

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/5: 965-978
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MODELAGEM DINÂMICA DA MUDANÇA DO USO E COBERTURA DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL A PARTIR DE IMAGENS MODIS E UM MODELO DE SUB-REGIÕES

Dynamic Modeling of Land-Cover Change in Paraíba do Sul River Basin from MODIS Images and a Subregions Model

**Marcel Pereira de Andrade¹, Celso Bandeira de Melo Ribeiro¹
& Ricardo Neves de Souza Lima²**

¹Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF
Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária
CEP: 36036-900 - Juiz de Fora - MG, Brasil
marcel.pdandrade@gmail.com, celso.bandeira@ufjf.edu.br

²Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
Centro de Documentação e Disseminação de Informações - CDDI
CEP: 20271-205 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil
ricneves80@yahoo.com.br

Recebido em 6 de Setembro, 2015/ Aceito em 6 de Abril, 2016
Received on September 6, 2015/ Accepted on April 6, 2016

RESUMO

Alterações ocorridas na paisagem natural devido ao desenvolvimento de atividades antrópicas como urbanização, expansão agrícola e desmatamento sobre uma bacia hidrográfica, exercem influência nos processos referentes ao ciclo hidrológico. Com isso, o presente estudo destinou-se a entender as mudanças no uso e cobertura do solo, sobretudo em áreas de floresta, gerando uma projeção futura para a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, importante manancial para o abastecimento de água de municípios dos Estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais. A simulação da mudança no uso e cobertura do solo foi realizada para o período de 2013 a 2023, através de um modelo de sub-regiões no Dinamica EGO. Como sub-regiões foi utilizado o mapa das sub-bacias, da área em estudo, e os mapas de uso e ocupação do solo utilizados foram os do produto MODIS *Land Cover Type 1*. Após a simulação foram avaliadas as alterações das áreas do uso do solo por sub-bacias para cada ano do período de 2001 a 2023. Os resultados obtidos mostraram que as maiores taxas de transições, em geral, foram dadas pela perda de floresta para pasto e agricultura. Destacou-se também o resultado das bacias dos rios Pomba e Muriaé por possuírem, respectivamente, as maiores áreas de pasto em comparação com as outras sub-bacias e que a curva da área desta classe é crescente de 2001 a 2023. Concluiu-se que o desempenho do modelo de sub-regiões utilizado foi satisfatório e que as análises construídas, neste estudo, podem auxiliar no planejamento e na gestão dos recursos hídricos, na região da bacia do Rio Paraíba do Sul.

Palavras chaves: Sensoriamento Remoto, Simulação de Cenários, Recursos Hídricos, Cobertura do Solo, Dinâmica EGO.

ABSTRACT

Changes in the natural landscape due to the development of human activities such as urbanization, agricultural expansion and deforestation on a watershed, influence in the processes related to the hydrological cycle. Thus, the present study was designed to understand the changes in land use and land cover, especially in forest areas, generating a future projection for the basin of the Paraíba do Sul River, an important source for the water supply of cities of State of Rio de Janeiro, São Paulo and Minas Gerais. The simulation of the change in land use and cover was carried out for the period 2013-2023, through a model of sub-regions in Dinamica EGO. As sub-regions used the map of the sub-basins of the study area, and the use of maps and land cover used were those of the MODIS Land Cover Type 1. Product After the simulation were evaluated changes in areas of use soil by sub-basins for each year from 2001 to 2023. Os results showed that the highest rates of transitions in general were given the loss of forest to pasture and agriculture. It was emphasized also the result of the basins of the Dove and Muriaé rivers by having, respectively, the largest areas of pasture in comparison to the other sub-basins and the curve of the area of this class is increasing from 2001 to 2023. It was concluded that the performance of the sub-regions model used was satisfactory and that the analyzes built in this study may help in the planning and management of water resources, in the Paraíba do Sul River basin region.

Keywords: Remote Sensing, Simulation of Scenarios, Water Resource, Land Cover, Dinamica EGO.

1. INTRODUÇÃO

Em 1997 foi implementada no Brasil a Lei 9.433 que instituiu, dentre outros fundamentos, que a gestão de recursos hídricos teria como unidades de planejamento as bacias hidrográficas, que são áreas de grande importância econômica, social e ambiental. Contudo, um dos principais problemas que interferem diretamente na qualidade e quantidade de água de uma bacia hidrográfica é o uso que se dá a sua superfície territorial. São sobre estas áreas tão importantes que se desenvolvem e encontram-se as regiões urbanizadas, as indústrias, a agricultura e entre outras atividades humanas (PORTO, 2008).

Dentro desta ótica, alguns autores (DENG *et al.*, 2015; FAN, 2015; GYAWALI *et al.*, 2013; NUGROHO *et al.*, 2013; SOUZA, 2014; ZHU, 2014) salientam que as alterações ocorridas na paisagem devido ao desenvolvimento de atividades, como urbanização e expansão agrícola, sobre uma bacia hidrográfica exercem influência nos processos referentes ao ciclo hidrológico, como: infiltração, evapotranspiração, escoamento e na recarga dos corpos d'água, ou seja, na quantidade disponível de água e também na qualidade da água.

Atualmente, com os grandes e constantes avanços das técnicas de sensoriamento remoto, dos sistemas de informações geográficas (SIG) e dos modelos matemáticos, tornou-se factível obter, analisar, gerar projeções futuras e identificar as mudanças do uso e ocupação do solo (WANG, 2013). Desta forma, tais técnicas e seus respectivos produtos vem sendo de grande valia para gestão de recursos hídricos e nas suas tomadas de decisões

(COLDITZ *et al.*, 2012; BARROS *et al.*, 2013, HONG, 2011).

Recentemente tem-se observado estudos, em âmbito nacional, que utilizam técnicas de sensoriamento remoto em conjunto com o sistema Dinâmica EGO, o qual utiliza modelos matemáticos para modelar a paisagem. Dias *et al.* (2013) aplicaram tais ferramentas para estudar a dinâmica da paisagem na bacia hidrográfica do Lago Paranoá – DF, onde constataram que as maiores taxas de perda de áreas de reflorestamento ocorreram devido à expansão da agricultura, entre o período de 1998-2009. Neste mesmo trabalho Dias *et al.* (2013) exaltam o desempenho do Dinamica EGO como uma excelente ferramenta de modelagem de paisagens.

Fushita (2015) observou em seu estudo que no mapa final da simulação, no freeware Dinamica EGO, para o período de 1999 a 2049 na bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu (SP) 75% da área da mesma foi preenchida por atividades antrópicas. Outro estudo é o do Molin (2014), que também utilizou o Dinamica EGO acrescido do *software* SWAT, sendo este um modelo hidrológico, com o intuito de compreender os efeitos das alterações da vegetação nativa sobre o ecossistema da bacia hidrográfica do rio Piracicaba, no estado de São Paulo. Molin (2014) projetou 3 cenários diferentes: estado atual, sem desmatamento e com restauração de mata ciliar, até 2050 para esta bacia. Os resultados oriundos da simulação da paisagem feita do Dinamica EGO mostraram perda de pequenas manchas de floresta no cenário *status quo*. Contudo para os outros dois

cenários as áreas de cobertura vegetal tendem a aumentar gerando manchas maiores.

Mediante o período de escassez hídrica, vivenciado pela região sudeste nos últimos anos, o presente trabalho tem como objetivo estudar a evolução temporal do uso do solo na bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, importante manancial para abastecimento de municípios dos Estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais, sob a ótica do gerenciamento dos recursos hídricos.

Sendo assim, aplicou-se técnicas de sensoriamento remoto e modelagem dinâmica em imagens do produto MODIS na bacia, sobretudo em áreas de vegetação, para obter as taxas de alterações anuais, na primeira década do Séc. XXI, das principais classes do uso do solo, para posteriormente realizar uma predição futura da ocupação do solo para a década subsequente. Esse processo metodológico gera dados espaciais que podem ser utilizados em modelos de chuva-vazão, para simular o comportamento hídrico na bacia e auxiliar diversos setores, tais como: energia, abastecimento público de água, economia, ambiental, dentre outros.

2. MATERIAIS E MÉTODO

Neste tópico foram abordados os assuntos referentes à caracterização da área de estudo, à aquisição de dados e aos fundamentos teóricos envolvendo a modelagem dinâmica do uso do solo.

2.1 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, representada pela Figura 1 está situada na região sudeste entre as latitudes 20°26'S e 23°38'S e as longitudes 41°00'O e 46°25'O, possui uma área de drenagem de aproximadamente 62.074 km². Ela contempla, de forma integral ou parcial, 39 municípios no estado São Paulo, 57 no estado Rio de Janeiro e 88 no estado de Minas Gerais, contabilizando um total de 184 municípios (AGEVAP, 2012 e INEA, 2014).

A região compreendida pela bacia possui uma alta densidade populacional (cerca de 17.634.301 habitantes), uma intensa industrialização, diversas usinas hidrelétricas e transposição para o Rio Guandu, que contribui para geração energia elétrica e para o abastecimento da região metropolitana do Rio de Janeiro e suas proximidades (AGEVAP, 2012 e INEA, 2014).

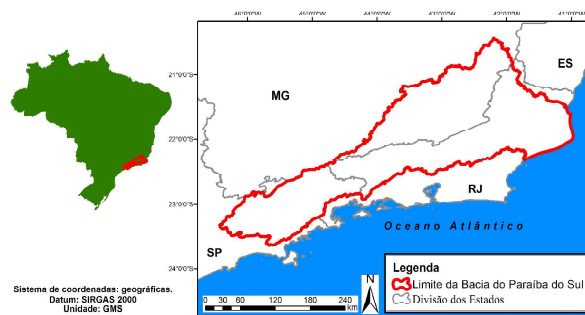


Fig. 1 - Limite atual da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

Andrade *et al.* (2015) calcularam, a partir do produto MODIS *Land cover Type 1*, as áreas de 13 tipos diferentes de uso do solo da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Onde constataram que a bacia teve como cobertura do solo predominante as áreas de pastagem, que entre os anos de 2001 a 2012 correspondeu a valores próximos de 60% da área total da bacia. Segundo esses mesmos autores os remanescentes florestais e vegetação secundária ocuparam, neste mesmo período de tempo, uma área próxima a 12% da bacia. Mesmo que possuindo uma área reduzida de floresta, das quais estão restritas basicamente a unidades de conservação, a bacia do Paraíba do Sul é uma área que ainda sofre com queimadas, desmatamento (AGEVAP, 2014).

2.2 Aquisição de Dados

Neste estudo, foram utilizadas imagens do produto MODIS *Land Cover type 1*, referente ao período de 2001 a 2012. Destas, apenas as imagens de 2001, 2011 e 2012 foram utilizadas na modelagem do uso e ocupação do solo, sendo as demais imagens utilizadas para análise das áreas anuais das classes do uso do solo.

As imagens *Land Cover type 1* possuem resolução espacial de 500 m e foram classificadas em 17 classes de uso e cobertura do solo pelo IGBP (*International Geosphere Biosphere Programme*).

Para preparar as imagens utilizou-se o software MODIS *Reprojection Tool*, com o intuito de convertera-las do formato HDF para GeoTIFF, definir a projeção e fazer o mosaico das cenas.

Posteriormente, utilizou-se um modelo no Dinamica EGO com objetivo de agrupar algumas classes definidas pelo IGBP, pois quanto maior o número de classes maior será a

complexidade do modelo (BATTY *et al.* 1999). O critério para a reclassificação das imagens teve como base a junção de classes que possuem características semelhantes, para isso utilizou-se o documento *MODIS Land Cover Product Algorithm Theoretical Basis Documente (ATBD) Version 5.0*, o qual descreve as características das 17 classes. O resultado desta reclassificação se encontra na tabela 1.

Tabela 1: Reclassificação das imagens *land cover type1*

RECLASSIFICAÇÃO	CÓDIGO	CLASSES ORIGINAIS
Água	0	0
		11
		15
Floresta	2	1
		2
		3
		4
		5
		6
Pasto	9	7
		8
		9
		10
		16
Agricultura	12	12
		14
Área urbana	13	13

2.3 Modelagem com o Dinamica EGO

Abordaremos neste tópico os assuntos que envolvem o uso do software Dinamica EGO.

2.3.1 Automato Celular

Em 1982, o matemático John Conway apresentou o “Jogo da Vida”, um filtro que busca determinar a ocorrência de vida ou morte. O exemplo publicado por Conway teve grande importância para o crescimento do conceito de autômatos celulares (AC), que foi criado por John Von Neumann. O “Jogo da Vida” consiste em uma grade de células, onde se tem células no

estado vivo e morto de forma aleatória. Sendo que a mudança de estado de cada célula depende do estado de suas quatro células vizinhas, por exemplo uma célula viva mudará para o estado morto se houver duas ou três células vizinhas mortas, por outro lado, uma célula morta muda para o estado vivo se três das células vizinhas estiverem vivas. (PEDROSA *et al.*, 2001; SOARES-FILHO *et al.*, 2007; ALMEIDA 2004; LIU, 2015).

Nota-se que nos últimos anos houve uma crescente utilização dos conceitos de autômatos celulares (AC) em diversas áreas devido a sua facilidade de implementação. Um exemplo de aplicação são os modelos dinâmicos de paisagem como o Dinamica EGO (SOARES-FILHO *et al.*, 2007).

Para que se possa entender melhor o funcionamento dos autômatos celulares (AC) é mostrado na Figura 2 um exemplo elaborado por Câmara (1996). Neste exemplo, existem dois tipos de estados possíveis para uma célula: branco e preto; e sua vizinhança é formada por duas células. Neste processo, o estado de uma célula no instante $t+1$ será igual ao estado de sua vizinhança no instante t , caso contrário, a célula permanece no mesmo estado. Por exemplo, a transição do estado branco para o preto só ocorrerá, no instante $t+1$, se sua célula vizinha superior e à direita forem pretas no instante t .

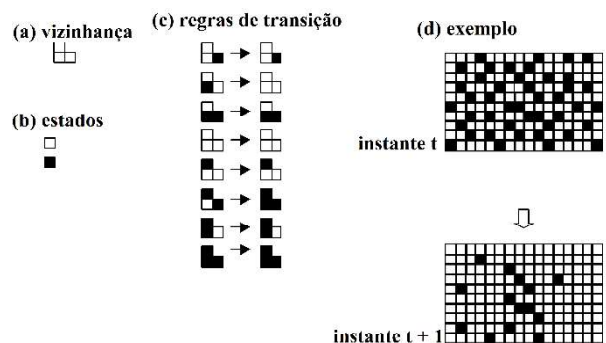


Fig. 2 - Exemplo de autômato celular. Fonte: Câmara, 1996.

2.3.2 Dinamica EGO

O Dinamica EGO é um *freeware* desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais. Seu núcleo, responsável pela criação e execução do modelo, é escrito em C++ e sua interface gráfica é escrita em *java* (RODRIGUES

et al., 2007; NTI, 2013). O Dinamica é baseado em autômato celular, no qual cada célula depende do seu estado inicial e de um conjunto de regras de transição que norteará sua mudança, dependendo do conjunto específico de células em sua vizinhança, sendo então todas as células atualizadas de forma conjunta em espaços discretos de tempo (SOARES-FILHO et al., 2007; NTI, 2013).

Neste trabalho foi utilizado um modelo de sub-regiões, que consiste em dividir os mapas para que se possa processá-los separadamente e, em seguida, os resultados são recombinados. Portanto, este modelo oferece um domínio sobre a simulação, sendo possível definir operações, parâmetros e coeficientes para cada tipo de região diferente, o que leva a resultados mais próximos do real, pois cada região possui características distintas e que podem influenciar em uma dada transição $i \rightarrow j$ (SOARES-FILHO et al., 2009).

Foi escolhido, para gerar o mapa de sub-regiões, o dado vetorial das sub-bacias, da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Este *shapefile* que continha a divisão das sub-bacias foi obtido no site da Agência Nacional de Águas (ANA).

O processamento desse dado se deu no *software* ArcGIS 10.0 e foi exportado para o formato *Raster* com resolução espacial de 500m, com a mesma extensão e com o mesmo número de colunas e linhas dos mapas MODIS, visando compatibilizar todos os mapas a serem processados. O mapa final das sub-regiões pode ser observado na Figura 3.

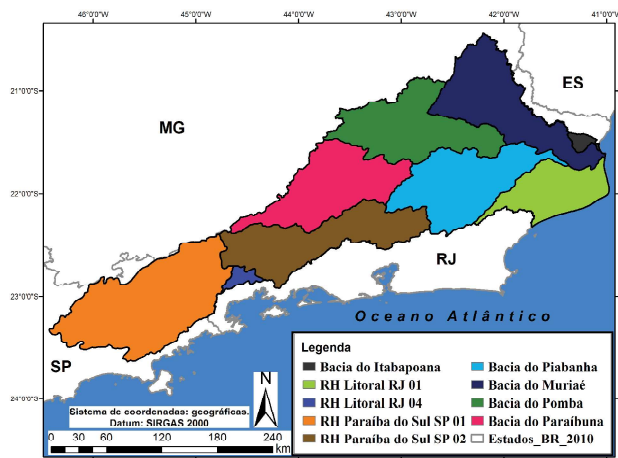


Fig. 3 - Mapa das sub-bacias e regiões hidrográficas contidas dentro do limite da bacia do rio Paraíba do Sul. (Obs: RH= Região hidrográfica).

As etapas para construção de um modelo de simulação do uso do solo por meio de sub-regiões na plataforma Dinamica EGO, estão sintetizadas na Figura 4. Como etapa inicial temos a entrada de dois mapas, T_0 (imagem do ano 2001) e T_1 (imagem do ano 2011) para o cálculo das matrizes de transição (cubo em azul).

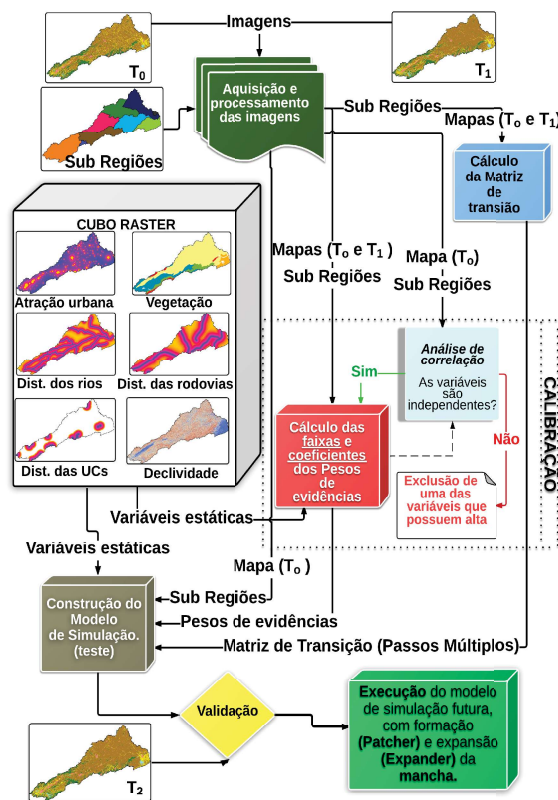


Fig. 4 - Fluxograma do modelo de sub-regiões

O cálculo das matrizes de transição é feito por meio de tabulação cruzada, de modo a quantificar e detectar as mudanças no uso do solo para o período analisado. Como resultado são geradas matrizes globais, que para fins de se projetar em uma maior escala temporal, faz-se necessário a conversão destas matrizes em matrizes anuais (*multiple step*), através da propriedade de matrizes ergódicas, equação (1).

$$P \frac{1}{t} = H V \frac{1}{t} H^{-1} \quad (1)$$

onde P é a matriz anual, H e V são seus auto-vetores e autovalores e t o período de tempo analisado. (SOARES-FILHO et al., 2007; SOARES-FILHO et al., 2002). As matrizes nesta etapa do modelo são calculadas para cada sub-região.

Para que se possa prosseguir com a construção do modelo é preciso construir um cubo raster, o qual é formado por mapas de variáveis estáticas. Estes mapas são utilizados na etapa de calibração e ajudaram o modelo a entender onde ocorrerão as transições calculadas pela equação (1).

Os mapas utilizados neste trabalho foram gerados a partir dos *softwares* ArcGIS 10.0 e Dinamica EGO. Através de arquivos vetoriais obtidos em órgãos como IBGE e ANA, gerou-se mapas como os de vegetação, distância dos principais rios, distância das principais rodovias, distância do centro das unidades de conservações (UCs federais, estaduais e municipais). Por último, a partir de um mapa criado no ArcGIS com pontos que caracterizam o centro das cidades e a população das mesmas, de acordo com o censo 2010-IBGE, foi possível gerar um mapa de atração urbana no Dinamica, o qual se baseia na lei da gravitação de Newton. A equação (2) mostra como é feito o cálculo da atração no Dinamica EGO. O mapa de atração urbana foi utilizado pois os grandes centros urbanos são indutores de grandes mudanças do uso do solo, como por exemplo do desmatamento.

$$p(i) = \sum_{j=0}^n \frac{value(j)}{dist(i,j)^{de}} \quad (2)$$

onde $p(i)$ é a atração urbana, $value(j)$ corresponde a massa urbana (população), $dist(i,j)$ é a distância entre as áreas urbanas e de é um fator de decaimento, ou seja, quanto maior é o de maior será o decréscimo do potencial de atração $p(i)$ a partir do centro urbano. O fator de decaimento utilizado nesta etapa foi $de = 2$ pois valores acima deste geravam pequenas manchas de atração o que acarretava em dificuldades para o modelo calcular os coeficientes dos pesos de evidência.

Como segundo passo para a construção do modelo é preciso calcular as faixas e os coeficientes dos pesos de evidências (cubo vermelho, Figura 5). Os quais são baseados no teorema de Bayes, e são calculados pelas equações (3), (4), (5) e (6). O peso de evidência basicamente representa a probabilidade de ocorrer uma transição $i \rightarrow j$ (p.ex: floresta para área desmatada), dado a evidência de que uma variável estática (p.ex: distância das rodovias), tenha ocorrido.

$$O\{D/B\} = O\{D\} \frac{P\{B/D\}}{P\{B/\bar{D}\}} \quad (3)$$

$$\log\{D/B\} = \log\{D\} + W^+ \quad (4)$$

$$O\{D/B\} = O\{D\} \frac{P\{\bar{B}/D\}}{P\{\bar{B}/\bar{D}\}} \quad (5)$$

$$\log\{D/B\} = \log\{D\} + W^- \quad (6)$$

onde $O\{D\}$ e $O\{D/B\}$ correspondem respectivamente a chance de ocorrer a priori o evento D e de ocorrer D dada a existência de um padrão B (variável explicativa). Na equação (4) o W^+ corresponde ao peso de evidência positivo e na equação (6) o W^- é peso de evidência negativo de que ocorra o evento D , dado um padrão espacial B . A probabilidade a posteriori de uma transição $i \rightarrow j$, utilizando-se k variáveis espaciais (ex: distância dos rios, rodovias e etc...), ou seja, mais de um padrão espacial é expressa pela equação (7). (SOARES-FILHO *et al.*, 2007, ALMEIDA, 2004).

$$P(i \Rightarrow j(xy)/V) = \frac{e^{\sum_k W_k n_{i \Rightarrow j(xy)}}}{1 + \sum_{ij} e^{\sum_k W_k n_{i \Rightarrow j(xy)}}} \quad (7)$$

onde V refere-se a um vetor de k variáveis espaciais, medidas nas localidades x, y e representadas por seus pesos $W^+ k_1 xy, W^+ k_2 xy, \dots, W^+ k_n xy$, sendo n o número de categorias de cada variável k . (SOARES-FILHO *et al.*, 2007).

Para testar a significância da associação entre ocorrer uma transição $i \rightarrow j$ a cada faixa de valores das variáveis, aplica-se a medida de contraste, a qual é obtida pela diferença entre os pesos positivos e negativos, como mostra a equação (8). Entretanto, só é possível concluir que o valor obtido na equação (8) é estatisticamente significativo com intervalo de confiança de 95% se $|C| > 1,96 S(C)$, onde a variância do contraste $S^2(C)$ pode ser estimada pela equação (9) (GOODACRE *et al.*, 1993; NTI, 2013).

$$C = W^+ - W^- \quad (8)$$

$$S^2(C) = \frac{1}{P(B \cap D)} + \frac{1}{P(B \cap \bar{D})} + \frac{1}{P(\bar{B} \cap D)} + \frac{1}{P(\bar{B} \cap \bar{D})} \quad (9)$$

O contraste também é usado para medir o efeito de associação e repulsão. Valores positivos, obtidos na equação (8), favorecem a ocorrência de uma dada transição numa determinada faixa das variáveis estáticas. Enquanto os valores negativos repelem a ocorrência do mesmo. Para resultados próximos de zero não há influência sobre a transição e podem ser desconsiderados. (SOARES-FILHO *et al.*, 2009).

Como os pesos de evidência são baseados na probabilidade condicional, é necessário ter certeza da independência dos mapas. Portanto, aplica-se uma análise de correlação (retângulo em azul, na etapa de calibração da Figura 4), o qual se fundamenta em testes estatísticos, como os índices de *Crammer* (V), de *Joint Information Uncertainty* (U), medidas de entropia e o qui-quadrado. Neste trabalho os valores dos índices que serão avaliados são os testes de *Crammer* (V) e de *Joint Information Uncertainty* (U), os quais são mais utilizados nesta etapa. Com isso, tem-se que para valores de U e V superiores a 0,50 são de alta correlação (alta dependência), entre os pares de mapas analisados e a variável estática que contém a maior quantidade de valores não significativos deverá ser excluída. Entretanto, para valores inferiores a 0,5 considera-se que há uma baixa correlação (baixa dependência), com isso não há exclusão de alguma das variáveis estáticas (ALMEIDA, 2004).

Após a análise de correlação e a exclusão das variáveis dependentes, deve-se calcular novamente as novas faixas e coeficientes dos pesos de evidência, os quais são obtidos para cada sub-região (cubo em vermelho, Figura 4). Feito isso, o próximo passo é a execução do modelo (cubo cinza) do ano de 2001 à 2012, porém nesta etapa os parâmetros *Mean Patch size* e *Patch size Variance* são ajustados para 1 ha para que não haja formação de manchas, em vista de que a resolução da imagem MODIS *Land Cover Type 1* é de 500m, ou seja cada pixel possui 25 ha. (SOARES-FILHO *et al.*, 2009).

A etapa seguinte corresponde ao processo de validação do modelo (losango amarelo na Figura 4), que tem como intuito verificar se o modelo reflete ou não a realidade. O método utilizado pelo Dinamica nesta etapa é uma adaptação feita pela equipe do Dinamica EGO da similaridade *Fuzzy* criada por Hagen (2003). Este método trabalha em cima da diferença entre os mapas simulado e o real,

neste caso o de 2012 simulado e 2012 real (T_2), com o mapa inicial (2001). Além disso, o teste aplicado para avaliação dos mapas não é feito pixel a pixel e sim por resoluções múltiplas de janelas. Os valores *Fuzzy* são obtidos a partir da distância da célula central até a célula que contém a classe, em questão, na janela de comparação, fazendo uso de uma função e decaimento constante ou exponencial. Na Figura 4, pode-se observar como é feito o método de comparação *Fuzzy* para decaimento exponencial (SOARES-FILHO *et al.*, 2009; DELANEZE, 2011; MACEDO *et al.*, 2013).

Após o processo de validação utilizando-se a função de decaimento constante, considera-se que valores obtidos para mínima similaridade superiores a 0,50 em janelas com resoluções de 3x3 a 5x5 são aceitáveis (MACEDO *et al.*, 2013), Figura 5. Dado o resultado nesta etapa como satisfatório, pode-se então aplicar a simulação de predição futura do uso e ocupação do solo, com formação e expansão de manchas, através do modelo de sub-regiões.

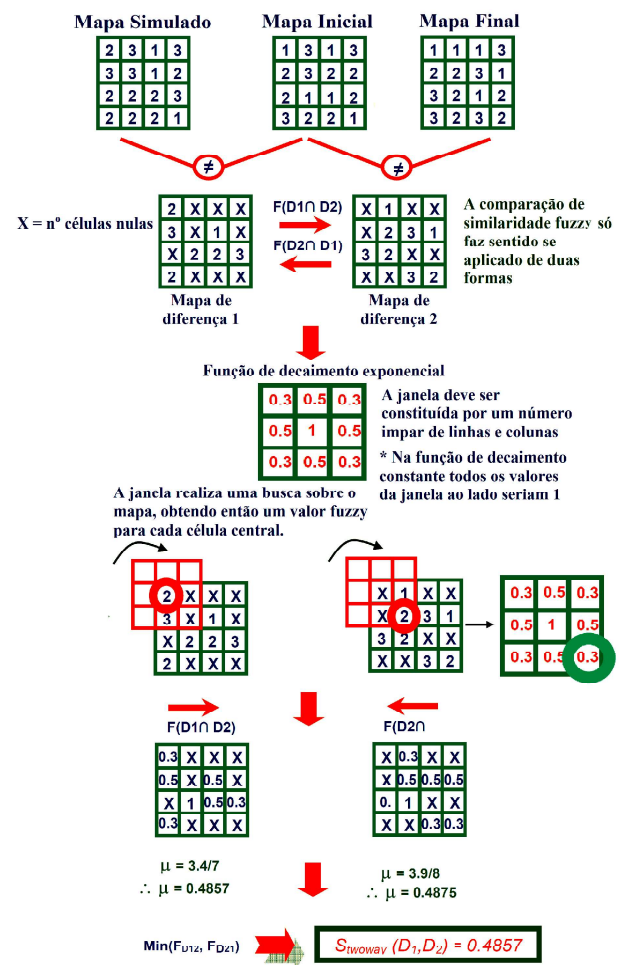


Fig. 5 - Método de comparação Fuzzy usando mapa de diferenças por meio de decaimento exponencial. (Traduzido de SOARES-FILHO *et al.*, 2009).

3. RESULTADOS

Na Figura 6 está representada o mapa da bacia do rio Paraíba do Sul em 2001, após o processamento no DINAMICA-EGO e ENVI 5.0, o mesmo foi realizado para todos os mapas.

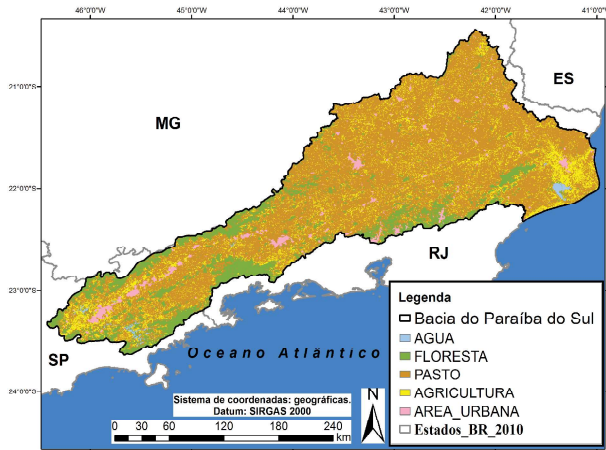


Fig. 6 - Mapa classificado da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul para o ano de 2001

Como dito anteriormente, o primeiro passo para a concretização do modelo de simulação, por sub-regiões na plataforma Dinamica EGO, consiste no cálculo das matrizes de transições. Na Figura 7 está representado de modo abrangente e sintético, os resultados obtidos nesta etapa para cada sub-região.

O gráfico na Figura 7 é um gráfico do tipo bolha, cujo a dimensão do raio da bolha depende da magnitude das taxas de transições da matriz (*mult step*), calculadas para o período de 2001 a 2012, ou seja, quanto maior a bolha maior é a taxa de transição e vice-versa. As cores de cada bolha representam uma sub-região e o eixo-x indica o estado inicial da célula e no eixo-y o estado final da mesma.

A partir da Figura 7 foi possível notar as maiores taxas de transições (bolhas grandes) estão ligadas ao surgimento de novas células da classe 9 (pasto). Sob este mesmo assunto observou-se que a transição 12→9 possui um peso maior do que a transição 2→9 no surgimento de novas células da classe pasto (9). Entretanto, as menores taxas de transição (bolhas pequenas) observadas foram derivadas do surgimento da classe 2 (floresta). Com isso, pôde-se perceber uma tendência de aumento da área de pasto em relação as outras classes de uso do solo.

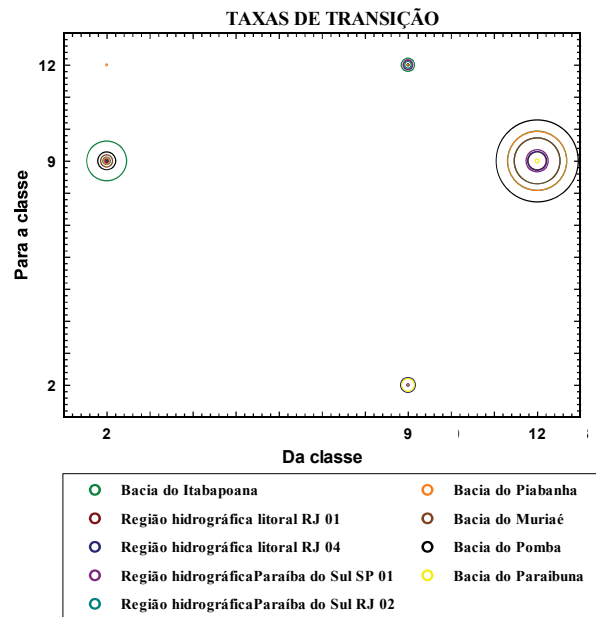


Fig. 7 - Taxas de transição anuais da região da bacia para o período de 2001 a 2011.

Como próximo passo para a construção do modelo no Dinamica EGO, foi realizado o cálculo dos pesos de evidência. Com isso, para que se mantenha a condição de que os mapas de variáveis estáticas devam ser independentes, fez-se uma análise de correlação. O resultado desta análise pode ser observado na Figura 8, sendo o gráfico gerado a partir do cruzamento dos índices de *Crammer* e *Joint Information Uncertainty* obtidos para todas as sub-regiões.

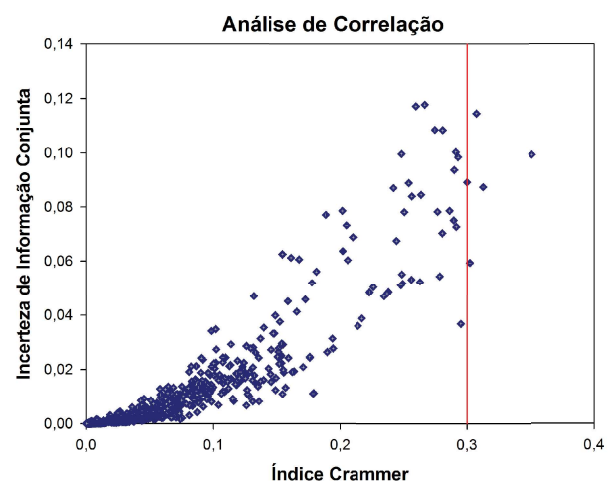


Fig. 8 - Resultado da análise de correlação das variáveis estáticas.

Constatou-se que nenhum valor ultrapassou o valor de 0,50, tanto no caso do índice *Crammer* quanto nos valores de incerteza de informação conjunta (JIU). Quando algum valor

de algum destes dois índices ultrapassarem este limiar significa que há uma alta correlação (dependência) entre duas variáveis estáticas (ALMEIDA, 2004). Portanto, como o cálculo dos pesos destas variáveis explicativas, em uma determinada transição, deve seguir o pressuposto da independência dos eventos (teorema de Bayes) se faz necessário excluir uma das variáveis em questão.

Neste trabalho cada par de variáveis

estática, cujo o índice de *Cramer* ou incerteza de informação conjunta (JIU) ultrapassou o valor de 0,30, foi classificada pelos autores como sendo dependentes. Com isso, excluíram-se àquelas que possuíam faixas de pesos de evidência com os maiores índices de resultados não significativos (rever equação (8) na parte de materiais e métodos deste mesmo estudo). A relação dos pares e das variáveis que foram excluídas se encontra na tabela 2.

Tabela 2: Variáveis estáticas com alta correlação

TRANSIÇÃO i → j		PAR DE VARIÁVEIS ESTÁTICAS		CRAMMER	INCERTEZA CONJUNTA
2	12	<u>distância para 2</u>	vegetação	0,31	0,11
12	2	distância para 2	<u>vegetação</u>	0,30	0,06
9	12	distância das Ucs	<u>vegetação</u>	0,31	0,09
2	12	<u>distância para 2</u>	vegetação	0,31	0,11
2	9	distância para 2	<u>vegetação</u>	0,31	0,11
2	12	distância para 2	distância das Ucs	0,30	0,09
2	9	distância para 2	<u>vegetação</u>	0,35	0,10

OBS: As variáveis sublinhas foram excluídas

Passada a etapa de calibração do modelo de sub-regiões evoluiu-se para a etapa de validação do mesmo. Com isso, comparou-se a mínima similaridade entre os mapas de diferença, simulado e o real, ambos para o ano de 2012. A Figura 9 representa a curva com os valores de mínima similaridade obtidos (eixo y) a partir de janelas com resolução de 1x1 à 11x11 (eixo x). Observou-se que a mínima similaridade de 0,5 está entre as janelas com resolução de 1x1 e 3x3, sendo que nesta última verificou-se valores de 0,6785 de mínima similaridade, o que está dentro dos critérios descritos na parte de materiais e métodos deste mesmo trabalho.

Na Figura 10 estão os mapas utilizados na etapa de validação dos dados, onde o mapa (b) é o mapa real de 2012 e o (a) é o mapa simulado de 2012, sem expansão e geração de manchas, ou seja, os parâmetros do modelo, tamanho médio (*mean size*), variância (*variance size*) e isometria (*isometry*) das manchas, foram ajustados para que não houvesse formação de um conjunto de células (mancha) e sim de uma mancha unitária (uma célula apenas). Com isso, foi possível avaliar a confiabilidade do modelo. É sempre importante lembrar que por mais sofisticado um modelo seja, ele nunca conseguirá simular a realidade com 100% de exatidão.

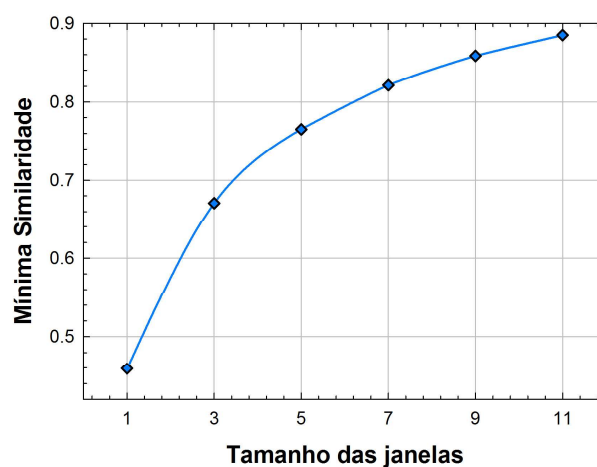


Fig. 9 - Resultado da similaridade Fuzzy por decaimento constante.

Por fim, com o modelo devidamente calibrado e validado executou-se a simulação futura do uso e ocupação do solo para a bacia do rio Paraíba do Sul, do ano de 2012 a 2023. Foi gerado um mapa para cada ano da simulação. Para auxiliar na escolha dos parâmetros como *mean size patch*, *variance size patch* e *patch isometry*, utilizou-se um modelo no Dinamica EGO de métricas de paisagem. A definição de quantas transições ocorreram por meio de expansão e geração de

novas células, se deu a partir de uma análise visual das imagens do período de 2001 a 2012, da bacia do rio do Paraíba do Sul. O mapa de 2023 obtido por meio da simulação pode ser observado na Figura 11.

Com os mapas gerados anualmente de 2013 a 2023 (período simulado) e os mapas, também anuais, de 2001 a 2012 (período observado), realizou-se, para cada sub-bacia, o cálculo da área de cada uma das 5 classes de uso do solo (água, floresta, pasto, agricultura e área urbana) por sub-bacias. O resultado obtido pode ser visualizado na Figura 12.

A partir dos gráficos referentes as variações anuais da classe floresta e da classe pasto (em ha), foi possível constatar que as bacias do rio Pomba e Muriaé apresentaram as maiores áreas de pasto, quando comparada às demais, e ainda pode-se notar que há uma tendência crescente

da pastagem desta região no período de estudo, de 2001 a 2023 (Figura 12.c). Além disso, estas apresentaram, respectivamente, a segunda e terceira menores áreas de floresta (Figura 12.b).

Destaca-se, também, a Região Hidrográfica-SP-01, por possuir a maior quantidade de floresta preservada. Entretanto, cabe ressaltar que apesar desta região possuir a maior área de floresta (Figura 12.b), também apresenta a maior concentração de área urbana (Figura 12.e), da bacia do Paraíba do Sul e que estas encontram-se concentradas próximas do rio Paraíba do Sul.

Diante deste cenário de alterações do uso do solo, nas principais regiões hidrográficas da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, vale destacar o potencial das técnicas de sensoriamento remoto sob a perspectiva do planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos dessa importante região.

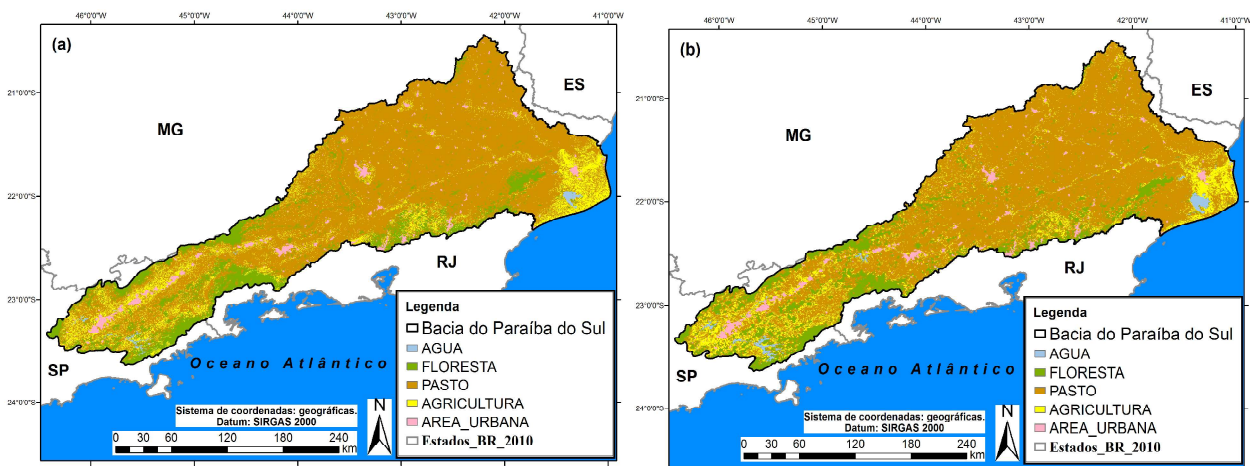


Fig.10 - a) Mapa Simulado, sem expansão e geração de manchas, referente ao ano de 2012 da bacia do rio Paraíba do Sul. b) Mapa Real referente ao ano de 2012 da bacia do rio Paraíba do Sul.

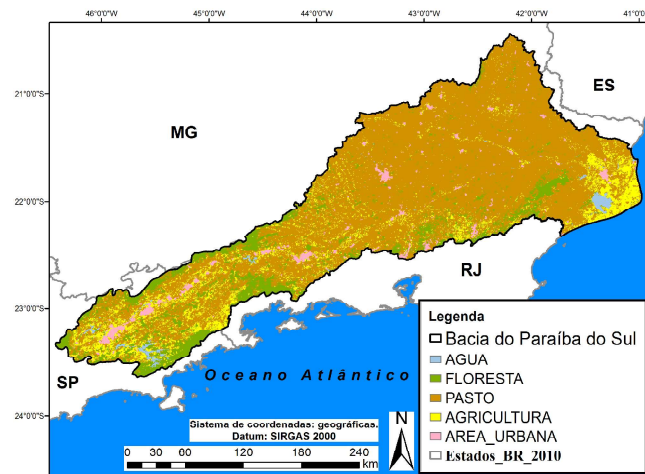


Fig. 11 - Mapa Simulado com formação e geração de mancha, da bacia do rio Paraíba do Sul no ano de 2023.

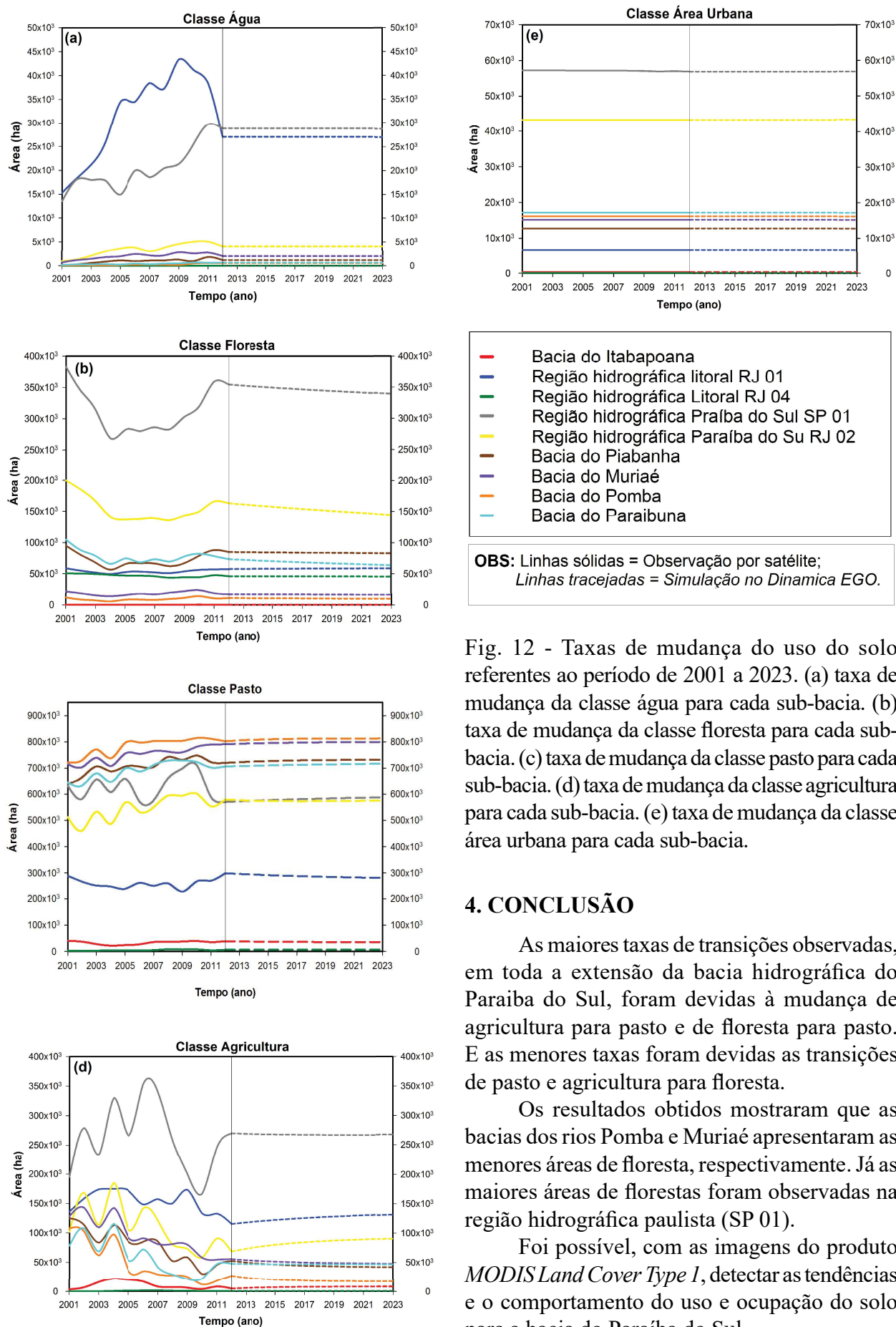


Fig. 12 - Taxas de mudança do uso do solo referentes ao período de 2001 a 2023. (a) taxa de mudança da classe água para cada sub-bacia. (b) taxa de mudança da classe floresta para cada sub-bacia. (c) taxa de mudança da classe pasto para cada sub-bacia. (d) taxa de mudança da classe agricultura para cada sub-bacia. (e) taxa de mudança da classe área urbana para cada sub-bacia.

4. CONCLUSÃO

As maiores taxas de transições observadas, em toda a extensão da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul, foram devidas à mudança de agricultura para pasto e de floresta para pasto. E as menores taxas foram devidas as transições de pasto e agricultura para floresta.

Os resultados obtidos mostraram que as bacias dos rios Pomba e Muriaé apresentaram as menores áreas de floresta, respectivamente. Já as maiores áreas de florestas foram observadas na região hidrográfica paulista (SP 01).

Foi possível, com as imagens do produto *MODIS Land Cover Type 1*, detectar as tendências e o comportamento do uso e ocupação do solo para a bacia do Paraíba do Sul.

O modelo de sub-região executado no *software* Dinamica EGO se mostrou adequado e eficiente para representação das mudanças da cobertura do solo, da bacia do rio Paraíba do Sul.

Por fim, como foi abordado as alterações e tendências futuras do comportamento do uso e ocupação do solo por sub-bacias, pode-se concluir que os resultados aqui apresentados podem ser de grande valia para o planejamento e a gestão de recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de Juiz de Fora (PROPESQ/UFJF).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.** Tese de Doutorado, do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, INPE, p. 1-323, 2004.
- ANDRADE, M. P., RIBEIRO, C. B. M., LIMA, R. N. S. Avaliação do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul na primeira década do século XXI a partir de imagens MODIS – Land Cover. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento**, João Pessoa – PB, p. 1961-1968, abril 2015.
- ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (AGEVAP). **Relatório de situação trienal bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (2010/2011/2012).** 2012. Disponível em: <<http://agevap.org.br/agevap/conteudo/relsituacao20102012.pdf>>. p. 1-114. Acesso em: 13 de abril de 2015.
- ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL (AGEVAP). **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e planos de ação de recursos hídricos das bacias afluentes.** Fevereiro 2014, disponível em: <www.ceivap.org.br>. p. 1-378. Acesso: 26 de maio de 2015.
- BARROS, K. O.; MARCATTI, G. E.; COSTA, F. G.; OLIVEIRA, J. C.; SOARES RIBEIRO, C. A. A.; SOARES, V. P.; SILVA, E. Análise temporal das classes de uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio Vieira, Montes Claros, Minas Gerais. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 5, n. 2, caderno I, p. 43-54, ago. 2013.
- BATTY, M.; XIE, Y.; SUN, Z. Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 23, p. 205-233, 1999.
- CÂMARA, A. S.; FERREIRA, F.; CASTRO, P. Spatial simulation modelling. **Spatial Analytical Perspectives on GIS**. M.Fisher. London, Taylor & Francis. p.213-218, 1996.
- COLDITZ, R. R., SALDAÑA, G. L., MAEDA, P., ESPINOZA, J. A., TOVAR, C. M., HERNÁNDEZ, A. V., BENÍTEZ, C. Z., LÓPEZ, I. C., RESSL, R. Generation and analysis of the 2005 land cover map for Mexico using. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 541-552, ago. 2012.
- DELANEZE, M. E. **Modelagem dinâmica espacial aplicada na avaliação das mudanças da cobertura da terra no entorno de dutos utilizando autômatos celulares – Estudo de caso duto Orbel.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de Rio Claro, São Paulo, p. 1-116 UNESP, 2011.
- DENG, X.; SHI, Q.; ZHANG, Q.; SHI, C.; YIN, F. Impacts of land use and land cover changes on surface energy and water balance in the Heihe River Basin of China, 2000–2010. **Physics And Chemistry Of The Earth, Parts A/b/c**, v. 79-82, p. 2-10, 2015.
- DIAS, L. T.; WALDE, D. H. Modelagem da dinâmica espacial do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do lago Paranoá-DF. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 1, p. 77-94, 2013.
- FAN, M. Simulation of watershed hydrology and stream water quality under land use and climate change scenarios in Teshio River watershed, northern Japan. **Ecological Indicators**. v. 50, p.79–89, mar. 2015.
- FUSHITA, A. T., SANTOS, J. E. Modelagem

- da dinâmica de usos da terra na bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu (SP). In: **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento**, João Pessoa – PB, p.0215-0222, abril 2015.
- GOODACRE, A. K.; BONHAM-CARTER G. F.; AGTERBERG F.P.; WRIGHT D.F. A Statistical-Analysis of the Spatial Association of Seismicity with Drainage Patterns and Magnetic-Anomalies in Western Quebec. **Tectonophysics**, v. 225, n. 4, p.551-551, oct. 1993.
- GYAWALI, S.; TECHATO, K.; MONPRAPUSSORN, S.; YUANGYAI, C. Integrating Land Use and Water Quality for Environmental based Land Use Planning for U-tapao River Basin, Thailand. **Procedia - Social And Behavioral Sciences**, v. 91, p.556-563, out. 2013.
- HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 17, n.3, p.235-249, 2003.
- HONG, Z.; HAILIN, L.; ZHEN, C. Analysis of Land Use Dynamic Change and Its Impact on the Water Environment in Yunnan Plateau Lake Area — A Case Study of the Dianchi Lake Drainage Area. **Procedia Environmental Sciences**, v. 10, p.2709-2717, 2011.
- INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE (INEA). **NOTA TÉCNICA DIGAT/INEA n° 01-A/2014**. Disponível em: <<http://inea.rj.gov.br>>. p. 1-20. Acesso em: 11 de abril de 2015.
- LIU, W. T. H. Sistema de Informações Geográficas. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**, 2ª ed., cap. 15, p.1-38, 2015.
- MACEDO, R. C.; ALMEIDA, C. M.; SANTOS, J. R.; RUDORFF, B. F. T. Modelagem dinâmica espacial das alterações de cobertura e uso da terra relacionados à expansão canavieira. **Boletim de Ciências Geodésicas**. v. 19, no 2, p.313-337, abr-jun. 2013.
- MOLIN, P. G. Dynamic modeling of native vegetation in the Piracicaba River basin and its effects on ecosystem services. **Tese de Doutorado**, Programa: Forest Resources. Option in: Forest Ecosystem Preservation, USP, p.1-148, 2014.
- NTI, I. K. Geospatial process modelling for land use cover change. **Thesis of Doctor of Philosophy (PhD)**, School of Computing and mathematical Sciences, New Zealand, Auckland University of Technology, p.1-233. Novembro, 2013.
- NUGROHO, P.; MARSONO, D.; SUDIRA, P.; SURYATMOJO, H. Impact of Land-use Changes on Water Balance. **Procedia Environmental Sciences**. v. 17, p. 256–262, 2013.
- PEDROSAB.M.; CÂMARA G.; MONTEIRO, A. M. V. Ambiente Computacional para Modelagem Espacial Dinâmica. **Relatório Técnico**, p. 1-49. Maio, 2001.
- PORTO, MONICA F. A. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 43-60, São Paulo 2008.
- RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S.; COSTA, W. L. S. Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. p. 3089-3096, Florianópolis - SC, 2007.
- 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, p.217-235, set. 2002. Elsevier BV.
- SOARES FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; ARAÚJO W. L.; VOLL, E. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. **Megadiversidade**, v. 3, n. 1-2, p. 74-76, dez. 2007.
- SOARES FILHO, B. S.; RODRIGUES, H.; LELLES, W. **Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO**. 1ª ed., v.1, p. 1-116. Belo Horizonte: UFMG, 2009.
- SOUZA, M. M.; GASTALDINI, M. C. C. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 3, p.263-274, jul-set 2014. FapUNIFESP (SciELO).
- WANG, D.; GONG, J.; CHEN, L.; ZHANG, L.; SONG, Y.; YUE, Y. Comparative analysis

of land use/cover change trajectories and their driving forces in two small watersheds in the western Loess Plateau of China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. v. 21, p. 241–252, abr. 2013.

ZHU, C.; LI, Y. Long-Term Hydrological Impacts of Land Use/Land Cover Change From 1984 to 2010 in the Little River Watershed, Tennessee. **International Soil And Water Conservation Research**, v. 2, n. 2, p.11-21, jun. 2014.