

## Validação de modelos estacionário e prescritivo do manejo da cana-de-açúcar para o ano-safra 2010 nas regiões de Jaú e Ribeirão Preto, São Paulo

Maikon Roberth de Novaes <sup>1</sup>

Bernardo Theodor Rudorff <sup>2</sup>

Cláudia Maria de Almeida <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE  
Unidade Estadual do Rio Grande do Norte – Supervisão de Base Territorial  
Av. Prudente de Moraes, 161 – Natal - RN, Brasil  
maikon.novaes@ibge.gov.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{bernardo,almeida}@dsr.inpe.br

**Abstract.** Brazil is the world biggest producer of sugar and ethanol derived from sugarcane. The estimated sugarcane cultivated area lies around 8 million hectares, 60% of which are found within São Paulo state, unevenly scattered throughout its territory. Since 2006, the National Institute for Space Research (INPE), in association with the São Paulo State Secretary for the Environment (SMASP), has been monitoring the pre-harvest burning of sugarcane by means of remotely sensed images. In June 2007, the Sugarcane Industry Association (UNICA) and SMASP signed an Agrienvironmental Protocol, designed to anticipate the end of straw burning in areas with slope under 12% until 2014. Two years later, in 2009, stationary and prescriptive scenarios for the year 2010 were generated for some test areas in São Paulo State, considering the maintenance of the ongoing trend of harvesting practice dynamics in the first case, and a compliance with the Protocol in the second case. The objective of this study is to perform a comparative analysis between the scenarios generated in 2009 and the real expansion of sugarcane tillages and changes in the sugarcane harvesting practices that took place in 2010 for two of such test areas, namely Jaú and Ribeirão Preto, discussing on the observed conformity with the Agrienvironmental Protocol in both cases.

**Palavras-chaves:** sugarcane straw burn, Agrienvironmental Protocol, spatial dynamic modelling, fuzzy similarity index.

### 1. Introdução

No contexto atual, o Brasil encontra-se como o maior produtor de cana-de-açúcar e exportador de açúcar e álcool no mundo. A área de cana cultivada é de quase 8 milhões de hectares, e o estado de São Paulo é responsável por cerca de 60% de toda esta extensão, distribuída de maneira heterogênea pelo território estadual.

O sensoriamento remoto orbital, aliado às técnicas de geoinformação, vem se mostrando como uma importante ferramenta que contribui para o levantamento desses dados de forma objetiva. Estas técnicas permitem identificar o manejo da colheita de cana-de-açúcar em dois tipos: com ou sem a prática da queima da palha na pré-colheita. Sem o uso do fogo, a colheita é feita através de máquinas colheitadeiras. A colheita mecânica ainda é onerosa, mas vem sistematicamente substituindo a colheita manual, que se dá através da prática da queima da palha antes da colheita dos colmos. Esta prática não só facilita, mas viabiliza a colheita manual, embora cause poluição, prejudicando o meio ambiente e a saúde da população residente no entorno.

A extinção da prática da queima da palha está prevista em legislação estadual e, segundo o Protocolo Agroambiental, assinado entre a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) e a Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMASP), os prazos se antecipam para o ano de 2014 para áreas mecanizáveis e 2017 para áreas não mecanizáveis.

Várias ferramentas em geoinformação são utilizadas para mapear e modelar fenômenos espaciais. Entre estas, a simulação de sistemas auxilia no entendimento dos fatores que induzem ao desenvolvimento do fenômeno, bem como permite representar cenários diversos de possibilidades futuras, segundo quadros socioeconômicos, políticos e ambientais diferentes (SOARES FILHO et al., 2001).

Neste sentido, em 2009, foi iniciado um estudo com a finalidade de estimar e espacializar projeções de cenários futuros para a colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo por meio de modelagem dinâmica espacial, visando avaliar a aderência ao Protocolo Agroambiental (SMASP, 2008) e, assim, a possibilidade da extinção da queima da palha da cana-de-açúcar como prática corriqueira da colheita (NOVAES, 2010; NOVAES et al., 2011a). Nesse estudo, foram considerados um modelo estacionário baseado na cadeia de Markov (WOLFRAM, 1983; ALMEIDA et al., 2007) e um segundo, de caráter prescritivo, baseado na indicação de especialistas da área.

Este trabalho tem como objetivo comparar as mudanças de fato ocorridas na colheita da cana a partir dos dados classificados pelo projeto CANASAT para o ano-safra de 2010 e validar os mapas obtidos por simulação em 2009 para o mesmo ano-safra, utilizando o índice de similaridade *fuzzy* em um contexto de vizinhança local, com base no método de Hagen (2003) implementado de forma adaptada na plataforma DINAMICA EGO. Além disso, este trabalho busca avaliar a aderência ao Protocolo Agroambiental, comparando a situação real em 2010 das regiões de Jaú e Ribeirão Preto às projeções realizadas segundo os modelos estacionário e prescritivo, mencionados anteriormente (NOVAES, 2010; NOVAES et al., 2011a).

## 2. Metodologia

### 2.1. Área de Estudo

Foram selecionadas duas regiões de estudo (Figura 1) para este trabalho, que possuem padrões de manejo da cana bem distintos, segundo metodologia de análise espacial realizada por NOVAES et al. (2011b).

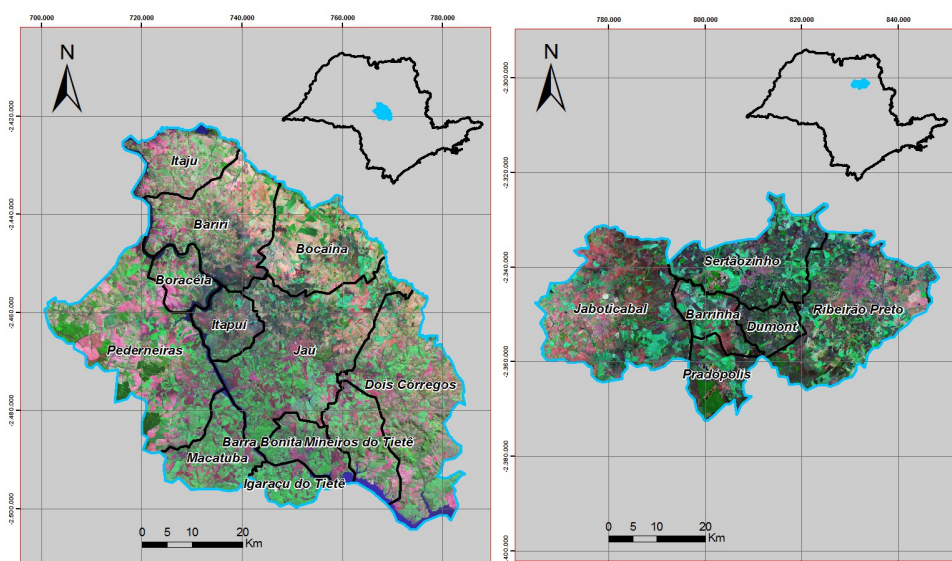


Figura 1. Localização das áreas de estudo.

A região 1 está localizada entre os paralelos 22° 56' 11,00" e 21° 34' 27,00" sul e os meridianos 49° 20' 30,00" e 47° 57' 20,00" oeste e comporta os municípios de Bariri, Barra Bonita, Bocaina, Boracéia, Dois Córregos, Igaracú do Tietê, Itaju, Itapuí, Jaú, Macatuba, Mineiros do Tietê e Pederneiras. Esta região situa-se na porção leste da Região

Administrativa de Bauru e trata-se de uma área bastante consolidada, porém, conservadora diante do Protocolo Agroambiental. Jaú, em 2006, foi o 5º maior produtor de cana-de-açúcar do estado; contudo, o manejo da colheita costuma ser realizado com o uso do fogo e, no ano de 2009, foi queimada cerca de 90% da área (CANASAT, 2009).

A região 2 está localizada entre os paralelos 21° 45' 54,60" e 20° 37' 49,19" sul e os meridianos 48° 45' 53,02" e 47° 18' 48,32" oeste e abrange os municípios de Barrinha, Dumont, Jaboticabal, Pradópolis, Ribeirão Preto e Sertãozinho. Esta região situa-se na porção centro-oeste da Região Administrativa de Ribeirão Preto e se destaca pela consolidação na plantação canavieira, produtividade e intensa mecanização nos últimos anos.

## 2.2. Material

Foi elaborado um banco de dados espacial construído na plataforma SPRING 4.3.3, contendo dois diferentes projetos, correspondendo às duas regiões de estudo. Os dados originais utilizados nesta pesquisa são oriundos de classificação supervisionada e não-supervisionada e trabalhos de campo, fruto do monitoramento realizado pelo projeto CANASAT referente à colheita do anos-safras de 2008 e 2010. A razão de se utilizar um dado de período anterior é a necessidade de calcular a matriz de transição de classes para o período observado. Os projetos foram criados utilizando sistema de projeção UTM, Fuso 22s – datum WGS-84, devido à facilidade de manipulação dos dados, cálculo de área e inserção dos mapas de cobertura e uso na plataforma de modelagem. O dado classificado é do tipo matricial, com resolução de 30 m, e possui as classes de cana-crua (sem o uso do fogo), cana-queima (com o uso do fogo), além da cana-bisada (cana não-colhida até o final da época de colheita). Além desse conjunto principal de dados, foram também utilizadas bases vetoriais para compor o grupo de classes e variáveis de entrada no modelo. Todos os dados utilizados estão apresentados na Tabela 1, com seus respectivos sistemas de projeção, datum e fonte de origem.

Tabela 1 - Base de dados utilizada nos projetos.

<i>Base de Dados</i>	<i>Sist. de Projeção</i>	<i>Datum</i>	<i>Fonte</i>	<i>Representação</i>
Malha municipal do Brasil 2010 - 1:250.000	Policônica	SAD69	IBGE (2008)	rial
Hidrografia	Policônica	SAD69	DER (2001)	Vetorial
Unidades de Conservação estaduais	UTM - 23s	SAD69	MMA (2009)	Vetorial
Áreas urbanas em São Paulo	Policônica	SAD69	Pereira et al. (2006)	Vetorial
Mapa classificado da colheita (SP) - 2006	Policônica	SAD69	Aguiar et al. (2007)	Matricial
Mapa classificado da colheita (SP) - 2008	Policônica	SAD69	Aguiar et al. (2009)	Matricial
Mapa classificado da colheita (SP) - 2010	Policônica	SAD69	Aguiar et al. (2011)	Matricial

Mapas de uso e cobertura inicial e final foram confeccionados para os anos 2008 e 2010, ambos com um *buffer* de 15 km, a fim de não provocar efeito de borda durante a etapa de simulação. As classes de cana no início (2008) e no final (2010) foram: Cc (cana-crua), Cq (cana-queima), Cb (cana bisada) e não-cana. As classes que não sofreram alteração entre o período inicial e final foram: áreas urbanizadas, hidrografia e unidades de conservação. Estas classes foram inseridas nos mapas por exercerem restrição real à expansão e mudança de colheita das lavouras de cana. As áreas urbanizadas foram consideradas estáveis para efeito de simplificação do modelo e por não serem foco de análise desta pesquisa.

Os mapas de uso e cobertura da terra foram construídos na plataforma SPRING 4.3.3, e o modelo de validação encontra-se implementado na plataforma DINAMICA EGO 1.8.9 64 bits (SOARES FILHO et al., 2008).

## 2.3. Métodos

### 2.3.1 Cálculo dos Percentuais de Transição

Os mapas simulados aqui citados estão descritos em Novaes (2010) e Novaes et al. (2011). Primeiramente, foi realizado o cálculo de percentual de mudanças globais oriundo das transições entre as classes de cobertura e uso da terra observadas. Esse cálculo ocorre após uma tabulação cruzada entre o mapa referente ao ano final (2010) e o ano inicial (2008), gerando matrizes de transição que indicam o percentual de mudança no período analisado.

Neste trabalho, o modelo adotado para a quantificação de mudanças de uso e cobertura da terra é baseado na cadeia de Markov. Este modelo descreve certo tipo de processo, que se move em uma sequência de passos e através de um conjunto de estados<sup>1</sup>. A vantagem no uso da cadeia de Markov reside na possibilidade de seus parâmetros serem facilmente estimados estatisticamente, a partir de uma amostra de transições ocorridas durante algum intervalo de tempo. Devido à sua simplicidade, é requerida apenas a definição de um número finito de estados e o conhecimento das probabilidades de transição. Todavia, supõe-se que a probabilidade de um conjunto particular de saídas depende unicamente da distribuição atual entre os estados e das probabilidades de transição, além de considerar que a matriz de transição relativa ao fenômeno estudado é estacionária, o que nem sempre ocorre nos processos ambientais dinâmicos.

O percentual de mudança de uso e cobertura da terra pode ser calculado por uma matriz de transição, em que se determina o quanto muda em determinada classe em um período de tempo específico. A seleção das duas regiões permitiu calcular as matrizes de transição para o período anterior, correspondente aos anos de 2006 a 2008, a fim de verificar o comportamento de mudança quanto às classes de cana bisada (Cb), cana queima (Cq) e cana crua (Cc). Uma classe chamada não-cana foi criada para abarcar todos os outros tipos de uso ou cobertura da terra. Ela ainda pode conter áreas de cana em reforma, que são áreas onde são plantadas outras culturas entre períodos de cultivo da cana, com a finalidade de evitar o desgaste do solo. De posse da matriz de transição no período de 2006 a 2008, o vetor de percentual de uso de cada classe foi multiplicado pela matriz de transições em passos iguais de dois anos, a fim de obter um vetor com percentuais de uso nos anos de prognósticos (2010, 2012 e 2014).

### 2.3.2 – Validação do Mapa Simulado

Para a avaliação de um modelo, é necessária a comparação do mapa final simulado com um mapa referência, através de técnicas que irão quantificar o grau de semelhança entre ambos. Uma forma de aplicação é através de medidas de similaridade *fuzzy* em um contexto de vizinhança local. Entre diversos métodos que visam avaliar a similaridade de padrões espaciais, pode-se citar o método de Hagen (2003), que se baseia no conceito de incerteza de localização ou *fuzziness of location*, implementado de forma adaptada na plataforma DINAMICA EGO 1.8.9 (Figura 2).

---

1 Para mais detalhes sobre a cadeia de Markov, consultar Baker (1989) e Almeida (2004).

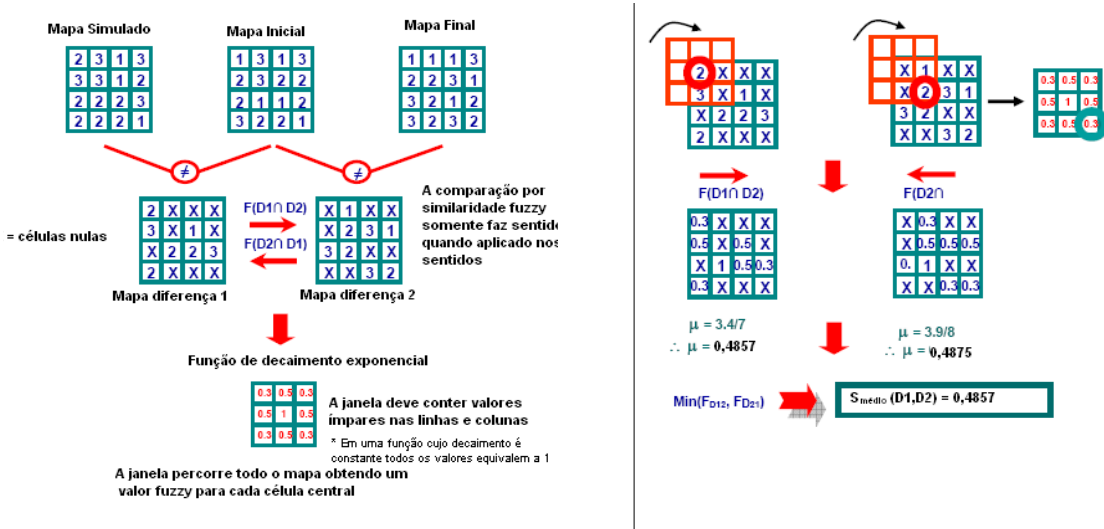


Figura 2. Esquema ilustrativo do método de Hagen (*fuzziness of location*), utilizando decaimento exponencial. Fonte: Soares Filho et al. (2008).

Neste método, a representação de uma célula é influenciada por ela mesma e, em menor magnitude, pelas células na sua vizinhança, em janelas de tamanhos variados de 1x1 até 13x13 pixels (SOARES FILHO et al., 2008). Neste trabalho, foram consideradas janelas de 3x3 a 11x11 pixels.

A validação, neste caso, colabora para que sejam feitos ajustes nos parâmetros das funções *expander* e *patcher*, até que o padrão espacial do mapa simulado esteja o mais próximo possível ao padrão observado no mapa real de 2008. Índices de similaridade obtidos com decaimento exponencial próximos a 0,4 indicam um nível bom de compatibilidade entre o cenário simulado e o real. Um modelo devidamente ajustado serviu de parâmetro para a construção de cenários futuros.

### 2.3.3 Análise da Aderência ao Protocolo Agroambiental

A aderência ao Protocolo Agroambiental de uma determinada região reflete o percentual de área colhida sem queima (cana-crua) de toda a área colhida no ano-safra observado. A partir da matriz de transição para o período de calibração (2006-2008), obtiveram-se novos percentuais para os anos seguintes, tanto para o modelo estacionário (baseado na cadeia de Markov) quanto para o modelo prescritivo (elaborado por analistas). Em 2010, foi comparado o grau de observância ao Protocolo para ambos os modelos, em face do percentual de cana-crua identificado nas duas regiões de estudo.

## 3. Resultados e Discussões

### 3.1 Comparação entre as Classes de Uso e Cobertura da Terra

A partir das matrizes de transição calculadas, foi obtida a quantidade total de área de classes, em hectares, que se modificaram no período de 2006 a 2010 em intervalos de dois anos. Vale ressaltar que o total de áreas é referente ao limite da região de estudo, isto é, não foi contabilizada a área do *buffer* de 15 km.

A Figura 3 ilustra a comparação dos resultados obtidos pelos modelos estacionário e prescritivo (NOVAES, 2010; NOVAES et al., 2011a) face ao mapa classificado real. Os dados de 2006 e 2008 se referem à classificação da colheita em todos os gráficos, e sendo assim, a comparação é realizada apenas para o ano de 2010. Para ambas as regiões, o modelo estacionário se mostrou mais eficiente e compatível com a realidade. Por outro lado, o modelo estacionário não conseguiu reproduzir a quantidade de cana não colhida (cana-bisada), pois esta classe foi afetada por um efeito anômalo de excesso de chuvas no ano de

2008, o que comprometeu a calibração do modelo na região 1. O mesmo não ocorreu na região 2.

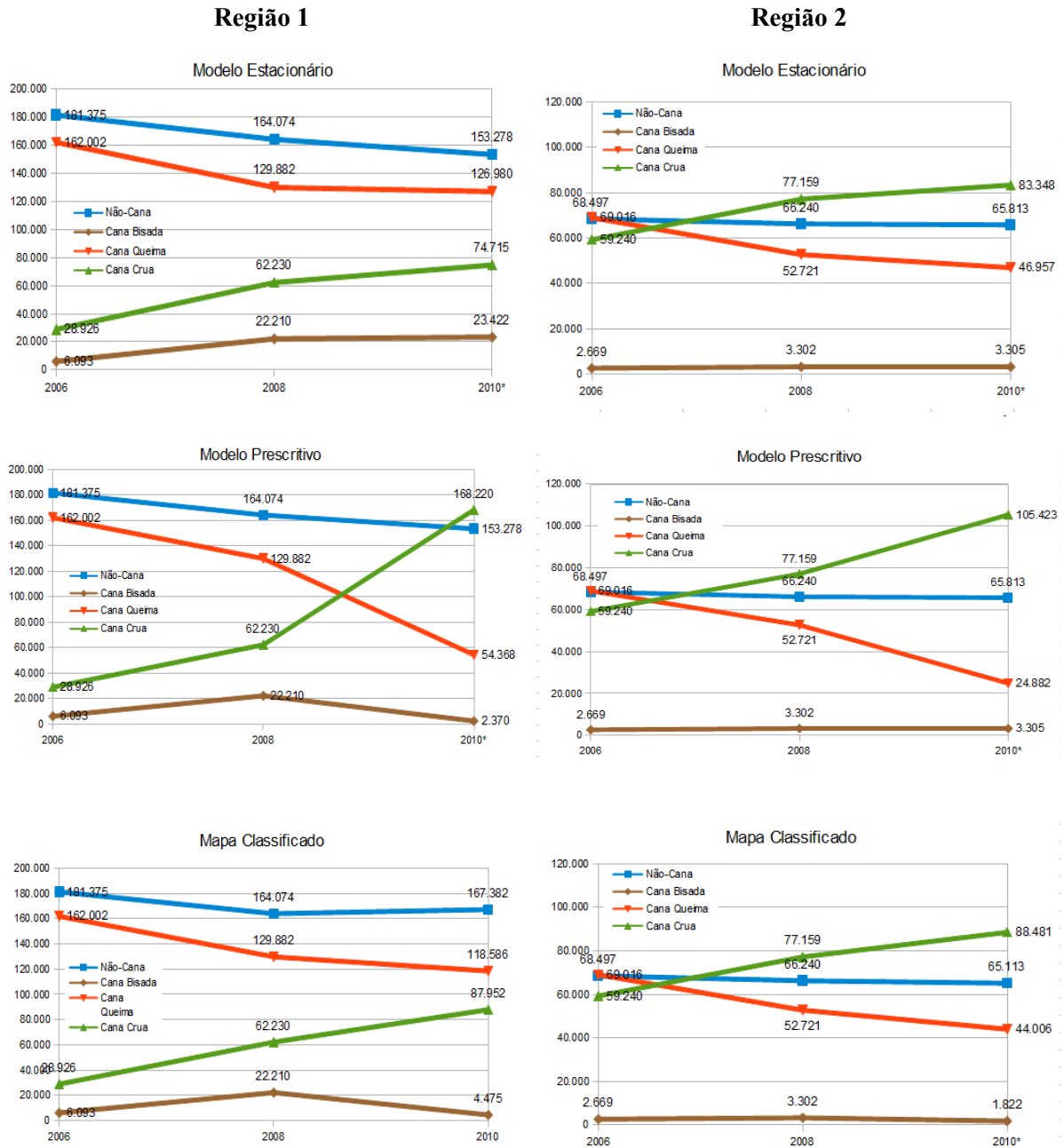


Figura 3. Comparação dos modelos estacionário e prescritivo ao mapa classificado.

### 3.2 Resultado da Validação por Similaridade Fuzzy

Os mapas simulados gerados para cada uma das regiões de estudo a partir das matrizes de transição de classes correspondem a um resultado aleatório (dada a natureza randômica dos algoritmos de transição), balizado pelos parâmetros inseridos na plataforma de modelagem, os quais definem quanto e de que forma as células de cada classe irão transicionar, isto é, com que dimensões, se mais por expansão ou por difusão e se de modo mais compacto ou dendrítico. A validação por decaimento exponencial na plataforma Dinamica EGO opera de forma adaptada, isto é, não considera a comparação direta entre o mapa simulado e o mapa final real, mas sim entre os mapas-diferença, resultantes da subtração entre o mapa inicial real e o mapa final real, e entre o mapa inicial real e o mapa final simulado. Esse método de

validação penaliza o ajuste em função do distanciamento da célula contendo a classe avaliada em relação à célula central da janela de amostragem.

Obviamente, a avaliação visual deve ser considerada, visto que os padrões de distribuição espacial e morfológicos das áreas de cana não são avaliados pelo índice de similaridade *fuzzy*. Os valores em torno de 0,40 para janelas de tamanho 11x11 podem ser considerados satisfatórios (Tabela 2), visto que o índice de similaridade *fuzzy* adaptado para operar com os mapas-diferença é extremamente rigoroso. No entanto, o fenômeno aleatório da cana-bisada ocorrido em 2008 aponta para a necessidade de uma nova calibração a partir dos dados de 2010.

**Tabela 2 – Resultado da validação do mapa simulado a) Região 1; b) Região 2.**

a) Região 1			b) Região 2		
VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL			VALIDAÇÃO COM DECAIMENTO EXPONENCIAL		
Janela	Max	Min	Janela	Max	Min
3 x 3	0,287	0,209	3 x 3	0,290	0,237
5 x 5	0,299	0,219	5 x 5	0,307	0,250
7 x 7	0,306	0,227	7 x 7	0,318	0,258
9 x 9	0,311	0,231	9 x 9	0,325	0,264
11 x 11	0,314	0,235	11 x 11	0,330	0,267

### 3.3 Análise da Aderência ao Protocolo Agroambiental

Analisando o grau de aderência das duas regiões, observamos que o modelo prescritivo superestimou demasiadamente a mudança da prática na colheita, enquanto o modelo estacionário se aproximou mais da realidade no ano de 2010, ainda que com uma ligeira subestimação (Figura 4). O modelo estacionário, portanto, contribui mais fielmente para avaliar o cumprimento do Protocolo Agroambiental nestas duas regiões de estudo em anos futuros.

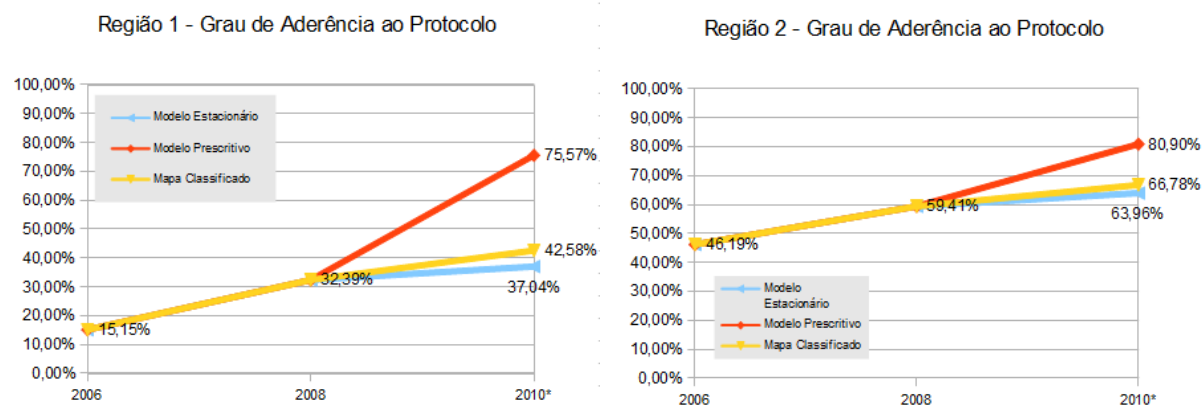


Figura 4. Aderência ao Protocolo Agroambiental segundo a realidade e os modelos estudados.

### 4. Conclusões

A validação realizada aponta que o modelo estacionário, baseado na cadeia de Markov, se mostrou mais satisfatório que o modelo prescritivo face ao mapa classificado do ano-safra de 2010.

O mapa simulado de 2010, parametrizado pelo método bayesiano de pesos de evidência, obteve resultados aceitáveis pelo método de validação multirresolução com decaimento exponencial (*fuzziness of location*), embora seja recomendável uma nova calibração com o mapa de 2010, para fins de supressão do efeito anômalo excessivo de cana-bisada em 2008.

O modelo estacionário foi o que mais se aproximou da realidade da colheita em 2010, sendo o mais indicado para estimar tendências futuras de aderência ao Protocolo Agroambiental para estas regiões de estudo. Recomenda-se realizar estes procedimentos para os demais municípios do estado de São Paulo.

### Referências Bibliográficas

Almeida, C. M.; Gleriani, J. M. Redes Neurais e Autômatos Celulares como uma Plataforma para a Simulação de Mudanças do Uso do Solo Urbano. In: ALMEIDA, Cláudia Maria de; CÂMARA, Gilberto; MONTEIRO, Antonio Miguel Vieira (Ed.). **Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual**. São José dos Campos, SP: Digital Press, 2007. p. 300-323. ISBN 9788586238550. (INPE--/). Disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m12@80/2007/05.09.13.44>>. Acesso em: 23 abr. 2010.

Almeida, C. M. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil**. 2003. 321 p. (INPE-10567-TDI/942/A). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003. Disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/12.18.07.29>>. Acesso em: 23 abr. 2010.

Baker, W. L. A review of models of landscape change. **Landscape Ecology**, v. 2, n. 2, p. 111-133, 1989.

Bonham-carter, G. F. **Geographic Information Systems for geoscientists: modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994, 305 p.

CANASAT, 2009. Disponível em: [www.inpe.br/CANASAT](http://www.inpe.br/CANASAT) (acesso em janeiro de 2009)

Hagen, A. Multi-method assessment of map similarity. In: 5th AGILE Conference on Geographic Information Science, Palma, Spain. **Anais...** Palma: Universitat de les Illes Balears, 2003. p. 171-182.

Novaes, M. R. Análise da redução da queima na colheita da cana-de-açúcar por meio de modelagem dinâmica espacial. 2010. 153 p. (INPE-16696-TDI/1640). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2010. Disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/02.25.12.38>>. Acesso em: 22 set. 2012.

Novaes, M. R.; Almeida, C. M.; Rudorff, B. F. T.; Aguiar, D.A.. Cenários prognósticos baseados em modelagem dinâmica espacial para o manejo da colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba. Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, 2011a.

Novaes, M. R. ; Rudorff, B. F. T ; Almeida, C. M. de ; Aguiar, D. A.. Análise espacial da redução da queima na colheita da cana-de-açúcar: perspectivas futuras ao cumprimento do Protocolo Agroambiental. Engenharia Agrícola (Impresso), v. 31, p. 572-583, 2011b.

Soares Filho, B. S.; Assunção, R. M.; Pantuzzo, A. E. Modeling the spatial transition probabilities of landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **BioScience**, v. 51, n. 12, p. 1059-1067, 2001.

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, p. 217-235, 2002.

Soares Filho, B. S.; Rodrigues, H. O.; Falieri, A.; Costa, W. L. **DINAMICA EGO Tutorial**. Belo Horizonte. CSR-UFMG. 2008.

Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMASP). **Protocolo Agroambiental**. São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/cana/protocolo.pdf> . Acesso em dezembro de 2008.

Wolfram, S. Statistical mechanics of cellular automata. **Review of Modern Physics**, v. 55, p. 601-643, 1983.