

## Modelagem dinâmica espacial da cobertura florestal nativa do município de Roca Sales - RS

Juliana Fava e Silva <sup>1</sup>  
Rafael Rodrigo Eckhardt <sup>1</sup>  
Claudete Rempel <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro Universitário Univates – UNIVATES  
Caixa Postal 155 - 95900-000 - Lajeado - RS, Brasil  
juliana\_favaesilva@yahoo.com.br; {rafare, crempel}@univates.br

**Abstract.** The availability of satellite images from a same region of the Earth, spaced in the time, allows the detection of land use and land cover changes and the future scenarios structuration by simulation models of landscape. This paper aims to organize a spatial dynamic model to project a future scenario of the areas with native Atlantic Forest biome in the municipality of Roca Sales / RS for the year 2020. The dynamic model was organized from the temporal analysis of native forest areas between 1989 to 2009 years, done by recursive comparison of Landsat 5 classified images. The spatial dynamic model was structured on Dinamica software, based on Cellular Automata. The results showed that the abandoned agricultural areas in Roca Sales are being progressively converted to native forest areas, mainly in areas with high elevation and high slopes. The native forests increased 76.45% on the landscape analyzed in 20 years. By scenario generated to 2020 year, with the spatial dynamic modeling, the future tendencies point for maintenance regeneration process of the natural forest. The results can serve as a tool for decision support to develop programs order to environmental conservation and the adequate use of land use in landscape ever-changing.

**Palavras-chave:** remote sensing, landscape, spatial dynamics modeling, sensoriamento remoto, paisagem, modelagem dinâmica espacial.

### 1. Introdução

Segundo Bertrand (1968), paisagem consiste em uma determinada porção do espaço que resulta da combinação dinâmica dos elementos físicos, biológicos e antrópicos, que interagem uns sobre os outros formando um conjunto único e indissociável em perpétua evolução. A observação do desenvolvimento das paisagens no espaço e no tempo é relevante para entender os processos que estão ocorrendo e para o prognóstico de tendências futuras. Segundo Soares Filho (1998), para estudar a dinâmica da paisagem, é necessário, em primeiro lugar mapear os padrões de uso e cobertura da terra, categorizando-os em função de características médias, para com isso avaliar como cada elemento da paisagem se relaciona com o outro espacialmente e temporalmente.

A interpretação das imagens obtidas pelos sensores remotos permite a elaboração de mapas que expressam as classes de uso da terra e o acompanhamento das mudanças da paisagem. De acordo com Santos (2004), das classes de uso e cobertura da terra, pelo seu potencial como indicador, a vegetação é um tema muito valorizado. Seu estudo permite conhecer as condições naturais do território e as influências antrópicas recebidas, podendo-se inferir a qualidade do meio.

Para Briassoulis (2000), as mudanças de uso e cobertura da terra estão relacionadas com transformações quantitativas na área (aumento ou diminuição) de determinada classe de uso. A análise de dados obtidos por sensores remotos em apenas uma data, visando extrair informações biofísicas importantes da paisagem, frequentemente, é de grande valor. Porém, quando se pretende analisar a dinâmica de certo ecossistema é necessário monitorá-la através do tempo e determinar as sucessões das mudanças (Jensen, 2009). Neste contexto, a Modelagem Dinâmica Espacial procura transcender as limitações atuais da tecnologia de Geoprocessamento, fortemente baseada numa visão estática e bidimensional do mundo (Almeida et al., 2007).

De acordo com Wegener et al. (1986), um modelo denomina-se dinâmico quando possui uma dimensão temporal explícita, se suas entradas e saídas variam com o tempo e se seus estados dependem de estados anteriores. Os modelos dinâmicos desenvolvidos entre o final dos anos de 1950 até metade dos anos de 1980, de maneira geral, não operavam sobre uma dimensão espacial, de modo que o resultado desses modelos não podia ser visualizado espacialmente. Avanços efetivos na representação espacial ocorreram apenas quando modelos de autômatos celulares

(*Cellular Automata*) começaram a ser utilizados em larga escala. Os autômatos celulares consistem, segundo Wolfram (1983), de idealizações matemáticas de sistemas físicos, nos quais o espaço e o tempo são discretos. O estado dos autômatos celulares evolui baseando-se nos valores de sua vizinhança no passo de tempo precedente e de acordo com um conjunto predefinido de regras de transição.

Pela definição de Burrough (1998), “um modelo espacial dinâmico é uma representação matemática de um processo do mundo real em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações em suas forças direcionadoras”, descrevendo a evolução espacial de um sistema ao longo do tempo.

Na modelagem baseada em autômatos celulares o espaço é representado por um mosaico de células, de tamanhos e formatos idênticos (White e Engelan, 2000). Sobre cada célula são aplicadas regras de transição, que determinam quando e por que o estado de uma célula se altera e podem ser qualitativas ou quantitativas. Modelos dinâmicos espaciais, baseados em autômatos celulares, de acordo com Almeida et al. (2007), constituem uma das melhores técnicas atualmente disponíveis para responder às necessidades e interesses das investigações acerca da dinâmica dos uso do solo urbanos e regional. São modelos que apresentam simplicidade operacional, flexibilidade e podem gerar uma dinâmica que pode reproduzir processos tradicionais de mudanças e articular-se com dados matriciais, comumente usados em SIG.

O presente estudo objetiva implementar um modelo dinâmico espacial da cobertura florestal nativa do Bioma Mata Atlântica do município de Roca Sales - RS, com a projeção de um cenário futuro.

## 2. Metodologia de trabalho

O município de Roca Sales - RS (Figura 1) apresenta área de 208,34 km<sup>2</sup> e 10.468 habitantes (IBGE, 2009). Os procedimentos metodológicos realizados para executar a modelagem dinâmica espacial das áreas de vegetação nativa de Roca Sales foram divididas em duas etapas: classificação das imagens do satélite Landsat 5 de 1989 e 2009 e a implementação da modelo dinâmico espacial.

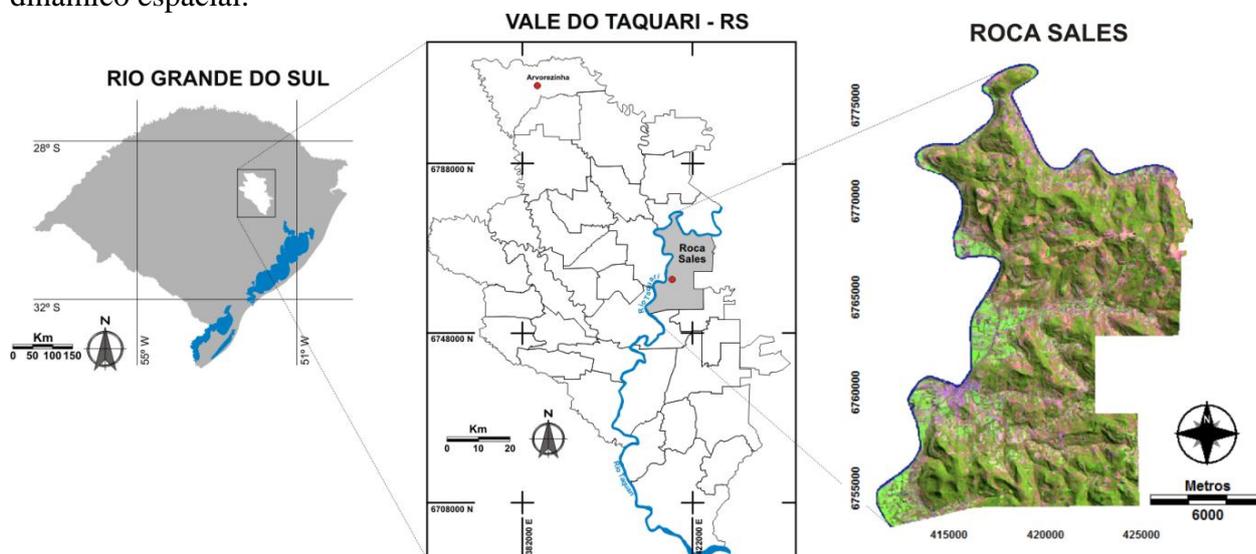


Figura 1 - Localização do município de Roca Sales.

### 2.1 Materiais e software utilizados

- Bandas 3, 4 e 5 do sensor TM do satélite Landsat 5, dos anos de 1989 e 2009;
- Cartas topográficas de Encantado e Lajeado em escala 1:50.000;
- Aparelho GPS - *Global Positioning System*;
- *Softwares* Envi 4.5, Idrisi Andes e Dinamica 2.4.

## 2.2 Procedimentos metodológicos

A primeira etapa do estudo consistiu em georreferenciar as 3 bandas do satélite Landsat 5, obtidas gratuitamente do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, datadas de 20/09/1989 e 26/08/2009. O georreferenciamento consiste em um processo que concede a uma imagem um sistema de coordenadas e corrige suas deformações. O georreferenciamento foi realizado na imagem de 2009, utilizando 15 pontos de controle medidos nas cartas topográficas elaboradas pelo Serviço Geográfico do Exército, em escala 1:50.000. O erro médio quadrático (RMS) do georreferenciamento foi controlado com valor inferior a 1 pixel, ou seja, inferior a 30 metros. A imagem de 1989 foi registrada utilizando a imagem georreferenciada de 2009 como referência.

A disponibilidade do limite municipal de Roca Sales permitiu a criação de uma máscara para realizar o recorte das bandas georreferenciadas e a organização de uma composição colorida RGB543. Após, as áreas de floresta nativa foram classificadas pelo método supervisionado da Máxima Verossimilhança Gaussiana. Este classificador utiliza apenas a informação espectral de cada pixel para definir regiões homogêneas e se fundamenta em métodos estatísticos calculados a partir de amostras de treinamento (Ponzoni e Shimabukuru, 2007).

As imagens temáticas resultantes foram validadas de forma heurística, sendo que para o ano de 2009, a validação foi realizada com pontos de controle medidos em campo com GPS. Em virtude do presente estudo focar na dinâmica das áreas florestais nativas, a área urbanizada em cada período foi vetorizada com o auxílio das composições coloridas. Os demais usos (agricultura, pastagens, solo exposto e floresta industrial) foram agrupados em uma única classe temática, representada pelas áreas de uso agropecuário. Assim sendo, com o uso de álgebra de mapas foram gerados os mapas temáticos finais do uso da terra de cada ano analisado.

### 2.2.1 Modelagem dinâmica espacial

Por se tratar de um tipo genérico de autômato celular foi escolhido o *software* Dinamica 2.4 como plataforma para o desenvolvimento do estudo proposto. O Dinamica tem sido usado para modelar vários fenômenos dinâmicos como o desflorestamento, a dinâmica urbana e a regeneração florestal. De maneira geral, as etapas de construção do modelo em questão consistiram em: 1) organização da base digital com mapas multitemporais do uso da terra; 2) Quantificação das taxas de mudanças da paisagem, expressas pelas matrizes de transição global e anual; 3) determinação das variáveis ou vetores estáticos e dinâmicos que influenciam na dinâmica de uso da terra; 4) cálculo dos pesos de evidência, indicando o comportamento da mudança da paisagem para cada variável considerada; 5) calibração e validação do modelo de simulação visando à reprodução da dinâmica da vegetação nativa observada; 6) prognóstico para 2020, utilizando a tendência do período de 1989-2009. A Figura 2 apresenta a arquitetura do Dinamica e a estruturação geral do modelo dinâmico espacial.

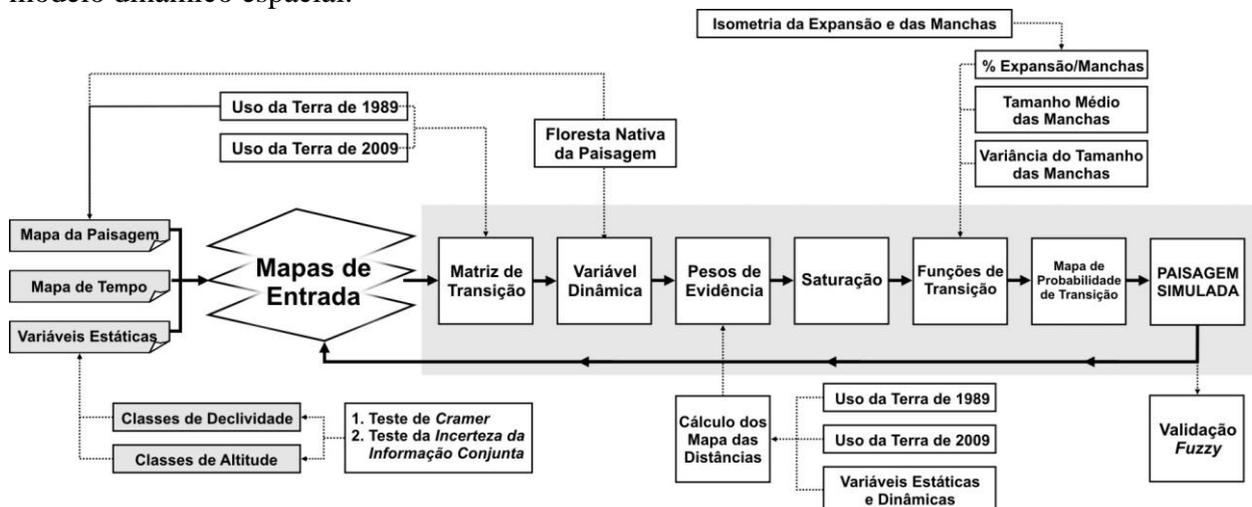


Figura 2 - Fluxograma metodológico do modelo dinâmico espacial da paisagem de Roca Sales.

### 3. Resultados e Discussão

A classificação das imagens de satélite de 1989 à 2009 gerou os mapas de Uso e Cobertura da Terra de Roca Sales (Figuras 3 e 4), os quais revelaram o quanto o município conservou, em 1989, os seus fragmentos florestais relictuais nativos, restritos aos topos de morros e elevadas declividades. A análise da imagem temática de 2009 revelou a situação atual do uso da terra do município e redução das áreas de uso agropecuário e um consequente aumento das áreas florestais nativas e das áreas urbanizadas em comparação ao ano de 1989.

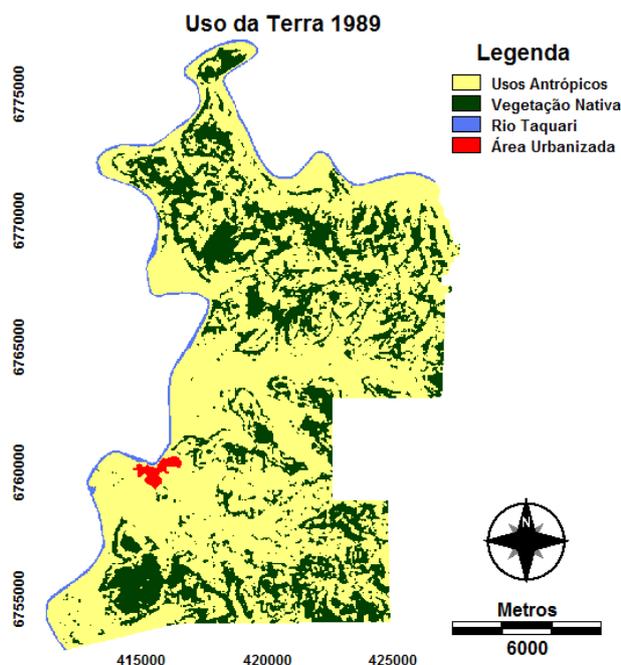


Figura 3 - Uso da Terra de 1989.

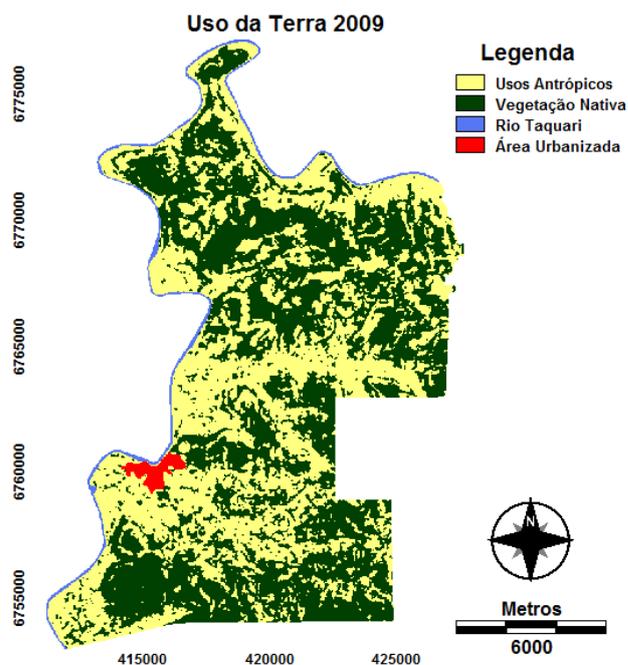


Figura 4 - Uso da Terra de 2009.

Tabela 1 – Variação das taxas das classes de Uso da Terra de Roca Sales.

| Classes de Uso     | 1989          | 2009          | $\Delta$ km <sup>2</sup> | $\Delta$ % |
|--------------------|---------------|---------------|--------------------------|------------|
| Usos Agropecuários | 143,45        | 97,28         | - 46,17                  | -32,18     |
| Vegetação Nativa   | 59,52         | 105,03        | +45,51                   | +76,45     |
| Área Urbanizada    | 0,99          | 1,64          | +0,65                    | +66,76     |
| Rio Taquari        | 4,38          | 4,38          | 0,00                     | 0,00       |
| <b>Total</b>       | <b>208,34</b> | <b>208,34</b> | -                        | -          |

A análise da Tabela 1 aponta que as áreas florestais aumentaram 76,45% nos últimos 20 anos no município de Roca Sales. Em 1989 as áreas florestais representavam 28,57% da área do município e em 2009 passaram a representar a matriz da paisagem com 50,41%. A análise do cenário de uso da terra de 2009 permite constatar um processo de densificação das áreas florestais, decorrente do processo natural de regeneração das áreas de uso agropecuário abandonadas em terrenos com declividades acentuadas. As áreas de uso agropecuário registraram redução ao longo do período analisado, passando de 68,85% a 46,69% da área do município em 20 anos. Ao observar o mapa de uso e cobertura da terra de 2009, percebe-se que as áreas de uso agropecuário, apesar de apresentarem tendência de redução da área total utilizada, mantiveram-se nas áreas mais planas pela possibilidade de mecanização da produção e maior produtividade. Por sua vez, as áreas urbanizadas tiveram incremento de 66,76% na área em 20 anos.

### 3.1 Modelo dinâmico espacial

As matrizes de transição global (Tabela 2) e anual (Tabela 3), obtidas pela tabulação cruzada do mapa de uso da terra de 1989 e 2009, servem para quantificar as tendências da dinâmica da paisagem ao longo dos 20 anos analisados. A diagonal da matriz de transição indica a permanência dos estados e os valores 2-3 e 2-5 indicam que houve, respectivamente, transição de áreas de uso antrópico para floresta nativa e área urbanizada. A matriz de transição anual foi utilizada como parâmetro quantitativo para a transição do uso agropecuário para floresta nativa no modelo de simulação da paisagem de Roca Sales.

Tabela 2 - Matriz de transição global da paisagem de Roca Sales de 1989-2009.

| Uso em 1989 | Uso em 2009 |        |        |   |        |   |
|-------------|-------------|--------|--------|---|--------|---|
|             | -           | 1      | 2      | 3 | 4      | 5 |
| 1           | 1           | 0      | 0      | 0 | 0      | 0 |
| 2           | 0           | 0,6782 | 0,3172 | 0 | 0,0046 | 0 |
| 3           | 0           | 0      | 1      | 0 | 0      | 0 |
| 4           | 0           | 0      | 0      | 1 | 0      | 0 |
| 5           | 0           | 0      | 0      | 0 | 0      | 1 |

Tabela 3 - Matriz de transição anual decomposta de 1989-2009 em Roca Sales.

| Uso em 1989 | Uso em 2009 |        |        |   |        |   |
|-------------|-------------|--------|--------|---|--------|---|
|             | -           | 1      | 2      | 3 | 4      | 5 |
| 1           | 1           | 0      | 0      | 0 | 0      | 0 |
| 2           | 0           | 0,9808 | 0,0190 | 0 | 0,0003 | 0 |
| 3           | 0           | 0      | 1      | 0 | 0      | 0 |
| 4           | 0           | 0      | 0      | 1 | 0      | 0 |
| 5           | 0           | 0      | 0      | 0 | 0      | 1 |

1. Background; 2. Usos Agropecuários; 3. Floresta Nativa; 4. Rio Taquari; 5. Área Urbanizada.

Na sequência foram calculados os pesos de evidência para as 2 variáveis estáticas (declividade e altitude em classes) e 1 variável dinâmica (distância dos fragmentos florestais nativos de 1989) em relação à transição analisada (Figuras 5 a 7).

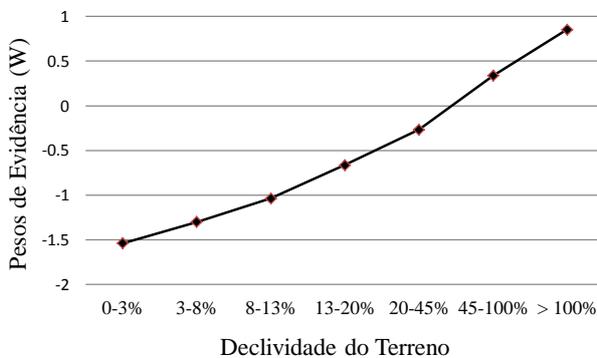


Figura 5 - Pesos de evidência da variável categórica declividade do terreno.

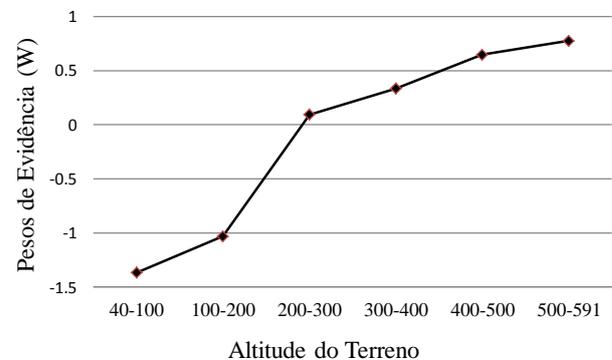


Figura 6 - Pesos de evidência da variável categórica altitude do terreno.

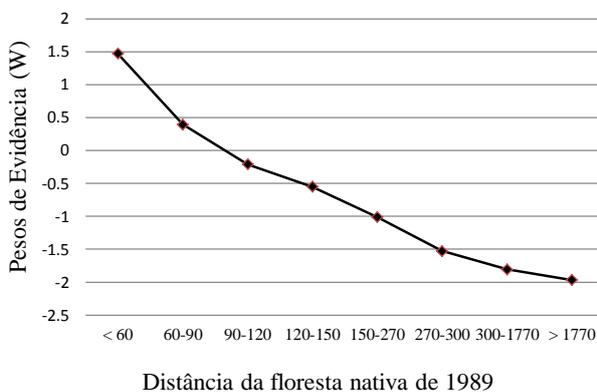


Figura 7 - Pesos de evidência da variável dinâmica distância da floresta nativa de 1989.

Ao analisar os pesos de evidência das 3 variáveis, verifica-se que houve transição de áreas em terrenos com elevada declividade, nos topos dos morros e nas áreas adjacentes aos fragmentos florestais existentes em 1989. Terrenos classificados como escarpados (<100%) e montanhosos (100-45%) apresentam pesos de evidência positivos, favorecendo a transição. Terrenos com declividades classificadas como moderado onduladas (45-20%) até planas (3-0%) apresentam pesos de evidência negativos, desfavorecendo a transição. Acima de 200 metros, até o limite de 591 metros, os pesos de evidências são positivos. Quanto mais elevado o local, maior a probabilidade de ocorrer conversão de áreas de uso antrópico para floresta nativa. No que se refere à variável dinâmica, distâncias inferiores a 90 metros dos fragmentos florestais nativos de 1989 favorecem a transição, apresentando assim pesos positivos. Distâncias acima de 90 metros apresentam pesos progressivamente menores, aspecto que desfavorece as transições.

Após o cálculo dos pesos de evidência, foi atribuído o percentual de *Expander* em relação ao *Patcher*, indicação do tamanho médio e da variância das manchas em ha, e a forma das manchas a serem simuladas a cada iteração do modelo. Foram realizadas mais de 30 simulações com diferentes valores de *Expander*, *Patcher*, forma, saturação, tamanho médio e variância no tamanho das manchas. O melhor resultado foi obtido com 0,5 de *Expander*, 0,5 de *Patcher*, 0,8 na forma das manchas geradas por *Expander*, 0,4 na forma das manchas geradas pelo *Patcher*, tamanho médio das manchas igual a 4 ha e variância igual a 3 ha. As Figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, o mapa de probabilidade que expressa a chance de determinado pixel transicionar para floresta nativa com base nos pesos de evidência calculados para as 3 variáveis e o mapa de uso da terra simulado para o passo de tempo 20, que representa o ano de 2009.

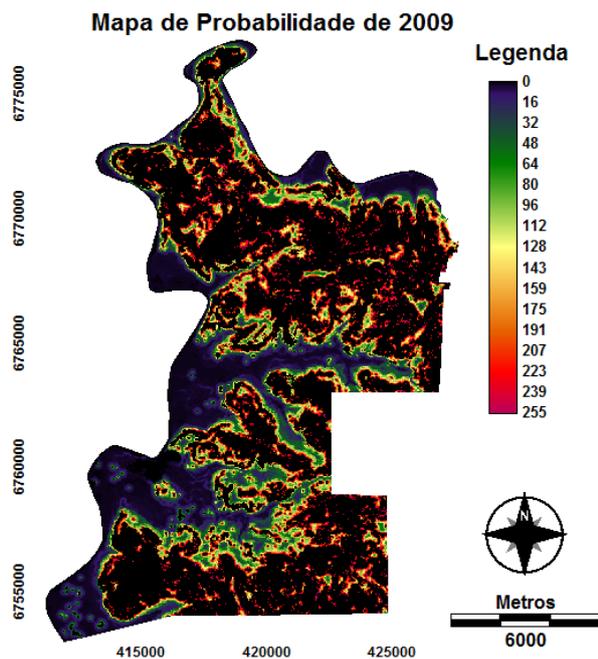


Figura 8 - Mapa de probabilidade de transição da paisagem de Roca Sales para o ano de 2009.

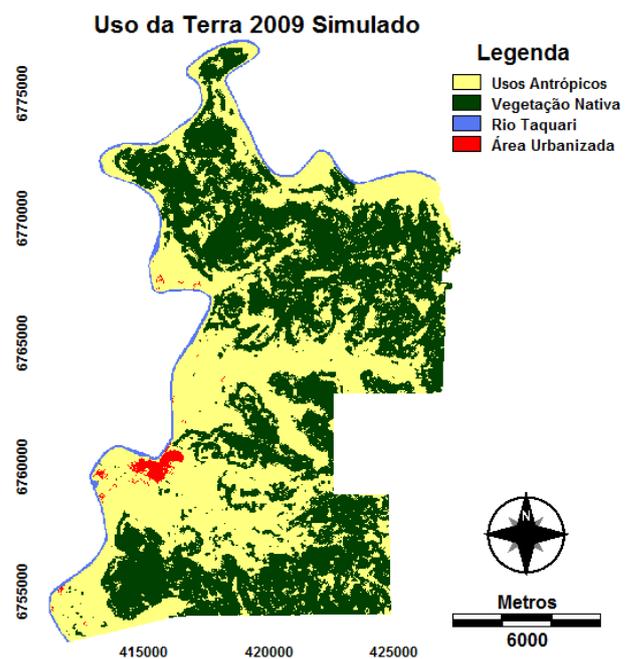


Figura 9 - Mapa de uso e cobertura da terra de 2009 simulado com base no modelo dinâmico.

A calibração do modelo dinâmico espacial foi validada de forma heurística e segundo os procedimentos de Ajuste por Múltiplas Resoluções – F (Constanza, 1989), que compara o ajuste do mapa de uso da terra de 2009 simulado com o mapa de uso da terra real e, pela Medida de Similaridade *Fuzzy* – S (Hagen, 2003), que relaciona os mapas diferença entre o uso da terra de 1989 e 2009, com o mapa diferença entre o mapa de uso da terra de 2009 real e simulado. Na sequência é calculada a diferença entre os dois mapas diferença em dois sentidos, utilizando uma função de decaimento exponencial. A Tabela 4 apresenta os índices **F** e **S** do melhor resultado simulado.

Tabela 4 – Validação espacial *F* e *S* da melhor simulação com função de decaimento exponencial.

| Janela de Varredura | F*     | S**    | S %   |
|---------------------|--------|--------|-------|
| 1 X 1               | 0,9142 | 0,5358 | 53,58 |
| 3 X 3               | 0,9309 | 0,6392 | 63,92 |
| 5 X 5               | 0,9432 | 0,6659 | 66,59 |
| 7 X 7               | 0,9475 | 0,6793 | 67,93 |
| 9 X 9               | 0,9490 | 0,6865 | 68,65 |

\* F = Ajuste por Múltiplas Resoluções; \*\* S = Medida de Similaridade *Fuzzy*.

Ao comparar o mapa de uso e cobertura da terra de 2009 (Figura 4) com o mapa de uso e cobertura da terra de 2009 simulado (Figura 9), percebe-se que a simulação apresentou boa correspondência, apesar de algumas limitações constatadas, que podem ser explicadas pela inadequada calibração do modelo ou por alguma variável não considerada. Nesse sentido, transições que ocorreram na paisagem podem não ser representadas pela modelagem e, por outro lado, transições indicadas pela modelagem podem não ter ocorrido no panorama real. Assim sendo, os processos de modelagem dinâmica espacial apresentam erros, designados de omissão e comissão. Os erros de omissão consistem em transições que ocorreram na paisagem e o modelo não foi capaz representá-las. Por sua vez, os erros de comissão estão relacionadas com transições simuladas pelo modelo que na realidade não ocorreram. A Figura 10 apresenta a tabulação cruzada do mapa de uso e cobertura real e simulado de 2009, com a indicação dos locais simulados corretamente para a transição analisada pelo modelo, os erros de omissão e de comissão da simulação.

Aceitando como satisfatórios os resultados da validação heurística e dos 2 métodos de validação dentro do contexto de vizinhança (índices *F* e *S*), foram utilizados os parâmetros do modelo de simulação calibrados para o período de 1989-2009, para simular o cenário da paisagem de 2020. Para tal, substituiu-se o mapa de uso e cobertura da terra de 1989 pelo mapa de uso e cobertura da terra de 2009 na entrada do modelo e realizou-se uma simulação com 11 passos de tempo de 1 ano, visando obter uma projeção da configuração espacial da paisagem de Roca Sales para o ano de 2020 (Figura 11).

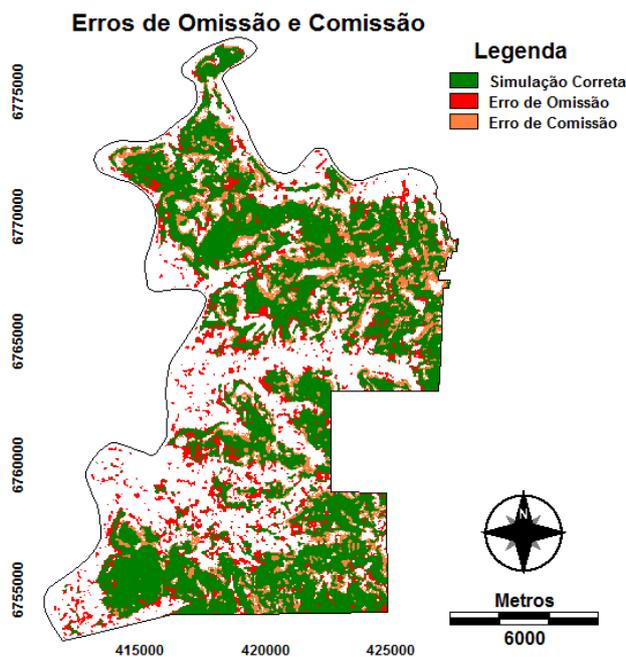


Figura 10 - Tabulação cruzada do mapa de uso de 2009 real e simulado com indicação dos erros de omissão de comissão da simulação.

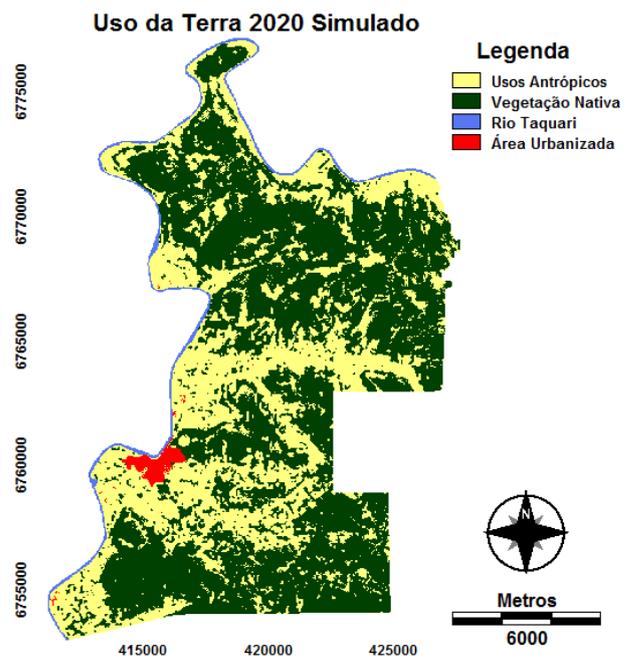


Figura 11 - Paisagem simulada do município de Roca Sales para o ano de 2020.

#### 4. Conclusões

Os resultados advindos da análise temporal e da modelagem dinâmica espacial permitiram compreender como determinadas variáveis atuam na transição da paisagem. Em função das taxas de mudanças do uso e cobertura da terra, detectadas por sensoriamento remoto, há possibilidade de compreender a dinâmica espacial da paisagem e as variáveis que atuam como agentes da mudança. As declividades acima de 20%, altitudes acima de 200 m e distâncias inferiores a 90 m, são os agentes responsáveis pela transição da paisagem no município de Roca Sales.

A simulação de cenários é uma aproximação do que pode vir a acontecer com determinado fenômeno espacial no futuro. Caso as taxas de mudanças mantiverem a mesma tendência do período de tempo anterior e as mesmas variáveis continuarem atuando para favorecer determinada transição, existe possibilidade de estimar cenários futuros. Sendo assim, os resultados podem servir como instrumentos de suporte à decisão para formular programas e projetos visando à conservação ambiental e uso adequado da terra em uma paisagem em constante transformação. Esta é a grande contribuição da modelagem dinâmica espacial.

#### Referências Bibliográficas

- Almeida, C. M. de; Camara, G.; Monteiro, A. M. V. (Org.). **Geoinformação em urbanismo: cidade real X cidade virtual**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 368.
- Bertrand, G. Paysage et Géographie Physique Globale: esquisse methodologique. **Revue Géographique des Pyrenées et du Sud-Ouest**, v. 39, n.3, p. 249-72, 1968.
- Briassoulis, H. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches**. 2000. Tese (Doutorado em Geografia), Department of Geography, University of Aegean. Lesvos, 2000. Disponível em: <http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents/htm>. Acesso em: 24 nov. 2010.
- Burrough, P. A. Dynamic modelling and geocomputation. In: Longley, P. A.; Brooks, S. M.; McDonnell, R.; MacMillan, B. ed. **Geocomputation: a primer**. Chichester: John Wiley & Sons, 1998. cap. 9, p. 165-192.
- Constanza, R. Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. **Ecological Modelling**, v. 47, p. 199-215, 1989.
- Hagen, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Scienc**, v. 17, n. 3, p. 235-249, 2003.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estimativa da População de 2009**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>>. Acesso em: 15 nov. 2012.
- Ponzoni, F. J.; Shimabukuru, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. p. 136.
- Santos, R. F. dos. **Planejamento Ambiental - teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. p. 184.
- Soares Filho, B. S. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. 1998. 299 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), São Paulo. 1998
- Jensen, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. p. 604.
- White, R.; Engelen, G. High resolution integrated modeling of the spatial dynamics of urban and regional systems. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 24, p. 383-400, 2000.
- Wegener, M.; Gnad, F.; Vannahme, M. The time scale of urban form. In: Hutchinson, B.; Batty, M. (Ed.). **Advances in urban systems modeling**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 175-197.
- Wolfram, S. Statistical mechanics of cellular automata. **Review of Modern Physics**, v. 55, p. 601-643, 1983.