



Revista Brasileira de Cartografia (2010) N° 63/4, p. 527-544  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **ANÁLISE TEMPORAL E MODELAGEM AMBIENTAL DA COBERTURA FLORESTAL NATIVA DO MUNICÍPIO DE ROCA SALES - RS**

*Temporal Analysis and Environmental Modeling of Native Forest in Roca Sales Municipality - RS*

**Juliana Fava e Silva<sup>1</sup>, Rafael Rodrigo Eckhardt<sup>1,2</sup> & Claudete Rempel<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Centro Universitário UNIVATES  
Centro de Ciências Biológicas e da Saúde – CCBS  
Rua Avelino Tallini, 171, bairro Universitário, Caixa Postal: 155, Lajeado / RS, CEP: 95900-000  
juliana\_favaesilva@yahoo.com.br  
[rafare@univates.br](mailto:rafare@univates.br), [crempel@univates.br](mailto:crempel@univates.br)

<sup>2</sup>Centro Universitário UNIVATES  
Centro de Ciências Exatas Tecnológicas – CETEC/ Engenharia Ambiental  
Rua Avelino Tallini, 171, bairro Universitário, Caixa Postal: 155, Lajeado / RS, CEP: 95900-000

*Recebido em 13 Setembro, 2010/ Aceito em 09 Novembro, 2010*  
*Received on September 13, 2010/ Accepted on November 09, 2010*

### **RESUMO**

A disponibilidade de imagens de satélite de uma mesma região da Terra, espaçadas no tempo, permite a detecção de mudanças no uso e cobertura da terra e a elaboração de modelos de simulação de cenários futuros. Este estudo visa realizar a análise temporal da floresta nativa do Bioma Mata Atlântica no município de Roca Sales/RS, nos anos de 1989, 1999 e 2009, e organizar um modelo dinâmico espacial para a projeção de um cenário futuro das áreas com floresta nativa para o ano de 2020. A análise temporal da paisagem foi realizada mediante comparação recursiva de imagens do satélite Landsat 5 classificadas e o modelo dinâmico espacial foi elaborado no *software* Dinamica. Os resultados mostraram que as áreas agropecuárias abandonadas no município estão sendo progressivamente convertidas para floresta nativa, principalmente em áreas com elevadas altitudes e declividades. As áreas de floresta nativa registraram incremento de 76,45% nos 20 anos analisados e, pelo cenário futuro gerado com a modelagem dinâmica espacial, as tendências indicam uma manutenção do processo de regeneração natural da cobertura florestal.

**Palavras chaves:** Sensoriamento Remoto, Paisagem, Análise Temporal, Modelagem Dinâmica Espacial.

### **ABSTRACT**

The availability of satellite images from the same region of the Earth, spaced in the time, allows the detection of land use and land cover changes and the future scenarios development by simulation models. This paper aims to perform temporal analysis of the native forest of the Mata Atlântica Biome, located in Roca Sales/RS municipality, for the years 1989, 1999 and 2009. Other objective is organizing a spatial dynamic model to project a future scenario of the native forest to the year 2020. The landscape temporal analyses were realized by recursive comparison of Landsat 5 satellite classified images and the spatial temporal model was developed on Dinamica software. The results showed that the abandoned agricultural areas in Roca Sales are being progressively converted into native forest, mainly in areas with high elevation and high slopes. The native forests increased 76.45% on the landscape analyzed in 20 years. By the year 2020, the

tendency points towards the maintenance of the natural forest cover regeneration process.

**Keywords:** Remote Sensing, Landscape, Temporal Analysis, Spatial Dynamics Modeling.

## 1. INTRODUÇÃO

A História de mais de 4,5 bilhões de anos do planeta Terra é longa e complexa, repleta de constantes transformações capazes de evidenciar uma sucessão de estados que se alternam entre situações de não-equilíbrio e equilíbrio (SANTOS, 2007), como consequência de causas naturais, sobre as quais não se tem controle, e mais recentemente, antropogênicas. As ações humanas promovem a ocupação do espaço, seja para agricultura, seja para a exploração de matérias-primas, ou para a construção de estruturas para a vida em sociedade. Ao longo da evolução, o ser humano promoveu diversas modificações nas características de seu ambiente, resultando em diferentes paisagens.

Segundo Bertrand (1968), paisagem consiste em uma determinada porção do espaço que resulta da combinação dinâmica dos elementos físicos, biológicos e antrópicos, os quais interagem dialeticamente 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. A documentação da condição atual de uso e cobertura da terra e a detecção de mudanças no tempo são de significado central para muitas atribuições dos órgãos de planejamento e do meio ambiente. Dados espaciais atualizados do uso e cobertura da terra são necessários tanto como base na tomada de decisões para o planejamento de medidas relevantes de proteção à natureza, como também para o controle sobre o êxito de tais medidas (LANG e BLASCHKE, 2009). 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.

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. É um elemento sensível às condições e tendências

da paisagem, reagindo distinta e rapidamente às variações. Seu estudo permite conhecer, por um lado, as condições naturais do território e, por outro lado, as influências antrópicas recebidas, podendo-se inferir, globalmente, a qualidade do meio. A delimitação da vegetação em datas diferentes indica as mudanças, sua direção e a velocidade ao longo do tempo, permitindo reconstruir os cenários passados, compreender o cenário atual e modelar cenários futuros. O mapeamento da vegetação é a forma mais comum encontrada para a tomada de decisões relativas à conservação de ecossistemas naturais ou à recuperação da cobertura vegetal.

### 1.1 Sensoriamento Remoto e SIG

Uma das mais importantes ferramentas para o monitoramento ambiental das mudanças das paisagens consiste no uso de dados provenientes de sensores a bordo de aeronaves e satélites, aspecto que permite a cobertura de extensas áreas, aumento da abrangência do monitoramento e a diminuição dos custos. Além disso, as imagens de satélite apresentam características de repetitividade que permitem seguir os processos ambientais ao longo do tempo (BATISTELLA e MORAN, 2008). A interpretação das imagens obtidas pelos sensores remotos permite a elaboração de mapas que expressam as classes de uso e cobertura da terra e o acompanhamento das mudanças espaciais e temporais da paisagem (SANTOS, 2004).

Segundo Lang e Blaschke (2009), ações de planejamento das paisagens e do meio ambiente permitiram o surgimento das raízes dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), que utilizam operações matemáticas e métodos computacionais para o tratamento das informações digitais. Entre as principais utilizações destacam-se a produção de mapas, a análise espacial e o banco de dados geográfico, com funções de armazenamento, cruzamento e recuperação de dados (CÂMARA e MEDEIROS, 1998). Na opinião de Naveh (1995), os SIGs e o Sensoriamento Remoto consistem nas “*mais importantes ferramentas holísticas para a análise, planejamento e gestão da paisagem*”, podendo fornecer valiosas contribuições no apoio aos cada vez mais complexos projetos de planejamento.

## 1.2 Análise temporal da paisagem

Para Briassoulis (2000), mudanças de uso da terra estão relacionadas com transformações quantitativas na área (aumento ou diminuição) de determinada classe de uso. As transformações podem significar conversão de um uso em outro ou modificação de certo tipo de uso (JONES e CLARK, 1997). A análise de dados obtidos por sensores remotos em apenas uma data visando extrair informações importantes biofísicas 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).

A disponibilidade de imagens de satélite, de uma mesma região da Terra, espaçadas no tempo, e das ferramentas computacionais presentes nos SIGs permitem que sejam elaboradas comparações, utilizando a dimensão temporal como uma qualidade dos dados adquiridos nos distintos instantes, qualificando as informações obtidas. Esta função do sensoriamento remoto, destinada à análise dos fenômenos temporais é conhecida por Detecção de Mudanças no Uso e Cobertura da Terra (HUANG *et al.*, 2000), como por exemplo, na evolução dos desmatamentos, crescimento urbano, monitoramento agrícola, entre outras aplicações.

Segundo Reitz *et al.*, (1983), o Rio Grande do Sul sofreu um declínio representativo na cobertura vegetal desde o século passado, principalmente a partir das imigrações alemã e italiana. Na atualidade existem resquícios de mata nativa somente nas regiões marginais dos cursos de água, em áreas de maior altitude e declividade e em poucas zonas preservadas. Estudos recentes apontaram que a área coberta por florestas naturais no Estado do Rio Grande do Sul aumentou 11,91% de 1982 a 2000 utilizando análises e interpretações de imagens de satélites. A área atual é composta por 13,5% de florestas nativas em estágio médio e avançado e 4,03% em estágio inicial de sucessão (RIO GRANDE DO SUL, 2002).

Estudos de evolução temporal realizados em uma bacia hidrográfica localizada próxima à área de estudo e com características físicas semelhantes apresentaram resultados similares aos obtidos no Estado do RS (REMPEL *et al.*, 2001). Outro estudo de evolução temporal do uso e cobertura da terra foi realizado no município de Teutônia por

Altmann *et al.* (2009). Esse último estudo apontou, inclusive, uma intensificação na regeneração das áreas com vegetação nativa, indicando que existe uma tendência natural e atual de regeneração e recuperação das áreas florestais suprimidas no passado nas regiões serranas do Rio Grande do Sul.

## 1.3 Modelagem dinâmica espacial

A paisagem consiste em uma unidade inerentemente dinâmica e as representações estáticas comumente utilizadas nos SIG não os capturam de forma adequada. Segundo Soares Filho (1998), para construir a dinâmica da paisagem é necessário, em primeiro lugar, mapear os padrões de uso do solo, para com isso avaliar como que cada elemento da paisagem se relaciona com o outro espacialmente e temporalmente. 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 se possui uma dimensão temporal explícita, se suas entradas e saídas variam com o tempo e se seus estados dependem de estados anteriores. Uma forma simples de modelo dinâmico é o estático comparativo, cujo objetivo é representar a estrutura estática de sistemas em um instante de tempo sem recorrer a explicações de mudanças de estrutura ao longo do tempo (BATTY, 1976). Uma sequência de modelos estáticos comparativos é chamada de modelo recursivo, no qual o estado final de um período de tempo serve como estado inicial do período subsequente (WEGENER *et al.*, 1986).

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, isto é, 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 (a própria célula em consideração e todas as demais

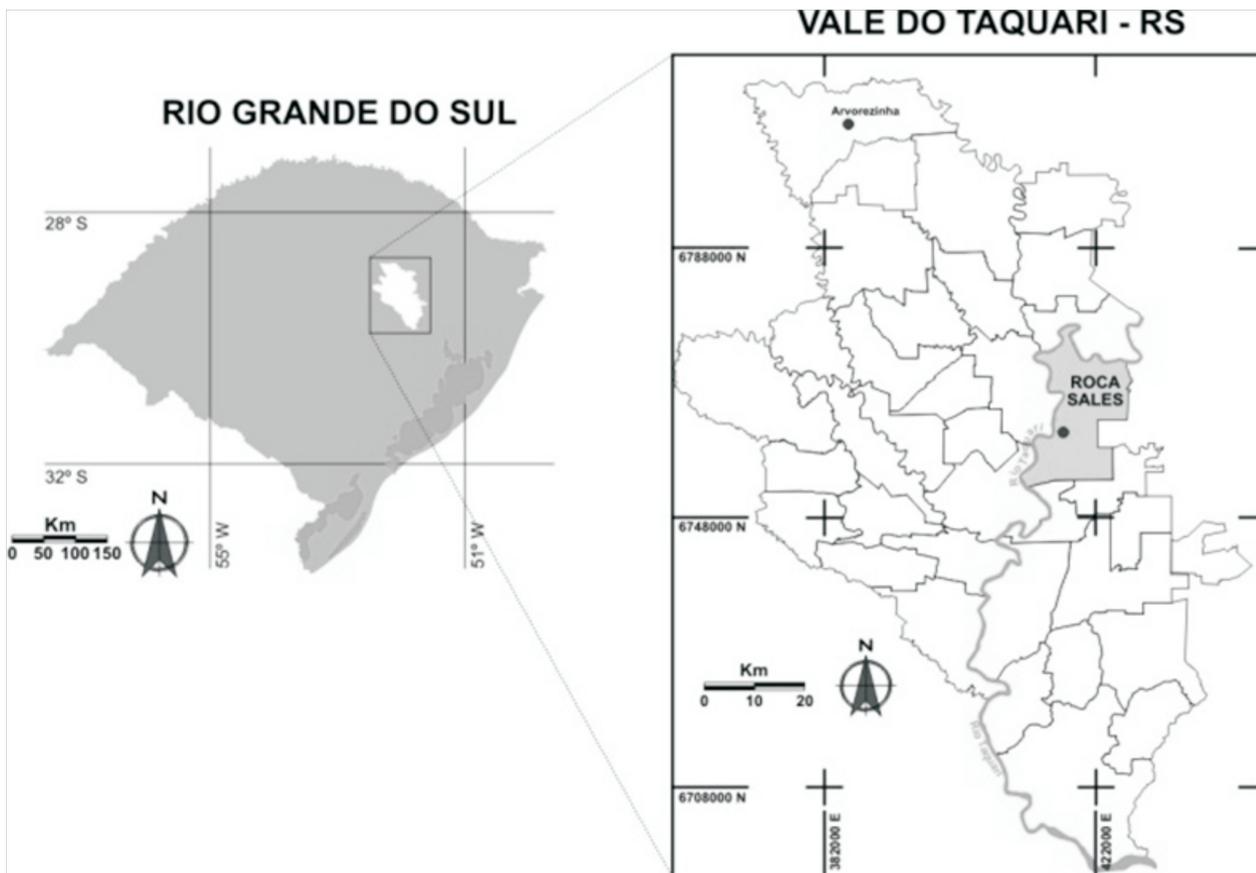


Fig. 1 - Localização do município de Roca Sales.

células localizadas nas suas adjacências imediatas) 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. Pela abordagem da modelagem dinâmica espacial, baseada em autômatos celulares, o espaço é representado por um mosaico de células, geralmente de tamanhos e formatos idênticos (WHITE e ENGELAN, 2000). Sobre cada célula de um autômato celular são aplicadas regras de transição. Regras de transição determinam quando e por que o estado de uma célula se altera e podem ser qualitativas ou quantitativas. O mecanismo de aplicação das regras de transição baseia-se na vizinhança de uma célula, fato que reflete nas mudanças estritamente locais geradas.

Modelos dinâmicos espaciais, baseados em autômatos celulares, tornaram-se populares por apresentarem simplicidade operacional, flexibilidade,

por gerar uma dinâmica que pode reproduzir processos tradicionais de mudanças e articular-se com dados matriciais, comumente usados em SIG (ALMEIDA *et al.*, 2003). De acordo com Almeida *et al.* (2007), os modelos baseados em autômatos celulares ainda constituem uma das melhores técnicas atualmente disponíveis para responder às necessidades e interesses das investigações acerca da dinâmica dos usos do solo urbanos e regional.

## 2. OBJETIVO

O estudo visa realizar a análise temporal das áreas florestais nativas da paisagem do município de Roca Sales, localizado na região do Vale do Taquari do Rio Grande do Sul, no período de 1989 a 2009 e implementar um modelo dinâmico espacial para a projeção de um cenário das áreas com vegetação nativa no município para o ano de 2020.

## 3. METODOLOGIA

A sede do município de Roca Sales localiza-se a  $51^{\circ}52'26''$  W e  $29^{\circ}17'13''$  S (Fig. 1), apresenta área de 208,34 km<sup>2</sup> e 10.468 habitantes (IBGE,

2009). Os procedimentos metodológicos realizados para executar a análise temporal e a modelagem dinâmica espacial das áreas de vegetação nativa do município de Roca Sales foram divididas em duas etapas: evolução temporal recursiva das áreas de vegetação nativa e modelagem dinâmica espacial da vegetação nativa de Roca Sales.

### 3.1 Materiais e *software* utilizados

- Bandas TM 3, 4 e 5 do satélite Landsat 5 dos anos de 1989, 1999 e 2009;
- Cartas topográficas de Encantado (SH-22-V-D-II-1) e Lajeado (SH-22-V-D-II-3) em escala 1:50.000;
- Aparelho GPS - *Global Positioning System*;
- *Software* Envi 4.5;
- *Software* Idrisi Andes;
- *Software* Dinamica 2.4.

### 3.2 Procedimentos metodológicos

A análise temporal da paisagem do município de Roca Sales foi realizada a partir de um conjunto de imagens TM do satélite Landsat 5, com 30 metros de resolução espacial, obtidas gratuitamente do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. A investigação foi realizada para as datas de 20/09/1989, 16/09/1999 e 26/08/2009, período que compreende 20 anos. Do conjunto das 7 bandas disponibilizadas pelo sensor TM do satélite Landsat 5, foram utilizadas as bandas 3 (Vermelho), 4 (Infravermelho Próximo) e 5 (Infravermelho Médio) para a geração dos cenários de uso e cobertura da terra. As bandas 3, 4 e 5 permitem a obtenção de resultados equivalentes ao uso de todas as bandas disponíveis, com a vantagem de reduzir a dimensão espectral.

#### 3.2.1 Pré-processamento das imagens de satélite

Os procedimentos metodológicos relacionados com o pré-processamento das imagens de satélite, como a correção radiométrica, o georreferenciamento e o recorte foram realizados no software ENVI 4.5, enquanto que a classificação supervisionada das imagens de satélites foi executada no SIG Idrisi Andes. A técnica de correção radiométrica utilizada foi a subtração de objetos escuros (DOS - *Dark Object Subtraction*) para

reduzir os efeitos atmosféricos. Esta técnica considera que os objetos mais escuros da imagem deveriam ser negros, mas que, por efeito do espalhamento atmosférico valores de reflectância são adicionados para estas áreas. Este método reduz os efeitos do espalhamento de *Rayleigh* (KUKKO, 2004).

O georreferenciamento consiste em um processo que concede a uma imagem um sistema de coordenadas e corrige as deformações decorrentes do processo de aquisição. 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. As imagens de satélite de 1989 e 1999 foram registradas utilizando a imagem georreferenciada de 2009 como referência. Esta etapa também foi realizada com a marcação de 15 pontos de controle, com controle do RMS de até 1 pixel. A distribuição dos pontos de controle foi realizada de modo que cada quadrante da área de estudo recebesse, pelo menos, 20% do total de pontos.

Para imagens com resolução espacial de 30 metros, como as do sensor TM a bordo do satélite Landsat 5, a escala de trabalho que permite extrair a maior quantidade de informação é aquela em torno de 1:100.000 (FLORENZANO, 2002; LIU, 2006), classificada como semi-detalhada (CENDRENO, 1989). Por último, a disponibilidade do limite municipal de Roca Sales permitiu a criação de uma máscara para realizar o recorte das bandas georreferenciadas.

#### 3.2.2 Classificação das imagens de satélite

As áreas florestais nativas de Roca Sales, que consistem de Floresta Estacional Decidual do Bioma Mata Atlântica (BRASIL, 2006), 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 (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007). As amostras de treinamento utilizadas para treinar o classificador foram coletadas sobre uma composição colorida,

procurando compreender toda a variação dos níveis de cinza das áreas florestais nativas.

As imagens temáticas resultantes das áreas florestais, para cada ano analisado, 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. A técnica de classificação digital utilizada consiste em um método pelo qual os pixels da imagem são associados a classes temáticas, de acordo com características espectrais.

Em virtude do presente estudo focar na dinâmica temporal das áreas florestais nativas, a área urbanizada em cada período foi vetorizada com o auxílio das composições coloridas RGB543 e da Banda 3 de cada ano avaliado. 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.

### 3.2.3 Análise temporal da paisagem

Uma vez que as imagens utilizadas no estudo são do mesmo satélite e apresentam resolução espacial igual (30 metros), uma série de técnicas de análise temporal poderia ser aplicada diretamente ao conjunto de imagens. Podem ser implementadas desde comparações ou mesmo razões diretas entre as bandas entre os distintos períodos de tempo na determinação das mudanças ou determinar as mudanças da paisagem com base na comparação dos resultados advindos do processo de classificação supervisionado da imagem de satélite de cada período (ALTMANN *et al.*, 2009).

De acordo com Coppin *et al.*, (2004), a principal vantagem dessa última técnica reside na independência entre as imagens temporais, fato que minimiza os problemas de correção e de normalização radiométrica, além de que, acessoriamente, um bom esquema de classificação pode auxiliar no foco da detecção de mudanças ao isolar as transformações que não importam. Assim sendo, optou-se por analisar a dominância de cada uso da terra no instante das datas observadas, reconstituindo a evolução temporal da paisagem de Roca Sales, com base nos resultados advindos dos processos de classificação das imagens de 1989, 1999 e 2009. A Fig. 2

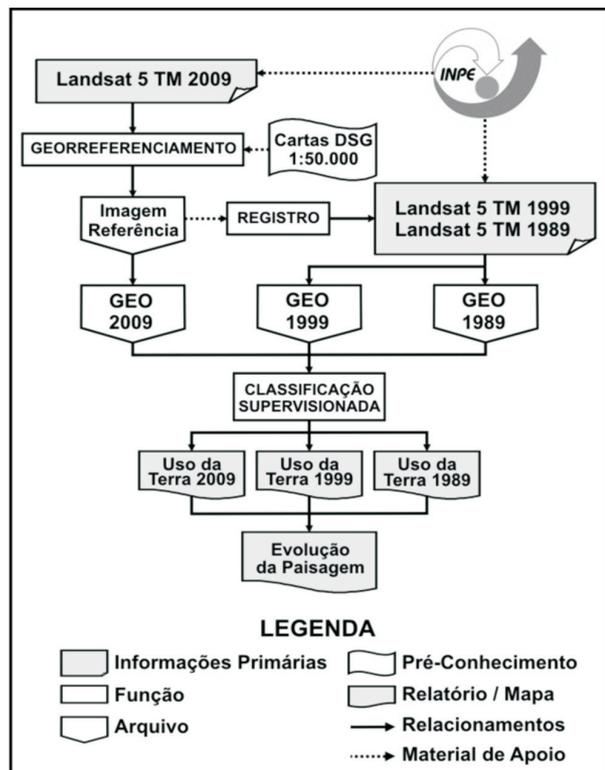


Fig. 2 - Fluxograma com a metodologia da etapa de análise temporal da paisagem da área de estudo.

apresenta o fluxograma metodológico da etapa da evolução temporal.

Além disso, os arquivos matriciais expressando as classes de uso da terra dos anos de 1989 e 2009 de Roca Sales são necessários para o cálculo da matriz global e anual de transição da paisagem no período analisado, a estruturação e calibração do modelo dinâmico espacial e, por último, para estimar um cenário futuro para a cobertura vegetal de Roca Sales.

### 3.3 Modelagem dinâmica espacial

Por se tratar de um tipo genérico de autômato celular, foi escolhido, neste estudo, o *software* Dinamica 2.4 (SOARES FILHO *et al.*, 2010) como plataforma para o desenvolvimento do modelo espaço-temporal de análise e simulação das mudanças na paisagem de Roca Sales, ocorridas entre o período de 1989-2009. O Dinamica tem sido usado para modelar vários fenômenos dinâmicos como o desflorestamento, a dinâmica urbana, a regeneração florestal, entre outros. O objetivo desta etapa do estudo pretende mostrar a tendência da dinâmica da paisagem e identificar seus principais vetores de mudanças e, com isso, possibilitar antever possíveis configurações

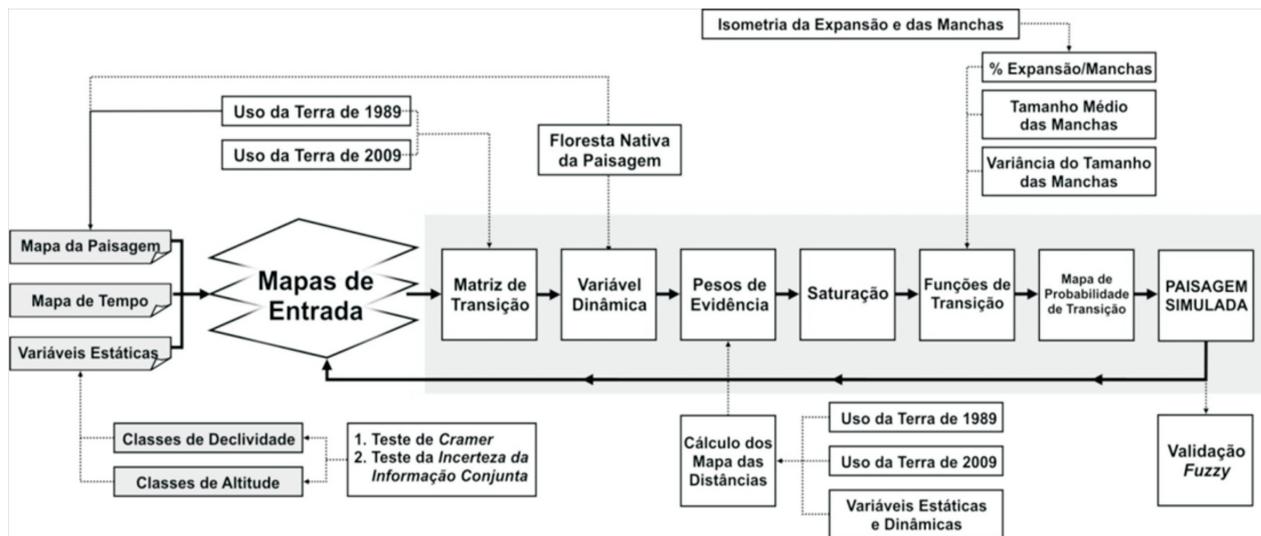


Fig. 3 - Fluxograma com a metodologia da etapa da modelagem dinâmica espacial da paisagem de Roca Sales.

espaciais resultantes desse cenário tendencial e suas implicações ambientais.

De maneira geral, as etapas de construção do modelo em questão consistiram em: 1) organização da base digital com mapas multitemporais de 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 sistema de simulação visando à reprodução da dinâmica da vegetação nativa observada; 6) prognóstico para 2020, utilizando a tendência do período de 1989-2009. A Fig. 3 apresenta a arquitetura do Dinamica e a estruturação do modelo dinâmico espacial.

### 3.3.1 Mapas de uso da paisagem

Na etapa de análise temporal da paisagem de Roca Sales foram classificadas as imagens do satélite Landsat 5, do anos de 1989, 1999 e 2009, resultando no mapa da paisagem, isto é, a situação de uso e cobertura da terra desses períodos de tempo. Para a estruturação da modelagem dinâmica espacial foram utilizadas somente as informações de 1989 e 2009, período que compreende 20 anos. Foram delimitadas 5 classes de uso: as áreas com floresta nativa, área urbanizada, usos agropecuários, hidrografia e background, que consiste na cor de fundo das imagens de satélite recortadas.

### 3.3.2 Matriz global e anual de mudança da paisagem

A matriz de transição consiste em uma taxa de mudança da paisagem em um dado período de tempo. No presente estudo, com base na tabulação cruzada dos mapas de uso e cobertura da terra dos anos de 1989 e de 2009, foi calculada a matriz de transição global para os 20 anos considerados e a matriz de transição anual decomposta. A matriz de transição anual é utilizada no modelo dinâmico espacial para a calibração do modelo e a para a simulação do cenário futuro.

### 3.3.3 Variáveis estáticas e dinâmicas

As variáveis consistem, resumidamente, nos fatores ou evidências cartográficas que contribuem na magnitude e na localização das mudanças ocorridas na paisagem. As variáveis podem ser classificadas como estáticas, com a delimitação prévia da variável em classes temáticas, e dinâmicas, variáveis contínuas e que se alteram na execução do modelo. Para modelar as mudanças da paisagem de Rocas Sales foram avaliadas como variáveis estáticas a altitude (modelo numérico do terreno - MNT), obtido a partir da interpolação das curvas de nível das cartas topográficas do exército em escala 1:50.000, e a declividade do terreno, gerado a partir do MNT. As duas variáveis estáticas foram categorizadas em classes temáticas e utilizadas no modelo como variáveis categóricas. A terceira variável utilizada, que consiste na distância das áreas florestais, foi utilizada diretamente no *software* Dinamica como variável dinâmica. A cada iteração

do modelo, o software calcula uma nova distância para esta variável.

### 3.3.4 Pesos de Evidência

O *software Dinamica* relaciona as taxas de mudanças da paisagem, expressas pelas matrizes de transição da paisagem, com as classes temáticas e os melhores intervalos de distância do conjunto de variáveis que supostamente controlam a localização das mudanças. O resultado consiste em um peso de evidência (*Weight of evidence* -  $W+$  e  $W-$ ), que indica o comportamento da mudança da paisagem para cada variável considerada. As variáveis são combinadas pelo somatório de seus pesos de evidência, com o objetivo de gerar os mapas de probabilidade, os quais indicam as áreas mais favoráveis para determinada transição (SOARES FILHO *et al.*, 2004).

Os pesos de evidências são expressos por valores  $W+$  (peso que favorece uma transição na paisagem em determinada classe ou faixa de distância em determinada variável) e pelo  $W-$  (peso que desfavorece uma transição na paisagem em determinada classe ou faixa de distância em determinada variável). No entanto, deve-se assumir como única condição que as variáveis sejam espacialmente independentes. Para assegurá-la, foram utilizados os testes de *Cramer* ( $V$ ) e da *Incerteza da Informação Conjunta*. Segundo Bonham-Carter (1994), um coeficiente *Cramer* abaixo de 0,5 indica que o par de evidências ou par de variáveis em questão não apresenta dependência, de modo que podem ser mantidas e utilizadas na modelagem.

### 3.3.5 Calibração e Validação do Modelo

A estruturação do modelo dinâmico espacial da paisagem de Roca Sales teve início com a definição das 5 classes de uso e cobertura da terra e o número de passos de tempo a serem simulados (20 anos). Na sequência foi inserido no modelo o mapa de uso e cobertura da terra inicial (do ano de 1989), o mapa de tempo de permanência fictício (requerido no modelo para guardar o tempo permanência de cada célula em seu estado atual) e as duas variáveis estáticas. Na opção “Mapas Dinâmicos” foi marcada a classe de uso e cobertura da terra que corresponde às áreas florestais nativas, como já descrito anteriormente.

Na sequência foram calculadas as matrizes de transição global e anual da paisagem no período de 1889 - 2009, avaliadas as melhores faixas de distâncias na variável dinâmica e calculados os pesos de evidência para as três variáveis utilizadas. A matriz anual de transição da paisagem e os pesos de evidência foram inseridos no modelo dinâmico, permitindo gerar os mapas de probabilidade de mudança, os quais indicam as áreas mais favoráveis para determinada transição.

Outro componente na estruturação do modelo, **as funções de transição**, opera sobre os mapas de probabilidade gerados, com o objetivo de realizar as quantidades desejadas de mudanças mediante o sorteio de células, após o ordenamento suas probabilidades. As quantidades de mudanças são determinadas *a priori* pela matriz de transição. Como regra local do autômato celular, o *Dinamica* emprega duas funções de transição (*Expander* e *Patcher*) para reproduzir os padrões espaciais, cujos parâmetros de entrada são o tamanho médio, a variância e a forma das manchas de mudanças a serem simuladas (SOARES FILHO *et al.*, 2002).

Por convenção, o *Dinamica* realiza primeiro as transições por *Expander* (expansão ou contração) das manchas de determinada classe de uso e cobertura da terra existente previamente e depois por *Patcher*, que gera ou forma novas manchas por um mecanismo de nucleação. O percentual de transições executados pela função *Expander* em relação ao *Patcher* precisa ser definido pelo modelador. O software realiza iterações até que as transições alcancem a taxa de mudança, expressa pela matriz de transição anual calculada com base no padrão de mudança da paisagem de 1989-2009.

Durante a etapa de execução do modelo, o *software Dinamica* realiza a leitura de todos os dados de entrada, os parâmetros calculados (matriz de transição anual e os pesos de evidência) e os parâmetros fornecidos pelo modelador para as funções de transição. Na sequência, o *Dinamica* gera os mapas das probabilidades espaciais de transição de cada célula do terreno sofrer uma transição de  $i$  para  $j$ . Estes mapas são utilizados pelas funções de transição na eleição de células a serem transicionadas. O resultado gera um mapa de uso e cobertura da terra simulado para cada passo de tempo. O conjunto desses mapas

reconstitui a dinâmica espacial de mudança da paisagem.

O último procedimento consiste na validação, que consiste na comparação dos resultados do modelo com uma situação de referência. Inicialmente, foi realizada uma avaliação heurística do último passo de tempo simulado (2009 simulado) com o mapa de uso e cobertura da terra de 2009, obtido pela classificação da imagem de satélite. A validação heurística permite avaliar, em macroescala, se a paisagem simulada no último passo de tempo apresenta correspondência com o mapa de uso e cobertura da terra do ano de 2009.

A validação matemática do modelo diz respeito apenas à localização espacial das mudanças, não a suas quantidades, visto que as quantidades são determinadas *a priori* pela matriz de transição. Mesmo que os mapas não correspondem exatamente pixel-a-pixel, ainda assim podem apresentar padrões espaciais similares e da mesma forma, correspondência espacial dentro de certa vizinhança. Diversas técnicas de comparação de mapas foram desenvolvidas, embora não haja um consenso sobre qual a técnica mais apropriada, nem qual ajuste definiria um limiar de aceitação. Incorporado na sua plataforma, o Dinamica apresenta dois métodos de comparação dos modelos de simulação dentro de um contexto de vizinhança.

O procedimento de **Ajuste por Múltiplas Resoluções** (*Goodness of Fit - F*), introduzido por Conzanza (1989), compara o ajuste do mapa simulado com o mapa real em função de uma janela de varredura crescente. É um procedimento mais simples, pelo fato de somente considerar o mapa simulado com o mapa real, gerando um índice com valor mais elevado. Valores **F** aceitáveis apresentam valor acima de 0,8. A **Medida de Similaridade Fuzzy - S** (HAGEN, 2003) está baseada no conceito de imprecisão da localização, no qual a representação de uma célula é influenciada pela própria célula e, menos, pelas células de sua vizinhança. O cálculo é realizado relacionando os mapas diferença entre o uso e cobertura do solo inicial e final com o mapa diferença entre o uso e cobertura do solo final e simulado. Em seguida é calculada a diferença entre os dois mapas diferença em dois sentidos, utilizando uma função de decaimento exponencial, considerando janelas de

varredura com 1, 3, 5, 7, 9 e 11 células. É escolhida a similaridade global de menor valor, medida nos dois sentidos. Índices de similaridade *Fuzzy* aceitáveis apresentam valor aproximado de 0,5.

### 3.3.6 Projeção de Cenários

Após obter as melhores medidas de calibração do modelo de simulação de 1989 a 2009, a entrada do modelo será substituída pelo mapa de uso e cobertura da terra de 2009, com vistas à projeção de um cenário de 11 anos, correspondente ao ano de 2020. A projeção de cenários consiste em uma estimativa do que pode vir a acontecer em determinada paisagem, caso as tendências do período anterior se mantiverem no período simulado.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados em duas etapas, sendo exposta na primeira etapa a análise temporal recursiva das mudanças na paisagem de Roca Sales, no período de 1989, 1999 e 2009. Na segunda etapa é apresentado o modelo dinâmico espacial, com as taxas globais e anuais de mudança da paisagem, os pesos de evidências das variáveis que atuam na modificação da paisagem, a validação do modelo dinâmico espacial e a projeção do cenário da paisagem de Roca Sales para o ano de 2020.

### 4.1 Análise Temporal das Mudanças

#### 4.1.1 Uso e Cobertura da Terra de 1989

A classificação supervisionada da imagem de satélite de 1989 revelou que 28,57% do município de Roca Sales conservavam fragmentos florestais relictuais nativos, restritos aos topos de morros e elevadas declividades, enquanto as áreas de uso agropecuário somavam 68,85% da área. A área urbanizada e os cursos de água representavam, respectivamente, 0,48% e 2,10% da área do município (Tab. 1 e Fig. 4).

#### 4.1.2 Uso e Cobertura da Terra de 1999

A análise da imagem de satélite de 1999 revelou uma tendência de redução das áreas de uso agropecuário e um consequente aumento das áreas florestais nativas e da área urbanizada em relação à década anterior. A dinâmica da paisagem do município indica que as áreas de uso agropecuário abandonadas foram, progressivamente, regenerando

Tabela 1 - Cenário de uso e cobertura da terra de Roca Sales em 1989.

| Classe de Uso da Terra | Área (km <sup>2</sup> ) | %          |
|------------------------|-------------------------|------------|
| Usos Agropecuários     | 143,45                  | 68,85      |
| Floresta Nativa*       | 59,52                   | 28,57      |
| Área Urbanizada        | 0,99                    | 0,48       |
| Rio Taquari            | 4,38                    | 2,1        |
| <b>Total</b>           | <b>208,34</b>           | <b>100</b> |

\* Floresta Estacional Decidual (Bioma Mata Atlântica) em estágio intermediário e avançado de regeneração.

Tabela 2 - Cenário de uso e cobertura da terra de Roca Sales em 1999.

| Classe de Uso da Terra | Área (km <sup>2</sup> ) | %          |
|------------------------|-------------------------|------------|
| Usos Agropecuários     | 128,72                  | 61,78      |
| Floresta Nativa*       | 73,97                   | 35,5       |
| Área Urbanizada        | 1,27                    | 0,61       |
| Rio Taquari            | 4,38                    | 2,1        |
| <b>Total</b>           | <b>208,34</b>           | <b>100</b> |

\* Floresta Estacional Decidual (Bioma Mata Atlântica) em estágio intermediário e avançado de regeneração.

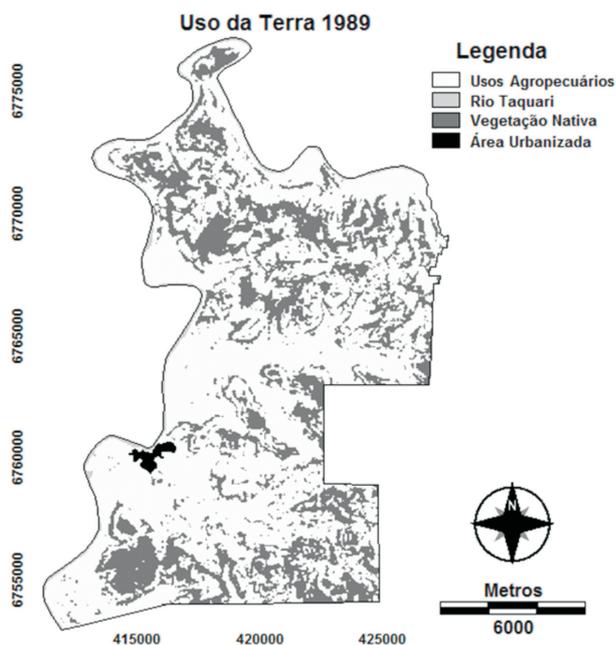


Fig. 4 - Uso da Terra de Roca Sales de 1989.

vegetação dentro de um processo natural. Em 1999 as áreas florestais nativas somavam 35,50%, as áreas de uso agropecuário totalizavam 61,78%, a drenagem manteve uma área relativa de 2,10% e as áreas urbanizadas cresceram 0,61% da área do município (Tab. 2 e Fig. 5).

#### 4.1.3 Uso e Cobertura da Terra de 2009

A análise da imagem de 2009 representa a situação atual do uso da terra do município e confirmou a tendência de regeneração das áreas florestais em áreas de uso agropecuário abandonadas, possivelmente, em função da alteração do sistema de produção agrícola para a suinocultura e a avicultura, ambas as atividades com forte representação na economia do município. Ao mesmo tempo, também ocorreu êxodo rural,

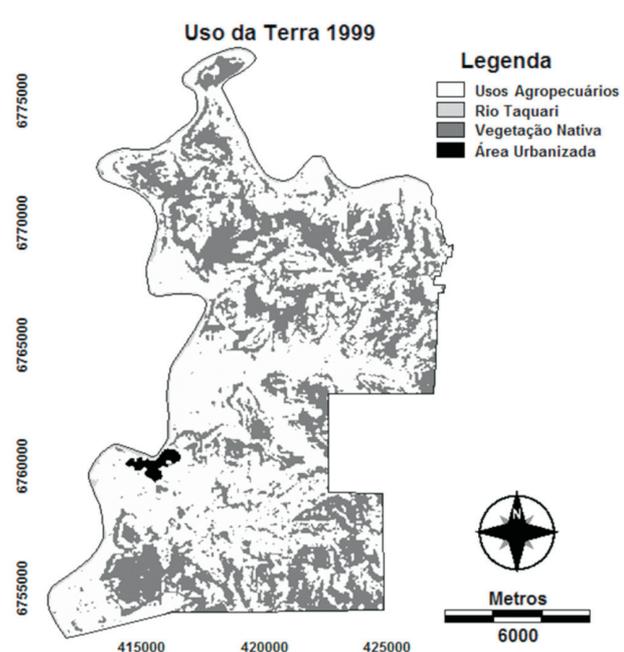


Fig. 5 - Uso da Terra de Roca Sales de 1999.

levando diversas famílias a fixarem moradia e exercerem atividades remuneradas na área urbana de Roca Sales e em outras cidades, processo que foi registrado em todo o Brasil.

Os resultados da classificação da imagem de satélite de 2009 foram validados com pontos de controle aferidos em campo com GPS, além da validação heurística. Foram aferidos 38 pontos de controle para as classes temáticas de floresta nativa e usos agropecuários, com acurácia de 92% para o mapa de uso e cobertura da terra de 2009. Para os anos de 1989 e 1999 não houve possibilidade de realizar a validação com pontos de controle terrestres. A Tab. 3 apresenta o cenário de uso da terra de Roca Sales de 2009, enquanto a Fig. 6 apresenta o mapa de uso e cobertura da terra.

#### 4.1.4 Dinâmica da paisagem de 1989-2009

A configuração espacial da paisagem, expressa pelos mapas de uso e cobertura da terra, decorre das ações naturais e antrópicas sobre esta. Assim sendo, a dinâmica da paisagem envolve, basicamente, a evolução espacial do sistema ao longo do tempo. A Fig. 7 e a Tab. 4 apresentam a síntese das mudanças e as taxas das variações das classes de uso e cobertura da terra analisadas na paisagem de Roca Sales no período de 1989 a 2009.

A análise da Fig. 7 aponta que a floresta nativa aumentou 76,45% nos últimos 20 anos em Roca Sales, decorrente do processo natural de regeneração das áreas de uso agropecuário abandonadas em declividades acentuadas. Em

Tabela 3 - Cenário de uso e cobertura da terra de Roca Sales em 2009.

| Classe de Uso da Terra | Área (km²)    | %          |
|------------------------|---------------|------------|
| Usos Agropecuários     | 97,28         | 46,69      |
| Floresta Nativa*       | 105,03        | 50,41      |
| Área Urbanizada        | 1,65          | 0,79       |
| Rio Taquari            | 4,38          | 2,1        |
| <b>Total</b>           | <b>208,34</b> | <b>100</b> |

\* Floresta Estacional Decidual (Bioma Mata Atlântica) em estágio intermediário e avançado de regeneração.

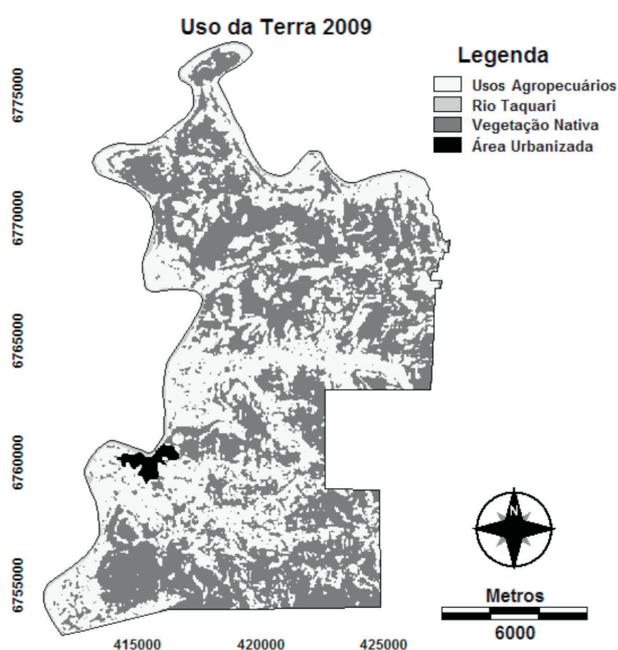


Fig. 6 - Uso da Terra de Roca Sales de 2009.

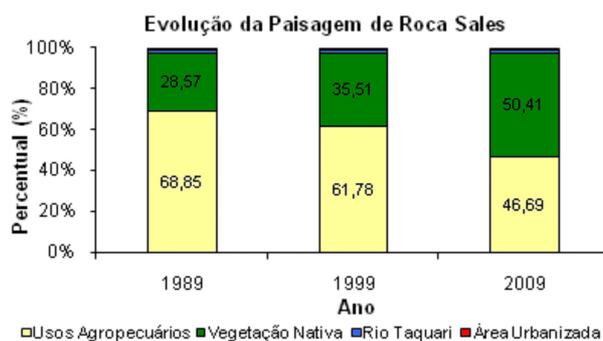


Fig. 7 - Dinâmica da paisagem de Roca Sales.

1989 as áreas florestais representavam 28,57% da área do município e em 2009 passaram a representar 50,41%, sendo que a década de 1999-2009 registrou maior incremento de vegetação nativa em comparação com a década de 1989-1999. A Fig. 8 apresenta a dinâmica da floresta nativa em Roca Sales, com base na avaliação temporal recursiva das imagens do satélite Landsat 5, de 1989, 1999 e 2009.

As áreas relictuais de floresta nativa existentes em 1989 estavam restritas aos topos de morros e encostas com elevada declividade. Conforme pode ser observado na Fig. 7, ocorreu um processo natural de regeneração por expansão no entorno dos referidos fragmentos. Por sua vez, as áreas de uso antrópico 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 da terra de 2009, percebe-se que essas áreas, apesar de apresentarem tendência de redução da área total utilizada, mantiveram-se nas áreas mais planas pela possibilidade de mecanização e maior produtividade. A facilidade de mecanização das várzeas do Rio Taquari não permitiu que o processo de regeneração registrado em todo o município se desse também na APP desse rio.

#### 4.2 Modelo dinâmico espacial de Roca Sales

As matrizes de transição global (Tab. 5) e anual (Tab. 6), 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.

Tabela 4 - 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                        | 0          |
| <b>Total</b>     | <b>208,34</b> | <b>208,34</b> | -                        | -          |

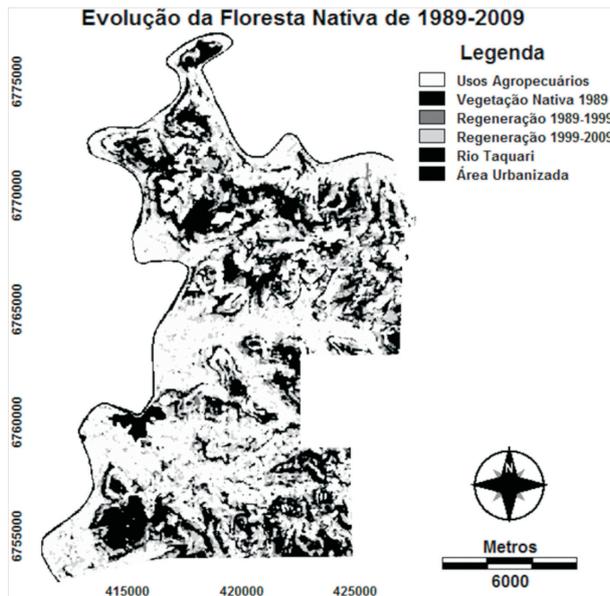


Fig. 8 - Dinâmica da Floresta Nativa em Roca Sales de 1989 até 2009.

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. Na sequência foram calculados os pesos de evidência para as 2 variáveis estáticas (Fig. 9 e 10) e 1 variável dinâmica em relação à transição analisada (Fig. 11).

Ao analisar os pesos de evidência das 3 variáveis analisadas no estudo nota-se com clareza o comportamento da regeneração da floresta nativa em áreas que apresentavam usos agropecuários em 1989. Em termos gerais, houve transição de áreas de uso agropecuário abandonadas em terrenos com elevada declividade e nos locais mais elevados, como os topos dos morros, pela dificuldade de manejar a terra, a baixa produtividade e pelo êxodo rural registrado no período em todo o Brasil. Além disso, como esses locais mantinham fragmentos florestais residuais em 1989, essas áreas

Tabela 5 - Matriz de transição global da paisagem de Roca Sales de 1989-2009.

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

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

Tabela 6 - Matriz de transição anual decomposta de 1989-2009 em Roca Sales.

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

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

contribuíram no fornecimento de sementes, favorecendo a ocorrência do processo natural de regeneração nas áreas agropecuárias abandonadas.

Em relação à variável declividade, terrenos classificados como escarpados (<100%) e montanhosos (100-45%) apresentam pesos de evidência positivos, favorecendo a transição. Declividades moderado ondulados (45-20%) até planas (3-0%) apresentam pesos de evidência negativos e, progressivamente, menores, desfavorecendo a transição.

Ao analisar os pesos de evidência da variável altitude do terreno, percebe-se que até a altitude de 200 metros os pesos são negativos, desfavorecendo a transição. Acima de 200 metros, até o limite de 591 metros, os pesos de evidências são positivos e progressivamente maiores, indicando que 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 menores de 90 metros dos fragmentos florestais nativos de 1989 favorecem a transição, apresentando assim pesos positivos. Distâncias acima de 90 metros apresentam pesos

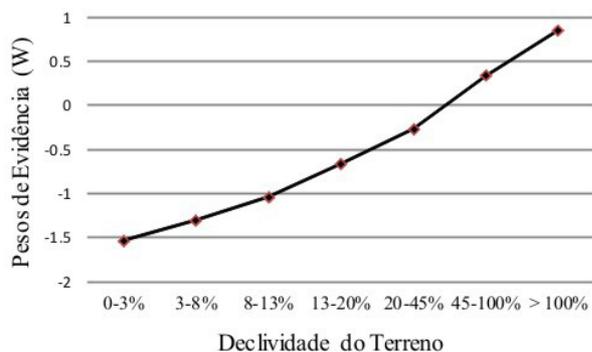


Fig. 9 - Pesos de evidência da variável categórica declividade do terreno.

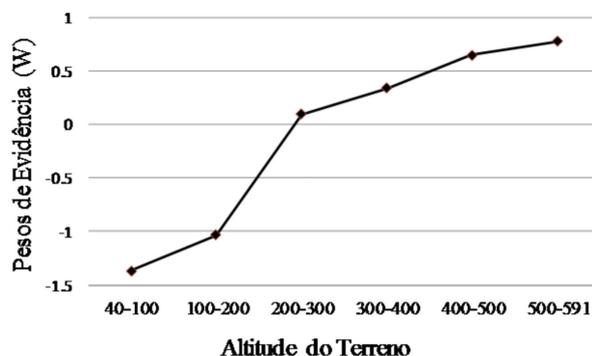


Fig. 10 - Pesos de evidência da variável categórica altitude do terreno.

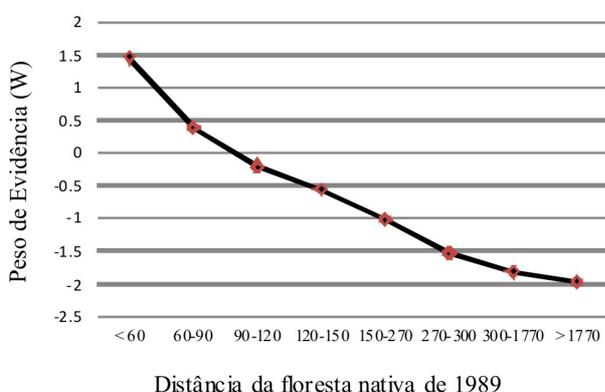


Fig. 11 - Pesos de evidência da variável dinâmica distância da floresta nativa de 1989.

progressivamente menores, aspecto que desfavorece as transições. Os pesos de evidência das 3 variáveis avaliadas no estudo comprovam quantitativamente o comportamento da transição da paisagem no município de Roca Sales de 1989-2009, aspecto observado durante a realização das atividades exploratórias de campo. Os pesos de evidência comprovam que a regeneração constatada em campo está ocorrendo principalmente por

expansão no entorno de fragmentos preservados no passado, localizados em elevadas altitudes e declividades.

Após o cálculo dos pesos de evidência, foi atribuído o % de *Expander* em relação ao *Patcher*, indicação do tamanho médio das manchas em ha, a 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 das manchas igual a 3 ha. As Fig. 12 e 13 apresentam, respectivamente, o mapa de probabilidade de transição e o mapa de uso da terra simulado do passo de tempo 20, que representa o ano de 2009.

A análise da Fig. 13 revela, nos locais apontados pelas elipses, que o modelo não registrou regeneração de floresta que ocorreu na paisagem, significando omissão do modelo. Uma vez que os locais apontados pelas elipses apresentam altitude e declividade intermediária, apesar de haver fragmentos florestais relictuais em 1989, à probabilidade de transição, calculado com base nas 3 variáveis, é baixo (Fig. 12). Pelo mesmo motivo, o modelo registrou várias transições em altas altitudes e declividades, que não ocorreram no cenário re.

Os resultados das simulações foram validados de forma heurística e segundo os procedimentos de **Ajuste por Múltiplas Resoluções - F**, introduzido por Constanza (1989), que compara o ajuste do mapa de uso e cobertura da terra de 2009 simulado com o mapa de uso e cobertura da terra real e, pela **Medida de Similaridade Fuzzy - S**, proposto por HAGEN (2003), que relaciona os mapas diferença entre o uso e cobertura do solo de 1989 e 2009, com o mapa diferença entre o mapa de uso e cobertura do solo 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 Tab. 7 apresenta os índices **F** e **S** do melhor resultado simulado.

Ao comparar o mapa de uso e cobertura da terra de 2009 (Fig. 6) com o mapa de uso e cobertura da terra de 2009 simulado (Fig. 13),

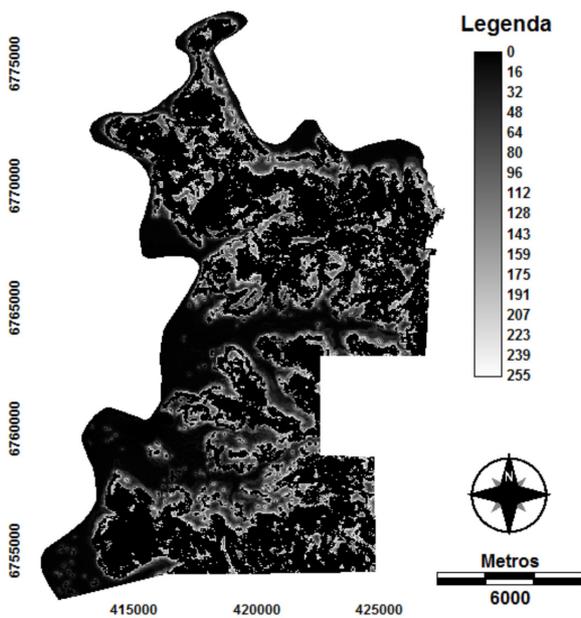


Fig. 12 - Mapa de probabilidade de transição da paisagem de Roca Sales para o ano de 2009.

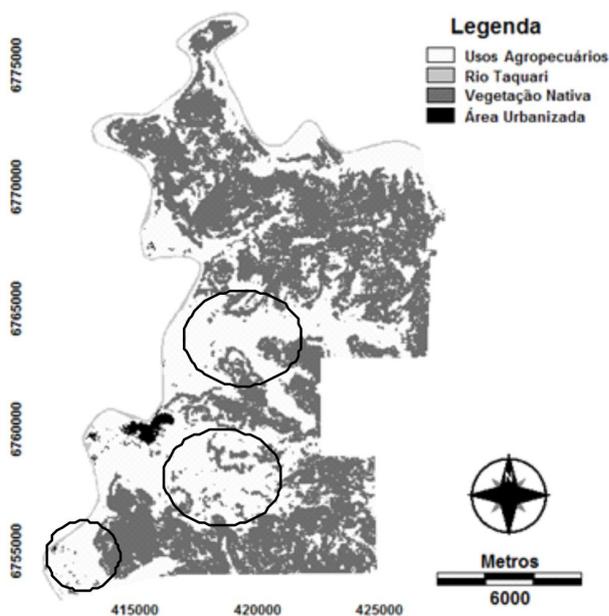


Fig. 13 - Mapa de uso e cobertura da terra de 2009 simulado com base no modelo dinâmica espacial.

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

Tabela 7 - 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               | 0,949  | 0,6865 | 68,65 |

\* F = Ajuste por Múltiplas Resoluções.

\*\* S = Medida de Similaridade *Fuzzy*.

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 Tab. 8 e a Fig. 14 apresentam 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 adequados os resultados da validação heurística e dos 2 métodos de validação dentro do contexto de vizinhança (índices F e S), apesar das limitações, 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 (Fig. 15 e Tab. 9).

Os resultados da projeção do cenário futuro indicam que as tendências atuais de transição da paisagem permanecem, significando que as áreas de uso agropecuário, localizadas no entorno de áreas com floresta nativa, em locais com altas altitudes e em terrenos com declividades acentuadas, continuarão a ser abandonadas favorecendo a regeneração natural da cobertura florestal em Roca Sales.

Tabela 8 - Matriz de erro do uso da terra de 2009 real (colunas) *versus* o uso da terra de 2009 simulado (linhas), calculado pelo comando *ERRMAT* do IDRISI.

| Uso da Terra    | Usos       |               |                 |            |             | Total Pixels | Erro C |
|-----------------|------------|---------------|-----------------|------------|-------------|--------------|--------|
|                 | Background | Agropecuários | Floresta Nativa | Urbanizada | Rio Taquari |              |        |
| Background      | 328.147    | 0             | 0               | 0          | 0           | 328.147      | 0      |
| Usos            | 0          | 84.112        | 23.442          | 0          | 561         | 108.115      | 0,222  |
| Agropecuários   | 0          | 23.462        | 93.234          | 0          | 0           | 116.696      | 0,2011 |
| Floresta Nativa | 0          | 0             | 0               | 4.872      | 0           | 4.872        | 0      |
| Área Urbanizada | 0          | 517           | 24              | 0          | 1.265       | 1.806        | 0,2996 |
| Rio Taquari     | 328.147    | 108.091       | 116.700         | 4.872      | 1.826       | 559.636      | -      |
| Total Pixels    | 0          | 0,2218        | 0,2011          | 0          | 0,3072      | -            | 0,0858 |
| Erro O          |            |               |                 |            |             |              |        |

Erro O = Erro de Omissão (expresso como proporção); Erro C = Erro de Comissão (expresso como proporção).

Kappa global = 0,8509; Coeficiente Cramer (V) = 0,8395.

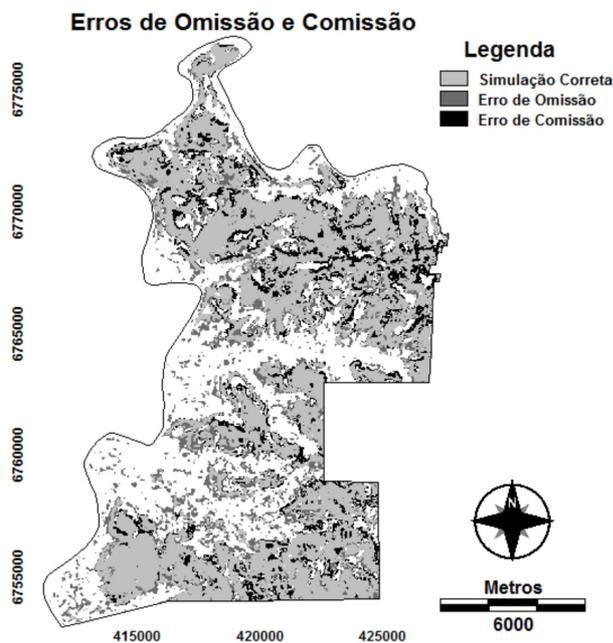


Fig. 14 - Tabulação cruzada do mapa de uso da terra de 2009 real e simulado com indicação dos acertos e erros de omissão e erros de comissão da simulação.

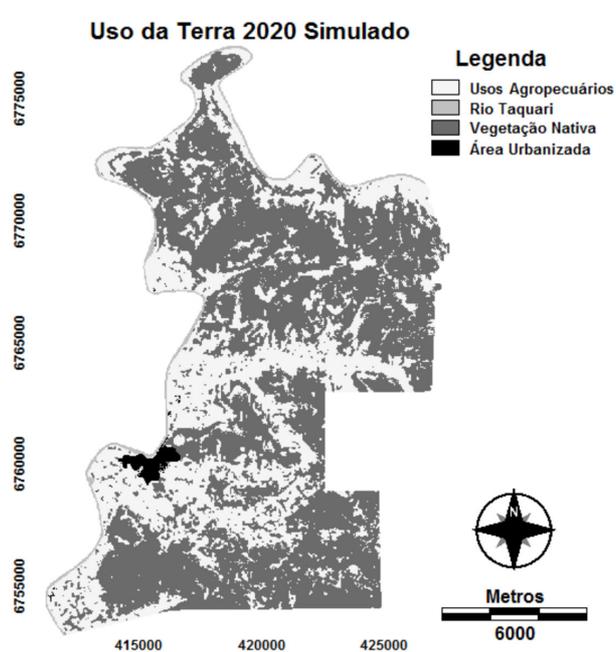


Fig. 15 - Paisagem de 2020 simulada para Roca Sales.

## 5. CONCLUSÕES

No contexto do planejamento ambiental, a disponibilidade de dados de sensoriamento remoto e de modelos de representação da dinâmica da paisagem oportuniza o acompanhamento das modificações espaciais da paisagem ao longo do tempo e permite prever, com antecedência, como a paisagem irá se comportar no futuro. Assim sendo, os referidos instrumentos podem servir de suporte à decisão para a formulação de programas e

projetos visando à conservação ambiental e o uso adequado da terra em uma paisagem em constante transformação.

Os resultados advindos da análise temporal e da modelagem dinâmica espacial permitiram compreender como determinadas variáveis atuam na transição das áreas de uso agropecuário para floresta nativa na paisagem de Roca Sales. Em função das taxas de mudanças do uso e cobertura da terra, detectadas por sensoriamento remoto, há

Tabela 9 - cenário de uso da terra de Roca Sales simulado para o ano de 2020.

| Classe de Uso da Terra | Área (km <sup>2</sup> ) | %          |
|------------------------|-------------------------|------------|
| Usos Agropecuários     | 78,59                   | 37,72      |
| Floresta Nativa*       | 123,47                  | 59,27      |
| Área Urbanizada        | 1,9                     | 0,91       |
| Rio Taquari            | 4,38                    | 2,1        |
| <b>Total</b>           | <b>208,34</b>           | <b>100</b> |

\* Floresta Estacional Decidual (Bioma Mata Atlântica) em estágio intermediário e avançado de regeneração.

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 visando a conservação ambiental e uso adequado da terra numa paisagem em constante transformação. Esta é a grande contribuição da modelagem dinâmica espacial.

## AGRADECIMENTOS

Este artigo apresenta resultados advindos do Trabalho de Conclusão do Curso de graduação em Ciências Biológicas elaborado pela primeira autora. Cabe um agradecimento especial ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, que pela sua política de disponibilizar gratuitamente o acervo de imagens do satélite Landsat, incentiva que estudos, como o apresentado neste artigo, possam ser realizados com custos incipientes e resultados com a qualidade requerida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. M.; BATTY, M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G.; SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. Stochastic cellular automata modeling of urban land

use dynamics: empirical development and estimation. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 27, n. 5, p. 481-509, 2003.

ALMEIDA, C. M.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. (Org.). **Geoinformação em urbanismo: cidade real X cidade virtual**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007, 368 p.

ALTMANN, A. L.; ECKHARDT, R. R.; REMPEL, C. Evolução temporal do uso e cobertura da terra - estudo de caso no município de Teutônia - RS - Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 3, n. 61, p. 273-283, 2009.

BATISTELLA, M.; MORAN, E. F. **Geoinformação e monitoramento ambiental na América Latina**. São Paulo: Senac Editora São Paulo, 2008. 288 p.

BATTY, M. **Urban modeling: algorithms, calibrations, predictions**. Cambridge: Cambridge University Press, 1976. 381 p.

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.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. New York: Pergamon, 1994. 414 p.

BRASIL. **Lei Nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasil, DF, 22 dez. 2006. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2006/lei/111428.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/111428.htm) Acesso em: 11 abr. 2011.

BRIASSOULIS, H. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches**. 2000. Tese (Doutorado em Geografia), Department of Geography, University of Aegean. Lesvos, 2000.

BURROUGH, P. A. Dynamic modelling and geocomputation. In: Longley, P. A.; Brooks, S. M.; McDonnell, R.; MacMillan, B. (Eds.). **Geocomputation: a primer**. Chichester: John Wiley & Sons, 1998. p. 165-192.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios básicos em geoprocessamento. In: **Sistema de**

- Informações Geográficas: aplicações na agricultura.** ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (Eds.). Brasília: Embrapa, 1998. p. 3-11.
- CENDRERO, A. Mapping and evaluation of coastal areas for planning. **Ocean and Shoreline Management**, Amsterdam, v. 12, p. 427 - 462, 1989.
- CONSTANZA, R. Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. **Ecological Modelling**, v.47, p. 199-215, 1989.
- COPPIN, P.; JONCKHEERE, I.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; LAMBIN, E. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. **International Journal of Remote Sensing**. Taylor e Francis Ltda, n. 9, p. 1565-1596, 2004.
- FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de textos, 2002, 97 p.
- 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.
- HUANG, C. TOWNSHEND, J. R. G.; XIWU, Z. HANSEN, M.; DEFRIES, R.; SOHLBERG, R. Detecting land cover changes based on their trajectories in the spectral space. In: **Geosciences and Remote Sensing Symposium**. 2000, Hawaii. Proceedings, IGARSS, IEEE International, 2000. p. 1984-1986.
- 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: 24 nov. 2010.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.
- JONES, A.; CLARK, J. Driving forces behind European land use change: an overview. In: The users needs for more harmonized land use information at the national and EU level. Report on the Claude (Coordinating Land Use and Cover Data Analyses in Europe). **Workshop**. Wageningen: Claude, Concerted Action, EC, 1997. p. 24-31.
- KUKKO, A. Sampling of bidirectional reflectance from multiangular high resolution airborne imagery. In: **International Society Photogrammetric and Remote Sensing**. 2004. Istanbul, Turkey 2004. Anais. 2004. p. 210 - 215.
- LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da paisagem com SIG**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2008. 283 p.
- LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. Campo Grande: Uniderp, 2006. 908 p.
- NAVEH, Z. Interactions of landscape and cultures. **Landscape and Urban Planning**, v. 32, p. 43-54. 1995.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURU, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 136 p.
- REITZ, R.; KLEIN, R.M.; REIS, A. **Projeto madeira do Rio Grande do Sul**. Sellowia, Itajaí, v. 34/35, n. 34/35, p. 5-483, 1983.
- REMPEL, C.; SUERTEGARAY, D.; JASPER, A. Aplicação do sensoriamento remoto para determinação da evolução da mata nativa da bacia hidrográfica do Rio Forqueta - RS entre 1985 e 1995. **Pesquisas - Caderno de Botânica**, São Leopoldo, v. 51, n. 1, p. 101-112, 2001.
- RIO GRANDE DO SUL. Governo do Estado. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Inventário Florestal Contínuo do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFSM / SEMA, 2002. Disponível em <<http://coralx.ufsm.br/ifcrs/index.php>> Acesso: 15 de janeiro 2009.
- SANTOS, R. F. **Planejamento Ambiental - teoria e prática**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 184 p.
- SANTOS, R. F. **Vulnerabilidade Ambiental - Desastres Naturais ou Fenômenos Induzidos?** Brasília: MMA, 2007. 192 p.
- SOARES FILHO, B. S. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. 1998. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), São Paulo. 1998.
- SOARES FILHO, B. S.; ALENCAR, A.; NEPSTAD, D.; CERQUEIRA, G.; VERADIAZ, M. D. C.; RIVERO, S.; SOLÓRZANO, L.;

- VOLL, E. Simulation the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: The Santarém-Cuibá Corridor. **Global Change Biology**, v. 10, p. 745-764, 2004.
- 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.; CERQUEIRA, G.; ARAÚJO, W.; WOLL, E. **Dinamica Project**. Disponível em <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica>>. Acesso em: 25 de nov. 2010
- WEGENER, M.; GNAD, F.; VANNAHME, M. The time scale of urban form. In: HUTCHINSON, B.; BATTY, M. (Eds.). **Advances in urban systems modeling**. Amsterdam: Elsevier, p. 175-197, 1986.
- 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.
- WOLFRAM, S. Statistical mechanics of cellular automata. **Review of Modern Physics**, v. 55, p. 601-643, 1983.