MMA	Bacias hidrográficas	

Fonte: Ribeiro (2010).

Ministério do Meio Ambiente, foram obtidos os limites das áreas prioritárias para conservação da biodiversidade, das unidades de conservação federais e estaduais de proteção integral e de uso sustentável, bem como informações sobre a cobertura e uso dos solos, conforme o mapeamento realizado pelo PROBIO (SANO *et al.*, 2008; SANO *et al.*, 2010).

## 2.2 Elaboração dos Mapas de Tendência

Os mapas de tendência da expansão do cultivo da cana-de-açúcar no bioma Cerrado foram obtidos por meio do programa computacional DINAMICA-EGO versão 1.4.0 (RODRIGUES *et al.*, 2007), concebido como uma plataforma de modelagem para os projetos de pesquisa conduzidos pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (<http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>). Este programa contém o método de modelagem que simula a dinâmica de uma paisagem, baseado no modelo estocástico de autômatos celulares (SOARES-FILHO *et al.*, 2001 e 2002; FERREIRA *et al.*, 2009). Através dele, calcula-se a probabilidade da expansão de um determinado evento que ocorre no espaço, de acordo com a sua condição prévia e do arranjo espacial das células vizinhas, conforme um conjunto de regras de transição (SOARES-FILHO *et al.*, 2003). Para a realização da modelagem propriamente dita, todos os dados foram transformados para estrutura matricial (*raster*), com as células reamostradas para a resolução espacial de 350 metros, para viabilizar o processamento de todos os dados pelo programa computacional DINAMICA-EGO.

Com todos os dados organizados, a primeira etapa de processamento consistiu no cálculo da matriz de transição, envolvendo os mapas de 2005 e 2007 de cultivo de cana, e posteriormente os mapas de 2005 e 2009. Por meio da análise dos mapeamentos de um mesmo tema em épocas distintas, a matriz de transição contém a taxa de expansão do tema mapeado mais recentemente, em relação ao mais antigo. O resultado do cálculo da matriz de transição entre o estado  $T_1$  (2005) e  $T_2$  (2007) foi uma taxa de 1% de mudança, num intervalo de dois anos, ou 0,5% para cada ano. No caso da transição entre o estado  $T_1$  (2005) e  $T_2$  (2009), a taxa de mudança foi de 2%, sugerindo que a taxa de expansão do

cultivo da cana-de-açúcar no bioma Cerrado vem se mantendo em 0,5%.

Após a obtenção da matriz de transição, procedeu-se ao cálculo dos pesos que variáveis explicativas possuem relação ao mapa de mudanças na paisagem. Nesse cálculo, quantifica-se a ocorrência de todas as variáveis explicativas consideradas, sobre a região de transição. Este método, denominado de “método dos pesos da evidências” identificou as probabilidades (a *priori* e a *posteriori*) de ocorrência da expansão do cultivo da cana-de-açúcar em face da ocorrência prévia de outro evento, denominado evidência (MOREIRA *et al.*, 2001; FERREIRA *et al.*, 2009). O peso de evidência, obtido por meio de uma tabulação cruzada entre as variáveis e o mapa de mudança na paisagem, indica a influência (positiva ou negativa) de cada faixa de distância das variáveis proximais (ex. distância de rodovias e distância de usinas) ou de cada classe das variáveis categóricas (ex. classes de declividade, solos e uso do solo) para a ocorrência da expansão do cultivo de cana-de-açúcar. Foram calculadas as correlações entre as variáveis explicativas, obtendo-se um valor médio para a correlação de 0,23, com desvio-padrão de 0,096. Isto significa que as variáveis consideradas na análise influenciam a expansão da cana-de-açúcar de diferentes maneiras e, portanto, todas as variáveis devem ser consideradas no mapeamento da tendência de expansão do cultivo de cana-de-açúcar. A influência dessas variáveis foi expressa por meio de mapas de probabilidade de futuras áreas para o cultivo de cana-de-açúcar.

As etapas finais consistiram de simulações para gerar cenários futuros (ou seja, modelos de expansão do cultivo de cana-de-açúcar para 30 anos, a partir do estado  $T_1$  “ano de 2005” do cultivo da cana-de-açúcar) e às validações do modelo de mudança.

## 2.3 Validação dos Mapeamentos de Tendência

De posse dos mapas de cultivo de cana-de-açúcar dos anos de 2006 até 2009, e dos mapas de tendência dos mesmos anos obtidos através da modelagem dinâmica, para os intervalos 2005-2007 e 2005-2009, foi possível avaliar o nível de similaridade entre os mapas obtidos pela modelagem e pelo mapeamento a partir de observação de dados orbitais (CANASAT).

Foram avaliadas as porcentagens de coincidências espaciais entre os dados observados e os mapas calculados, considerando também a vizinhança da modelagem dinâmica de 1 pixel (350 metros), 2 pixels (700 metros), 3 pixels (1050 metros) e 4 pixels (1400 metros). Após os cálculos das porcentagens de coincidências para cada uma das quatro faixas de vizinhança, foram calculados os valores médios das similaridades para cada ano. Da mesma forma, foi avaliado o nível de correlação entre o total de área do cultivo mapeado e o calculado pela modelagem dinâmica a nível de microrregiões.

## 2.4 Avaliações dos Impactos Futuros da Expansão da Cana-de-Açúcar

Ao utilizar os mapas anuais de tendência da expansão da cana-de-açúcar sobre o bioma Cerrado, de 2006 a 2035, deu-se início aos processos de avaliações dos impactos que esta expansão pode causar sobre o bioma Cerrado. Foram realizadas análises espaciais topológicas considerando o uso do solo, a fim de se verificar quais os tipos de uso de solo serão impactados no futuro e também o nível de impacto que a expansão terá diretamente sobre as áreas cobertas com vegetação nativa remanescentes de cerrado. Da mesma forma, foram realizadas análises espaciais entre os mapas de tendência de expansão com os municípios, a fim de se detectar os municípios que podem ter suas áreas geográficas com alto grau de ocupação pelo cultivo da cana-de-açúcar, bem como as bacias hidrográficas que também poderão ser altamente impactadas até o ano de 2035.

## 3. RESULTADOS

Os dois mapas de tendência resultantes para o ano de 2035 são muito parecidos. Enquanto o mapa de tendência produzido com base nos mapeamentos do CANASAT de 2005 e 2007 apresenta uma expansão na área para cultivo de cana-de-açúcar de 162.160,6 km<sup>2</sup>, o mapa de tendência com referência nos mapeamentos do CANASAT de 2005 e 2009 apresenta uma área de 156.184,8 km<sup>2</sup>, ou seja, uma diferença em área de apenas 3,7%.

Os mapas de tendência de 2006 a 2009 foram avaliados em relação aos mapeamentos de cultivo de cana-de-açúcar elaborados pelo projeto CANASAT/INPE. A Figura 2 ilustra os

resultados das análises de similaridade espacial entre os mapas de tendência obtidos utilizando as áreas cultivadas com cana-de-açúcar de 2005 e 2007 e, também 2005 e 2009, com os resultados produzidos pelo CANASAT/INPE, para os anos de 2006, 2007, 2008 e 2009.

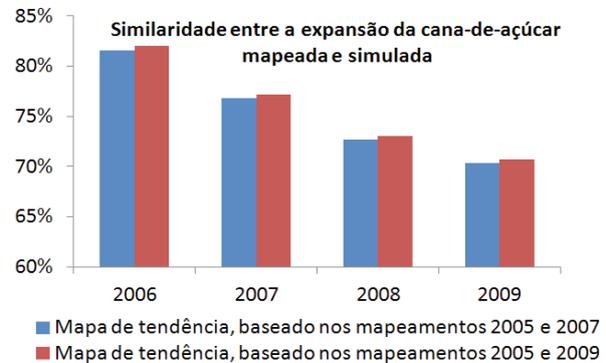


Fig. 2 – Análises de similaridade entre a expansão do cultivo de cana-de-açúcar mapeada e simulada. Fonte: Ribeiro (2010).

É possível observar nesta figura que as similaridades entre os mapas variam de 83% a 72%, sendo que a similaridade diminui, conforme o tempo se distancia de 2005. A Figura 2 mostra também que os mapas de tendência baseados nos mapeamentos dos anos de 2005 e 2009 apresentam similaridade ligeiramente maior que os mapas de tendência baseados nos anos de 2005 e 2007. Esta pequena diferença ocorreu devido ao maior intervalo de tempo adotado. Desta forma, após a realização desta primeira avaliação, foram adotados os mapas de tendência baseados no intervalo temporal de 2005 a 2009.

A Figura 3 apresenta o resultado do mapa de tendência, a partir dos mapeamentos do CANASAT/INPE de 2005 e 2009, ilustrando a possível expansão do cultivo da cana-de-açúcar sobre o Cerrado, entre os anos de 2005 e 2035. Conforme o mapa do ano de 2005, o cultivo de cana-de-açúcar ocupava a área de 25.801,3 km<sup>2</sup>, ou seja, 1,2% da área deste bioma. Em 2035, o cultivo de cana-de-açúcar poderá ocupar uma área de até 162.160,6 km<sup>2</sup>, ou seja, 7,9% da área do bioma. Portanto, em 30 anos, o cultivo de cana-de-açúcar no bioma, poderá se expandir em 628,5%.

É possível observar também na mesma figura, que nos Estados de Goiás, Minas Gerais e

São Paulo poderão ocorrer as maiores expansões do cultivo de cana-de-açúcar. No ano de 2035, o cultivo de cana-de-açúcar poderá ocupar 78,2% do Cerrado paulista, 8% do Cerrado mineiro e

13% do Cerrado goiano. Em 2005, o cultivo de cana-de-açúcar ocupava 23,98% da área do Cerrado paulista, 0,68% da área do cerrado mineiro, e 0,64% da área do Cerrado goiano.

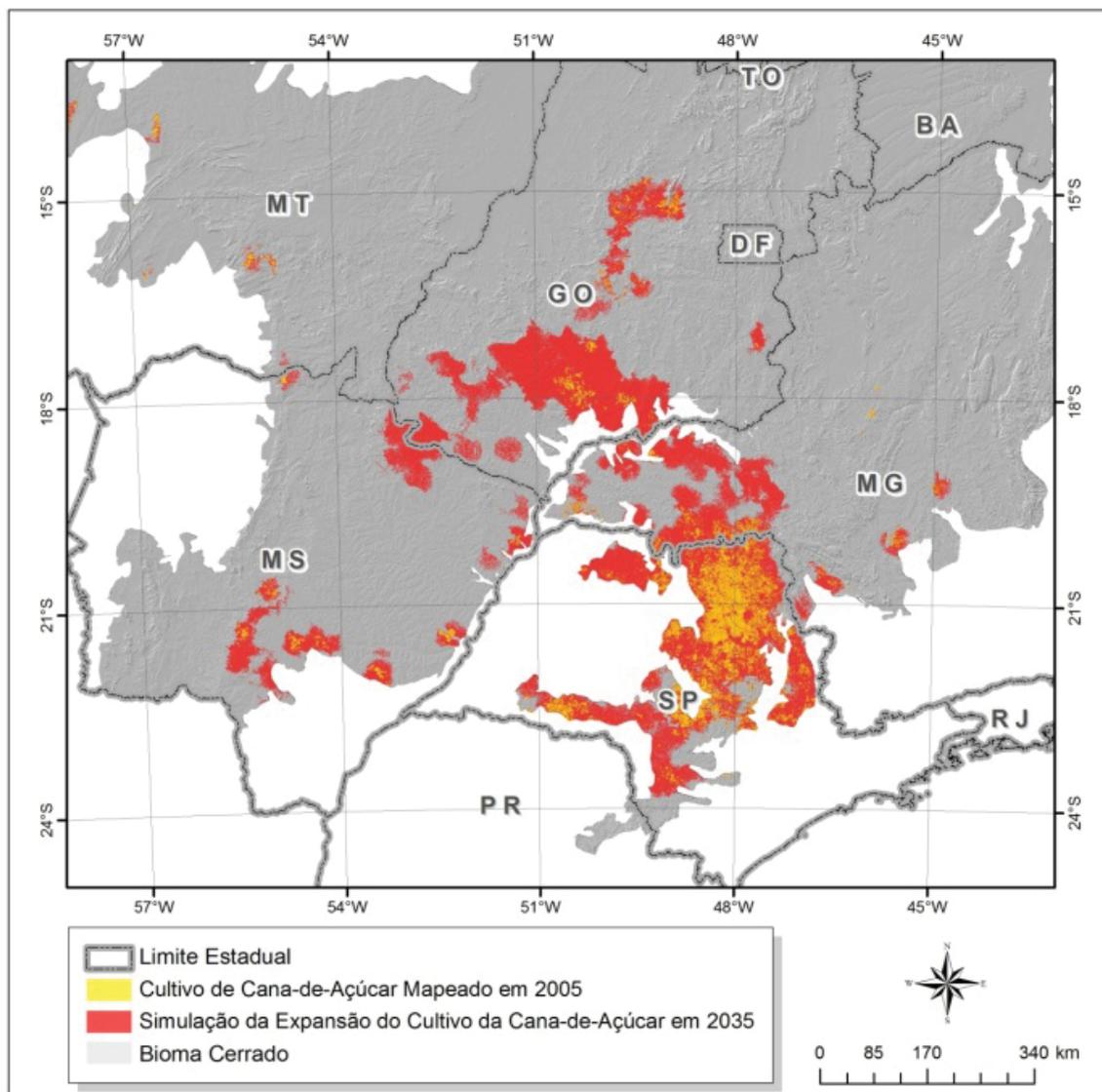


Fig. 3 - Mapa de tendência da expansão do cultivo de cana-de-açúcar no bioma Cerrado, entre 2005 e 2035. Fonte: Ribeiro (2010).

A Figura 4 e a Tabela 1 ilustram a expressiva expansão do cultivo da cana-de-açúcar nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, entre 2005 e 2035.

Em termos proporcionais, a maior expansão será observada em Goiás.

A validação do mapeamento de tendência foi realizada por meio da análise de regressão entre a área média mapeada, nos anos de 2006 a 2009 para 112 microrregiões do bioma Cerrado, e a área média simulada pela plataforma DINAMICA-EGO para os mesmos anos. Conforme mostrado na Figura 5, aproximadamente 96% da variação

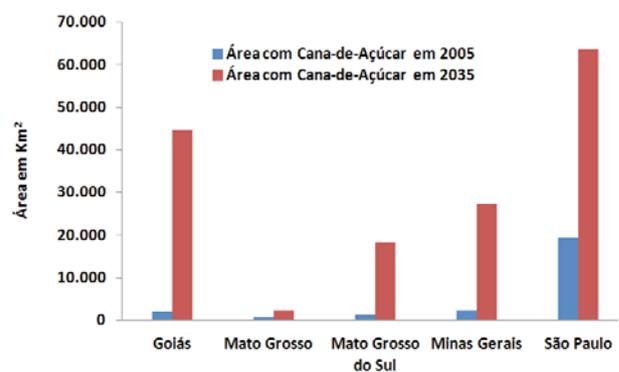


Fig. 4 - Expansão do cultivo da cana-de-açúcar nos estados. Fonte: Ribeiro (2010).

Tabela 1: Expansão do Cultivo da Cana-de-Açúcar, entre 2005 e 2035, nos Estados Abrangidos pelo Bioma Cerrado

Estado	Expansão da Área Cultivada entre 2005 e 2035
Goiás	2103,8%
Mato Grosso	313,5%
Mato Grosso do Sul	1.499,2%
Minas Gerais	1206,5%
São Paulo	326,0%

Fonte: Ribeiro (2010).

na área simulada, entre 2006 e 2009, é explicada por meio da variação na área mapeada para o mesmo período.

Ao todo, foram produzidos 30 mapas de tendência da expansão do cultivo da cana-de-açúcar sobre o bioma Cerrado, de 2006 até 2035. A figura 6 ilustra a expansão do cultivo de cana-de-açúcar entre os anos de 2010 e 2035.

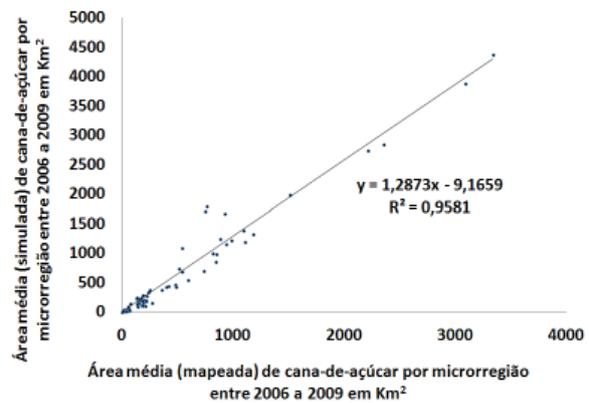


Fig. 5 - Correlação entre a área de expansão do cultivo de cana-de-açúcar mapeada e simulada, entre os anos de 2006 a 2009. Fonte: Ribeiro (2010).

A Figura 7 mostra como vem ocorrendo a expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar no cerrado, e como essa expansão poderá ocorrer até 2035. É possível observar na figura, que a taxa de expansão mapeada é

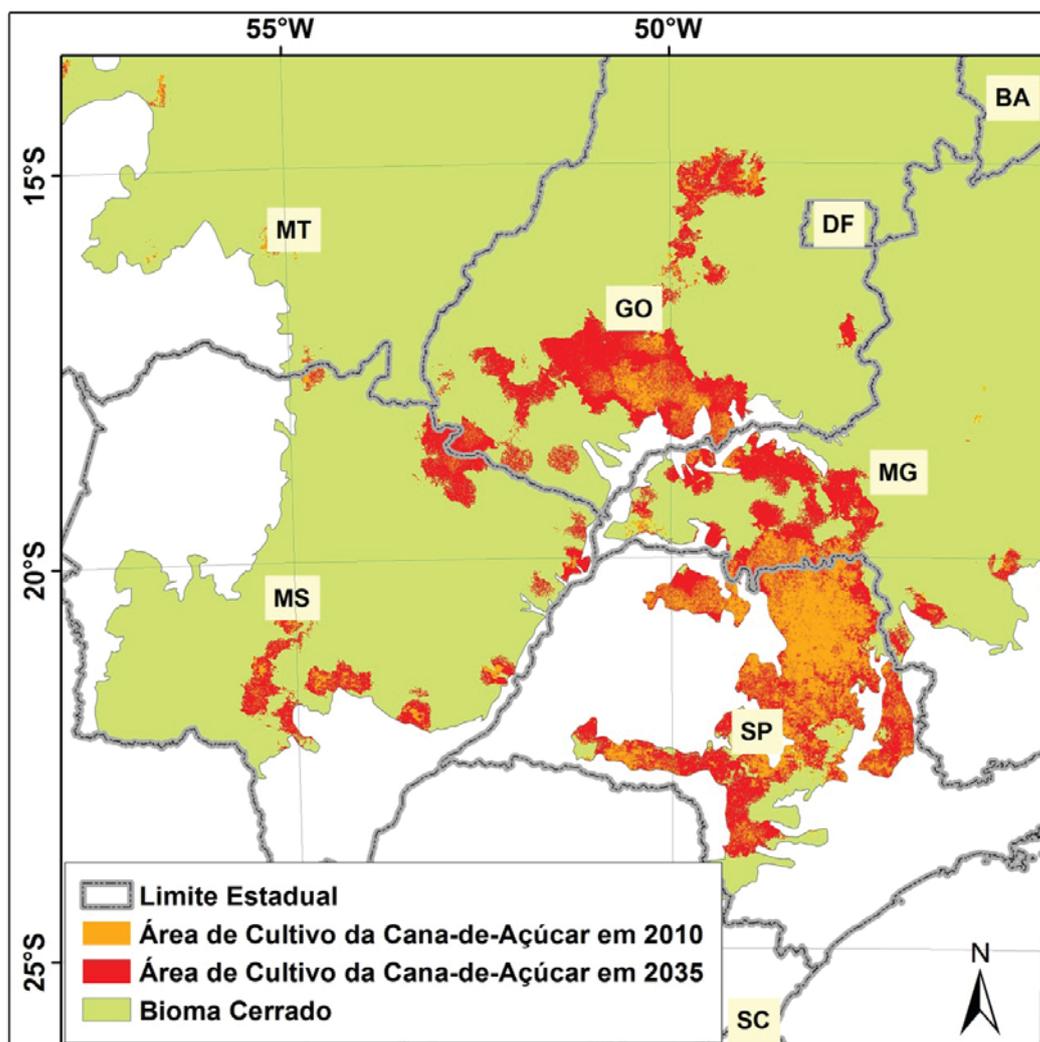


Fig. 6 - Mapa de tendência da expansão do cultivo de cana-de-açúcar no bioma Cerrado entre os anos de 2010 e 2035

praticamente a mesma da obtida pela simulação da expansão do cultivo da cana-de-açúcar até 2035. Observa-se uma anomalia na expansão entre 2009 e 2010, que pode ser explicada pela alteração na estrutura dos arquivos. Enquanto entre 2005 e 2009 foram utilizados arquivos vetoriais produzidos pelo projeto CANASAT/

INPE, com base no processamento de imagens orbitais TM/Landsat 5, com resolução espacial de 30 metros, a partir de 2010, os mapas são simulados a partir de dados com resolução espacial de 350 metros. Por outro lado, a partir de 2010 a taxa de expansão volta ao patamar anterior e permanece constante.

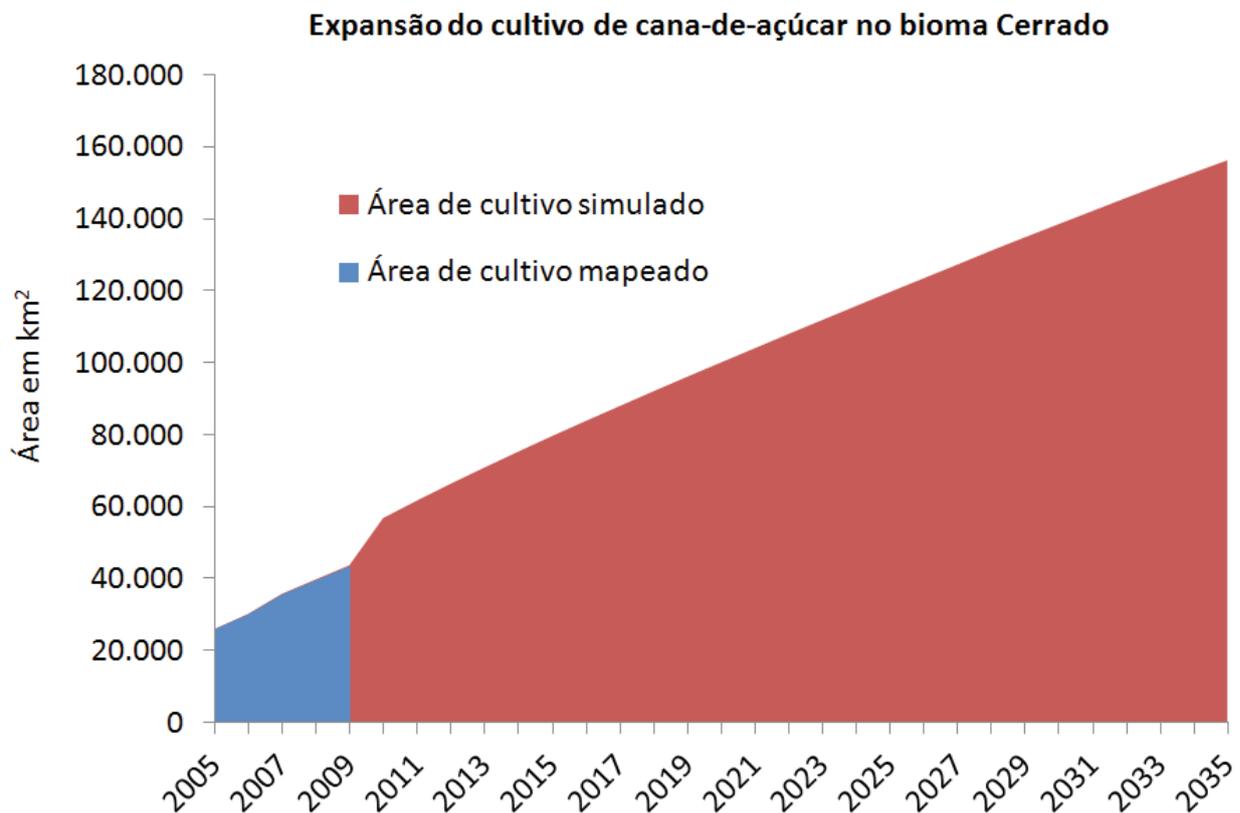


Fig. 7 - Expansão do cultivo da cana-de-açúcar no bioma Cerrado, mapeado e simulado. Fonte: Ribeiro (2010).

Após a elaboração e avaliação dos mapas de tendência, foram realizadas algumas análises dos possíveis impactos que a expansão do cultivo de cana-de-açúcar poderá causar no bioma Cerrado. A Figura 8 mostra que até o ano de 2006, 35 municípios, todos localizados no estado de São Paulo, possuíam mais da metade de suas áreas territoriais ocupadas com o cultivo de cana-de-açúcar. No ano de 2035, 202 municípios, localizados nos estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul possuirão mais da metade de suas áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Em 2006 apenas um município tinha mais de 90% de seu território ocupado com o cultivo de cana-de-açúcar. Em 2035, a quantidade de municípios

que poderá ter mais de 90% de seu território ocupado com cultivo de cana-de-açúcar passará para 105.

É importante lembrar que atualmente grande parte dos municípios que serão ocupados com o cultivo de cana-de-açúcar em 2035 já apresentam pouca quantidade de remanescentes de vegetação nativa, por conta das conversões em pastagens e áreas agrícolas. Da mesma forma, a grande ocupação desses municípios pelo cultivo de cana-de-açúcar induzirá a concentração de atividades produtivas e também poderá induzir o aumento na concentração de terras.

A Figura 9 e a Tabela 2 demonstram que até o ano de 2035, o cultivo de cana-de-açúcar tenderá a ocorrer sobre áreas já ocupadas

com agricultura, provavelmente temporárias, e pastagens (conforme dados PROBIO). É importante observar que as áreas agrícolas sofrerão maior ocupação, seguida das áreas de

pastagens. As áreas de remanescentes poderão sofrer um pequeno impacto, pois a área onde a cana-de-açúcar tende a ocupar até 2035 já se encontra sob forte pressão antrópica.

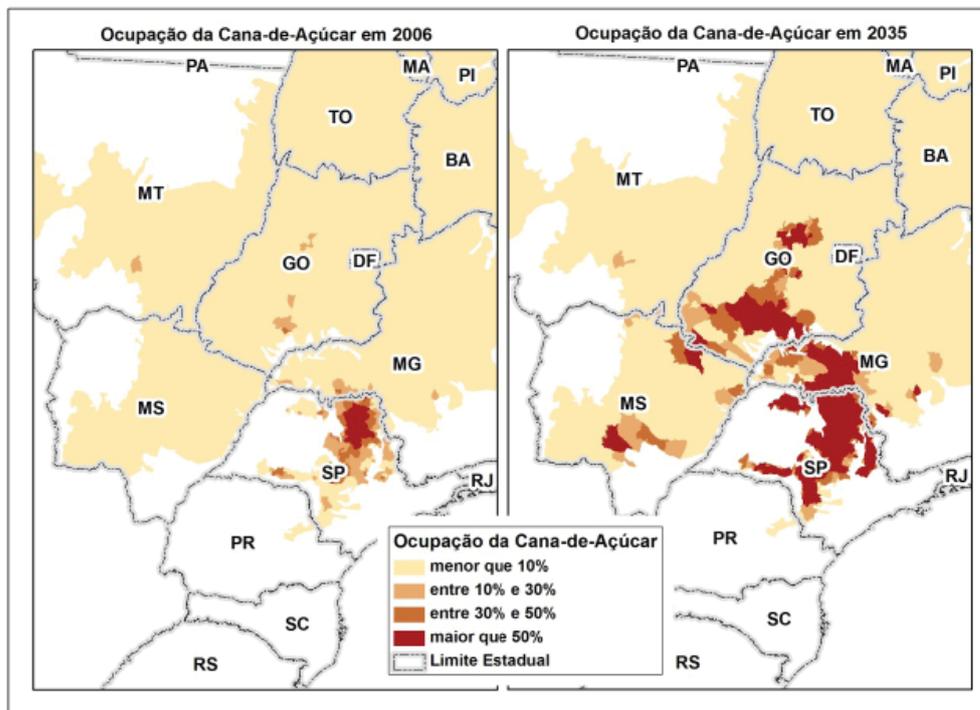


Fig. 8 - Ocupação do cultivo de cana-de-açúcar em relação aos limites municípios do bioma Cerrado. Fonte: Ribeiro (2010).

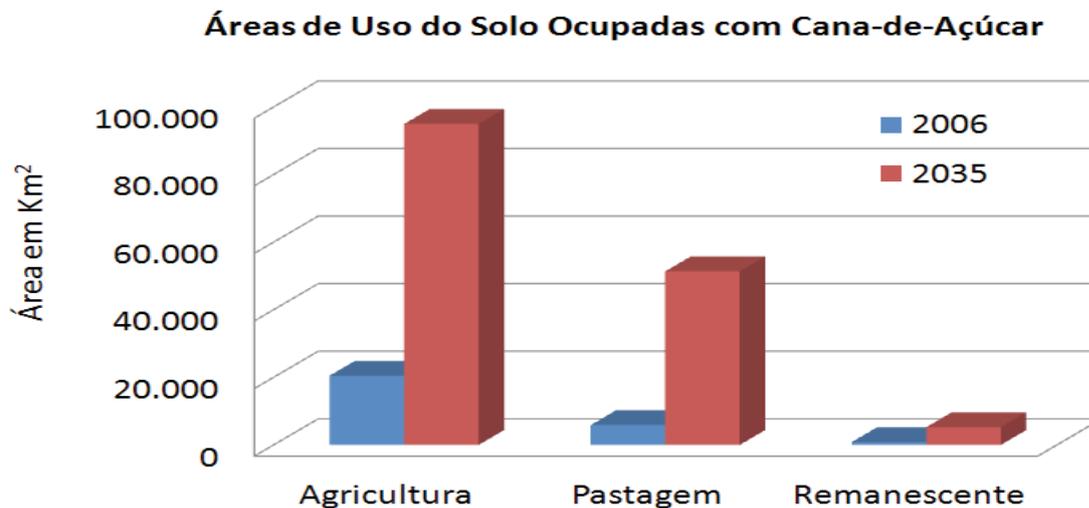


Fig. 9 - Impacto da expansão do cultivo da cana-de-açúcar sobre o uso do solo no bioma Cerrado (conforme dados PROBIO). Fonte: Ribeiro (2010).

Ao comparar a expansão do cultivo da cana-de-açúcar com o mapa do PROBIO, verifica-se que 45,9% e 8,4% das áreas agrícolas e de pastagens no cerrado, respectivamente, poderão ser ocupadas com cana-de-açúcar até 2035, o que pode, por sua vez, induzir a novos

desmatamentos com vistas a suprir as demandas das commodities agrícolas e pecuária.

A Figura 10 ilustra os impactos da expansão da cana-de-açúcar sobre a agricultura, a pecuária e os remanescentes de vegetação nativa nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul,

Tabela 2: Uso do Solo Impactado pelo Cultivo da Cana-de-Açúcar

Uso do Solo	em 2006 (km <sup>2</sup> )	em 2035 (km <sup>2</sup> )	Expansão
Agricultura	20.482,9	94.992,3	463,8%
Pastagem	5.859,5	51.364,5	876,6%
Remanescente	845,0	5.261,2	622,6%

Fonte: Ribeiro (2010).

Mato Grosso, Goiás e São Paulo. Em Minas Gerais o maior impacto poderá ocorrer sobre as pastagens, ainda que haja indícios de impactos significativos sobre a agricultura.

No caso do estado do Mato Grosso do Sul, será seguido o mesmo padrão de Minas Gerais. Por outro lado, nos estados de Mato Grosso, Goiás e São Paulo, o maior impacto poderá ocorrer sobre as áreas agrícolas e menos na pastagem. No caso dos remanescentes de vegetação nativa, os maiores impactos diretos poderão ocorrer no estado de Goiás.

Neste trabalho foi avaliado também o impacto da tendência do cultivo de cana-de-açúcar sobre as bacias hidrográficas no bioma Cerrado. O resultado desta avaliação está ilustrado na Figura 12. É possível observar

que as bacias dos rios dos Bois, Mogi-Guaçu, Pardo e parte da bacia do rio Grande poderão ser ocupadas em mais de 40% de suas áreas por cana-de-açúcar.

É importante observar também que as bacias dos rios Paranaíba, Paraná, Paranapanema e Invinheima também poderão sofrer impactos significativos. Sobre essas bacias hidrográficas, já muito antropizadas, a expansão do cultivo de cana-de-açúcar poderá gerar demanda adicional de água para irrigação. Além disso, o processo industrial poderá gerar grandes quantidades de resíduos que poderão impactar os recursos hídricos locais e regionais.

Em relação aos impactos sobre a conservação da biodiversidade, e considerando as unidades de conservação de proteção integral e de uso sustentável (aproximadamente 8% do bioma Cerrado) e áreas prioritárias (38% da área do bioma), até o ano de 2035 2.874,9 km<sup>2</sup> de Áreas de Proteção Ambiental (APA) no estado de São Paulo poderão ser ocupados com cana-de-açúcar. O mapeamento do CANASAT/INPE de 2009, quando cruzado com as unidades de conservação, já apontava uma sobreposição de 1.150,5 km<sup>2</sup> com as mesmas Áreas de Proteção Ambiental do estado de São Paulo.

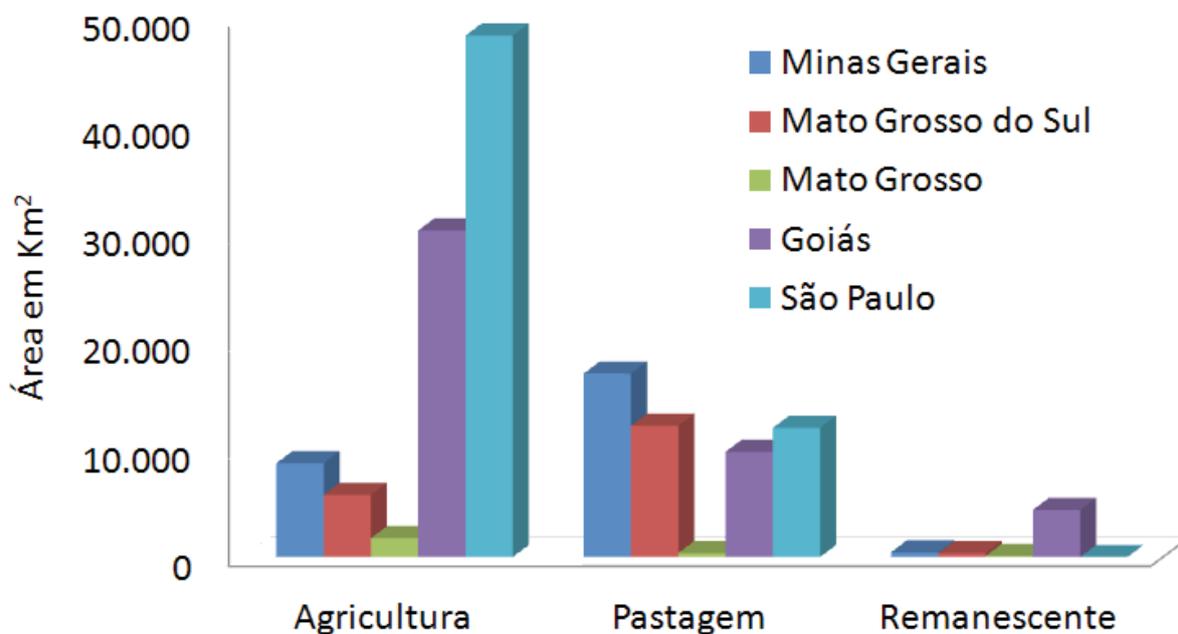


Fig. 10 - Impacto do cultivo da cana-de-açúcar em 2035 sobre os usos do solo nos estados em 2002 (dados PROBIO). Fonte: Ribeiro (2010).

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem dinâmica é essencial para produzir informações geograficamente referenciadas a respeito do possível ordenamento da paisagem no futuro. Essas informações são de extrema importância, pois fornecem subsídios para avaliar as consequências futuras de atividades que vem sendo exercidas na atualidade, sendo possível então avaliar os custos e benefícios (ambientais, institucionais, econômicos e sociais) das transformações que podem ocorrer na paisagem.

Neste trabalho, a partir da aplicação de modelagem dinâmica sobre a expansão do cultivo de cana-de-açúcar entre 2005 e 2009 e considerando variáveis da paisagem tais como relevo, infraestrutura, solos e uso do solo, obteve-se a estimativa da expansão da cana-de-açúcar no bioma cerrado até 2035. Considerando a expansão da cana-de-açúcar entre 2005 e 2009, além das variáveis ambientais e socioeconômicas, a área ocupada com cana passará de 25.801,3 km<sup>2</sup> (em 2005) para 162.160,6 km<sup>2</sup> (em 2035). Um salto de 628,5% em 30 anos.

Entre os impactos desta expansão, ressalta-se a substituição de aproximadamente 46% e 8% das áreas atualmente destinadas à agricultura e pecuária, respectivamente. Em relação à vegetação remanescente, os resultados apontam a substituição de 5.261,2 km<sup>2</sup> de novos desmatamentos em função do avanço da cana. Da mesma forma, esta expansão também trará impactos significativos sobre as bacias hidrográficas.

Novos exercícios de modelagem da paisagem deverão considerar múltiplas variáveis de entrada, tais como cana-de-açúcar, áreas de pastagens e áreas agrícolas, a fim de se estimar os impactos diretos e indiretos. É importante também considerar que os resultados obtidos neste estudo estão diretamente relacionados com as variáveis da paisagem e a taxa da expansão do cultivo da cana-de-açúcar sobre esta, não tendo sido consideradas variáveis econômicas e mercadológicas.

Neste trabalho foi pressuposto que a expansão da cana-de-açúcar, nos últimos anos, foi o reflexo das variáveis econômicas, afinal ela ocorre com o intuito de aumentar a oferta de etanol no mercado, devido o aumento da

demanda por esse biocombustível ao longo dos últimos anos.

A inclusão de variáveis econômicas, bem como de taxas de crescimento variáveis ao longo do tempo, pode melhorar os resultados da modelagem da dinâmica da paisagem. Alternativamente, a geração de cenários anuais, sistematicamente validados em relação às estimativas obtidas por meio de análises de imagens satelitárias, pode facilitar a convergência de resultados em relação a períodos mais prolongados.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) por concessão de bolsa de doutorado para a primeira autora e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de produtividade em pesquisa ao segundo e ao terceiro autores.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso: 08 de agosto de 2010.

BERNDES, G. Bioenergy and water—implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. **Global Environmental Change**. Vol. 12, Issue 4. 253–271pp. 2002.

CADENA, A.; CABEZUDO, S. **Biofuels as Sustainable Technologies: Perspectives for Less Developed Countries**. Elsevier Technological Forecasting and Social Change 58, 83–103. New York, 1998.

CANASAT/INPE. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/mapdsr/>>. Acesso: 10 de setembro de 2010.

COOK, J. H., J. BEYEA; KEELER, K. H. Potential impacts of biomass production in the U.S. on biological diversity. **Annual Reviews of Energy and Environment** v.16 n.1, p. 401–431, 1991.

COYLE, W. The future of biofuels: A global perspective. **Amber Waves**, v.5 n.5, p. 24-29, 2007.

FAO (United Nations Food and Agricultural Organization). **FAOSTAT**, 2010. Disponível em:

- <<http://faostat.fao.org/default.aspx>>. Acesso: 13 de setembro de 2010.
- FARRELL, A. E.; PLEVIN, R. J.; TURNER, B. T.; JONES, A. D.; O'HARE, M. KAMMEN, D. M. Ethanol can contribute to energy and environmental goals. **Science** v. 311 n. 5760, 506–508, 2006.
- FERREIRA, M. E. **Modelagem da Dinâmica de Paisagem do Cerrado**. Goiânia 2009, 115 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais), Universidade Federal de Goiás-UFG.
- GALVÃO, W. S.; MENESES, P. R. **Avaliação dos sistemas de classificação e codificação das bacias hidrográficas brasileiras para fins de planejamento de redes hidrométricas**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12; 2005, Goiânia (GO). Anais... Goiânia (GO), 2005. p. 2511-2518.
- GROOM, J. M.; GRAY, M. E., Townsend A. P. Biofuels and Biodiversity: Principles for Creating Better Policies for Biofuel Production. **Conservation Biology**, Volume 22, No. 3, 602–609. Society for Conservation Biology. 2007.
- KAMMEN, D. M.; FARREL, A. E., PLEVIN, R. J., JONES, A. D. **Energy and greenhouse impacts of biofuels: A framework for analysis**. Paper presented at the OECD Roundtable on Biofuels, Paris, France, (2008).
- MCGEE, C.; HILTON A. B. C. **Analysis of federal and state policies and environmental issues for bioethanol production facilities**. *Environmental Science & Technology* 2011;45(5):1780-1791. doi:10.1021/es1014696.
- MANZATTO, C. V.; ASSAD, E. D.; BACA, J. F. M.; ZARONI, M. J.; PEREIRA, S. E. M. (Org.). **Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar** — Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2009. 55 p.: il.
- MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. **Avaliação de Modelos Digitais de Elevação para Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas**. *Revista Brasileira de Cartografia*. no 61/02, p. 137-151, 2009.
- MOREIRA, F.R.; BARBOSA, C.; CÂMARA, G.; ALMEIDA FILHO, R. **Técnicas de inferência geográfica**. In: **Inferência geográfica e suporte à decisão** (Cap. 9). São José dos Campos: INPE, 2001. 49 p.
- NAS (National Academy of Sciences).. **Water implications of biofuels production in the United States**. National Academy Press, Washington, D.C., 2007. Disponível em: [http://books.nap.edu/openbook.php?record\\_id=12039](http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=12039) Acesso: 12 de outubro de 2010).
- RAGAUSKAS A. J.; WILLIAMS C. K.; DAVISON B. H.; BRITOVSEK G.; CAIRNEY J.; ECKERT C. A.; FREDERICK JR. W. J.; HALLETT J. P.; LEAK D. J.; LIOTTA C. L.; MIELENZ J. R.; MURPHY R.; TEMPLER R.; TSCHAPLINSKI T. **The path forward for biofuels and biomaterials**. *Science* v. 311 n. 5760, p. 484–489. 2006.
- RIBEIRO, N. V. **Expansão Sucroalcooleira no Bioma Cerrado: Tendências, Cenários e Impactos**. Goiânia, 2010. 82 f. Tese (Doutorado em Geografia). Instituto de Estudos Socioambientais - Universidade Federal de Goiás
- RIBEIRO, N. V.; FERREIRA, L. G. E FERREIRA, N. C. **Expansão sucroalcooleira no estado de Goiás: uma análise exploratória a partir de dados sócio-econômicos e cartográficos**. *Geografia* (Rio Claro. Impresso), v. 35, p. 331-344, 2010a.
- RIBEIRO, N. V.; FERREIRA, L. G. E FERREIRA, N. C. **Padrões e impactos ambientais da expansão atual do cultivo da cana-de-açúcar: uma proposta para seu ordenamento no bioma Cerrado**. *Ateliê Geográfico*. v. 9 n. 2, p. 99-113, 2015
- RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S.; COSTA, W. L. S. **DINAMICA-EGO: uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE. Artigos, p. 3089-3096. CD-ROM, On-line, 2007.
- BERKA, L. M. S.; MOREIRA, M. A.; DUARTE, V.; ROSA, V. G. C. **Estimativa de Área Plantada com Cana-de-Açúcar em Municípios do Estado de São Paulo por Meio de Imagens de Satélites e Técnicas de Geoprocessamento: Ano Safra 2004/2005**. INPE. São José dos

Campos, 2004. 54 f.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO J. L.; FERREIRA JÚNIOR, L. G. Mapeamento semidetalhado (escala de 1:250.000) da cobertura vegetal antrópica do bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, 153-156pp. 2008.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L.G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 166, p. 113-124, 2010.

SILVA, W. F.; AGUIAR, D. A.; RUDORFF, B. F. T; SUGAWARA. L. M.; AULICINO, T. L. I. N. **Análise da expansão da área cultivada com cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil: safras 2005/2006 a 2008/2009**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2009, Natal - RN. Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São José dos Campos : INPE, 2009. p. 467-474.

SOARES-FILHO, B. S.; ARAÚJO, A.; CERQUEIRA, G. C. DINAMICA – Um software para simulação de dinâmica de paisagens. In:

**II WNPDI - Workshop em Tratamento de Imagens** Belo Horizonte: DCC, 2001. p. 1-5

SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. DINAMICA - a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, v. 154 n. 3. 217-235pp, 2002.

SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G.; ARAÚJO, W. L.; VOLL, E. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. In: ALBERNAZ A. L, SILVA J. M. C., VALERIANO, D. (Org.). **Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais**. Belém: Editora Museu Paraense Emílio Goeldi, 2003. 100p.

WORLDWATCH INSTITUTE.. **Biofuels for transport: global potential and implications for sustainable agriculture and energy for the 21st century**. Worldwatch Institute, Washington, D.C., 2006. Disponível em: <http://www.worldwatch.org/system/files/EBF038.pdf>. Acesso: 12 de outubro de 2010.