

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N<sup>o</sup> 67/3: 669-690  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **MODELAGEM DINÂMICA DA VEGETAÇÃO BASEADA EM AUTÔMATOS CELULARES: UM ESTUDO DE CASO DA REGENERAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA NO DISTRITO DE ALDEIA VELHA - RJ**

*Vegetation Dynamic Modeling Based on Cellular Automata: A Case Study of Regeneration in Atlantic Forest on District of Aldeia Velha - RJ*

**Livia dos Santos Abdalla<sup>1,2</sup>, Leonardo Castro de Oliveira<sup>1</sup>  
& Carlos Frederico de Sá Volotão<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Instituto Militar de Engenharia – IME**  
**Programa de Mestrado em Engenharia Cartográfica**  
Praça General Tibúrcio, 80, 6<sup>o</sup> andar – Urca, CEP 22290-270, Rio de Janeiro/RJ, Brasil  
abdalla.livia@gmail.com, {leonardo, volotao}@ime.eb.br

**<sup>2</sup>Fundação Oswaldo Cruz – Fiocruz**  
**Programa Institucional Biodiversidade & Saúde - PIBS**  
Av. Brasil, 4036, sala 214, Prédio da Expansão - Manguinhos, CEP 21040-361, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

*Recebido em 10 de Agosto, 2014/ Aceito em 26 de Janeiro, 2015*  
*Received on August 10, 2014/ Accepted on January 26, 2015*

### **RESUMO**

Diferentes modelos são capazes de representar a evolução de sistemas, sendo que nesta pesquisa foi empregado modelo baseado no conceito de autômatos celulares, implementado no software Dinamica EGO. Como tema de experimentação foi escolhida a vegetação. A vegetação trata-se do elemento essencial à manutenção da biodiversidade e responsável pelo equilíbrio dos ecossistemas naturais, mas em confronto a isso, é um dos elementos mais impactados e fragmentados pelas atividades antrópicas. A Mata Atlântica representa um dos maiores desafios de conservação do país e a recuperação dos seus fragmentos florestais tem se destacado como uma forma de reverter a atual situação de degradação ambiental. O objetivo desta pesquisa é construir um modelo dinâmico de regeneração da vegetação, baseado em autômatos celulares, para a produção de estimativas e tendências futuras da recuperação da Mata Atlântica no distrito de Aldeia Velha - RJ. Para tanto foi utilizado mapeamento em grande detalhe referente aos anos de 1999, 2005 e 2010, produzido com a classificação híbrida de três imagens de alta resolução espacial, além de um conjunto de variáveis ambientais e antrópicas associadas à dinâmica da vegetação. Pela natureza complexa do processo de regeneração e pela sucessão entre as classes de vegetação ocorrer de maneira encadeada ao longo do tempo, foi necessário estruturar a modelagem em cinco diferentes níveis de transição – 1) gramínea para capoeira, 2) capoeira para vegetação secundária, 3) vegetação secundária para floresta, 4) gramínea para urbano e 5) do solo exposto e agricultura para gramínea. A construção deste modelo se caracterizou como processo minucioso e fundamentalmente experimental, tendo sido necessário a realização de inúmeros testes na fase de calibração dos pesos de evidência, até a obtenção do melhor ajuste do modelo de regeneração. A partir dos cenários simulados, pode-se observar que a classe Capoeira apresentou uma lógica de ocupação sistemática, sendo as novas manchas criadas localizadas bem próximas às áreas ocupadas por vegetação em estágio sucessional mais avançado. As simulações das classes vegetação secundária e floresta já apresentaram lógica de ocupação bastante condizente com a realidade, podendo ser isso associado ao fato que estas correspondem

à evolução de feições bem definidas e discretamente localizadas na paisagem. Já a simulação das classes gramínea e urbano seguiu uma lógica de distribuição associada à presença inicial dessas classes, principalmente na classe urbano, onde foi possível simular o adensamento do núcleo urbano e a pavimentação de estradas de terras. Na classe gramínea também foi possível observar uma lógica próxima à realidade observada, visto que o crescimento de novas gramíneas ocorreu bastante próximo as áreas de práticas agrícolas. Na etapa de validação, a modelagem apresentou valor de 0,93 de similaridade, demonstrando que o modelo teve uma boa capacidade preditiva.

**Palavras chaves:** Dinamica EGO, Simulação, Sucessão Secundária, Grande Escala.

## ABSTRACT

Different models are able to represent the evolution of systems, and with this research we have employed a model based on the concept of cellular automata, implemented in the software Dinamica EGO. Vegetation was chosen as the theme of experimentation. Vegetation is the essential element for the maintenance of biodiversity and responsible for the balance of natural ecosystems. However, in conflict with this, it is one of the elements most impacted and fragmented by anthropogenic activities. The Atlantic forest is one of the greatest conservation challenges in the country and the recovery of its forest fragments stands out as a way to reverse the current situation of environmental degradation. The objective of this research is to build a dynamic model of the regeneration of vegetation based on cellular automata for the production of estimates and future trends of the recovery of the Atlantic forest in the District of Aldeia Velha – RJ. For this purpose, we used highly detailed mapping for the years 1999, 2005 and 2010, produced with the hybrid classification of three images of high spatial resolution, as well as a set of environmental and anthropogenic variables associated with vegetation dynamics. As the complex nature of the process of regeneration and succession between classes of vegetation occurs in a linked manner over time, it was necessary to structure the modeling in five different levels of transition-1) grasses to capoeira, 2) capoeira to secondary vegetation, 3) secondary vegetation to forest, 4) grasses to urban, and 5) exposed soil and agriculture to grasses. The construction of this model was a thorough and fundamentally experimental process, as it was necessary to conduct numerous tests during the calibration phase of the weights of evidence in order to obtain the best fit of the regeneration model. From the simulated scenarios, we observed that the Capoeira class presented a logic of systematic occupation, with newly created patches located close to areas occupied by vegetation in a more advanced successional stage. The simulation of secondary vegetation and forest classes presented occupation logic highly consistent with reality, which may be associated with the fact that these correspond to the evolution of features that are well defined and discretely located in the landscape. The simulation of the grasses and urban classes followed a distribution logic associated with the initial presence of these classes, mainly in the urban class where it was possible to simulate the densification of the urban core and the paving of dirt roads. For the grasses class, we observed a logic close to the observed reality, with the growth of new grasses occurring very close to agricultural areas. In the validation phase, the modeling presented a similarity value of 0.93, demonstrating that the model had a good predictive capability.

**Keywords:** Dinamica EGO, Simulation, Secondary Succession, Large Scale.

## 1. INTRODUÇÃO

O termo modelo refere-se a uma abstração da realidade, que se aproxima do comportamento que se observa em um sistema, mas que sempre deve ser mais simples do que o próprio sistema real. Não há modelo perfeito que represente a realidade, nem existe um modelo único; entretanto, pode existir aquele que melhor descreve determinado fenômeno. Um modelo deve ser constituído de três elementos: variáveis, relacionamentos e processos, os quais podem variar sua significância de acordo com o fenômeno abordado (PEDROSA, 2003). Para garantir a confiabilidade, os modelos devem

ser testados e aprimorados como parte do seu desenvolvimento e aplicação (MAZZOTTI e VINCI, 2007). Dependendo da concordância entre o observado e o simulado, o modelo será aceito, rejeitado ou modificado, para novamente ser testado (SOARES-FILHO, 1998).

Diferentes técnicas são capazes de simular a evolução de sistemas: redes neurais, equações diferenciais, método de Monte Carlo, Cadeias de Markov, dentre outras existentes. Nesta pesquisa foi utilizado o modelo baseado no conceito de autômatos celulares, porque dentre outros motivos, este é comumente utilizado para estudar e modelar o comportamento de sistemas

complexos, e por ter a capacidade de gerar simulações, previsões e resultados não obtidos utilizando outros métodos (GREMONINI e VICENTINI, 2008).

O modelo de simulação baseado em autômatos celulares é utilizado em muitas áreas de pesquisa (simulação de tráfego urbano, propagação de epidemias, criptografia, fractais, formação de cristais, etc), e a incorporação dessa técnica na área ambiental, através de dados espaciais, encontra-se hoje em fase de crescente experimentação (SOARES-FILHO, 1998; ALMEIDA *et al.*, 2003; BENEDETTI, 2010; LIMA, 2012). Na área ambiental, a vegetação tem importância significativa, por se tratar do elemento essencial à manutenção da biodiversidade e responsável pelo equilíbrio dos ecossistemas naturais. Mas em confronto a isso, é um dos elementos mais impactados e fragmentados pelas atividades antrópicas (agropecuária, mineração, represamento de corpos hídricos, etc). Como consequência da perda da vegetação, surgem diferentes problemáticas ambientais, como por exemplo, o aumento da taxa de extinção de espécies animais, empobrecimento do solo, alterações no ciclo hidrológico e mudanças no microclima.

A utilização dessa técnica de simulação para a obtenção de estimativas, sobre como a vegetação pode evoluir ou se recuperar ao longo do tempo, irá contribuir para a utilização desse método em questões ambientais. O monitoramento da dinâmica da vegetação e a obtenção de estimativas de recuperação natural são campos de pesquisa capazes de subsidiar tomadas de decisão sobre políticas de preservação ambiental e contribuir para estratégias de conservação, definição de áreas de proteção e elaboração de planos de manejo de unidades de conservação.

Especificamente a Mata Atlântica atinge estágio muito avançado de fragmentação e a preservação de suas áreas florestais remanescentes representa um dos maiores desafios de conservação do País (TABARELLI *et al.* 2005). A recuperação de fragmentos florestais em ambientes naturais intensamente impactados, tem se destacado cada vez mais como uma forma de reverter a atual situação de degradação ambiental. As simulações sobre a recuperação dos ecossistemas florestais podem contribuir para

a melhor compreensão da dinâmica da vegetação e para a obtenção de conhecimento sobre os elementos fundamentais desse sistema para o estabelecimento de estratégias de recuperação, manejo e preservação das florestas.

O objetivo desta pesquisa é construir um modelo dinâmico de regeneração da vegetação, baseado em autômatos celulares, para a produção de estimativas e tendências futuras da recuperação da Mata Atlântica. O estudo de caso será realizado no distrito de Aldeia Velha - RJ.

## 2. ESTUDO DE CASO

Esse trabalho utilizou como estudo de caso a regeneração da Mata Atlântica do distrito de Aldeia Velha - RJ. A caracterização da área, a descrição dos materiais e métodos utilizados são descritos a seguir.

### 2.1 Área teste

No estado do Rio de Janeiro, a Floresta Atlântica encontra-se hoje reduzida a menos de 20% de sua cobertura original, estando os grandes remanescentes, em sua maioria, sobre áreas montanhosas (BOHRER, 2012).

Essa pesquisa tem como área teste o distrito de Aldeia Velha - RJ. Mais especificamente adotou-se o recorte espacial correspondente ao contorno de um fragmento florestal com nítidos processos de sucessão secundária e com muitas áreas de pastagens e agriculturas intercalando-se com suas bordas. O distrito de Aldeia Velha fica localizado no município de Silva Jardim, situado na região das Baixadas Litorâneas do Estado do Rio de Janeiro. O município de Silva Jardim preserva mais de 30% de sua cobertura florestal original (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA 2002), possui mais de uma dezena de Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN) implementadas (CARVALHO *et al.*, 2004) e parte de seu território integra ainda o corredor de biodiversidade da Serra do Mar (AYRES *et al.*, 2005).

Aldeia Velha encontra-se totalmente inserida na unidade de conservação de uso sustentável denominada APA do Rio São João. Essa APA foi criada em 2002 para proteger e preservar os mananciais, regular o uso dos recursos hídricos e o parcelamento do solo, a fim de garantir o uso racional dos recursos naturais e proteger remanescentes da Mata Atlântica.

O distrito ainda é vizinho da primeira Reserva Biológica de proteção integral do país, a Rebio Poço das Antas, sendo que essa é destinada à preservação da Mata Atlântica e do mico-leão-dourado - *Leontopithecus rosalia* (Fig. 1).

Pesquisas indicam que a vegetação dessa região encontra-se em processo natural de regeneração, com elevada densidade de espécies secundárias, matas em estágio sucessional secundário, predominância de árvores jovens com abundante regeneração, além de descontinuidades nas classes de diâmetro maiores, sugerindo a exploração de algumas espécies no passado (CARVALHO *et al.*, 2004; NEVES e PEIXOTO, 2008; CHRISTO *et al.*, 2009). Ressalta-se ainda que o estudo promovido pelo Ministério do

Meio Ambiente (MMA, 2006) considera que os remanescentes da APA do rio São João possuem extrema importância ecológica para a conservação da fauna e flora, dada a representatividade, o alto grau de fragmentação e a pressão antrópica ao qual estão sujeitos, houve a recomendação ainda para que a região seja manejada de forma a constituir um corredor ecológico.

O modelo de regeneração da vegetação desenvolvido nessa pesquisa emprega nível de generalização suficiente para que seja possível a sua replicação em outras áreas, desde que essas sejam: localizadas na Mata Atlântica; possuidoras de processos de regeneração natural; fisicamente e ambientalmente parecidas com a área adotada neste estudo.

### O distrito de Aldeia Velha e suas unidades de conservação.

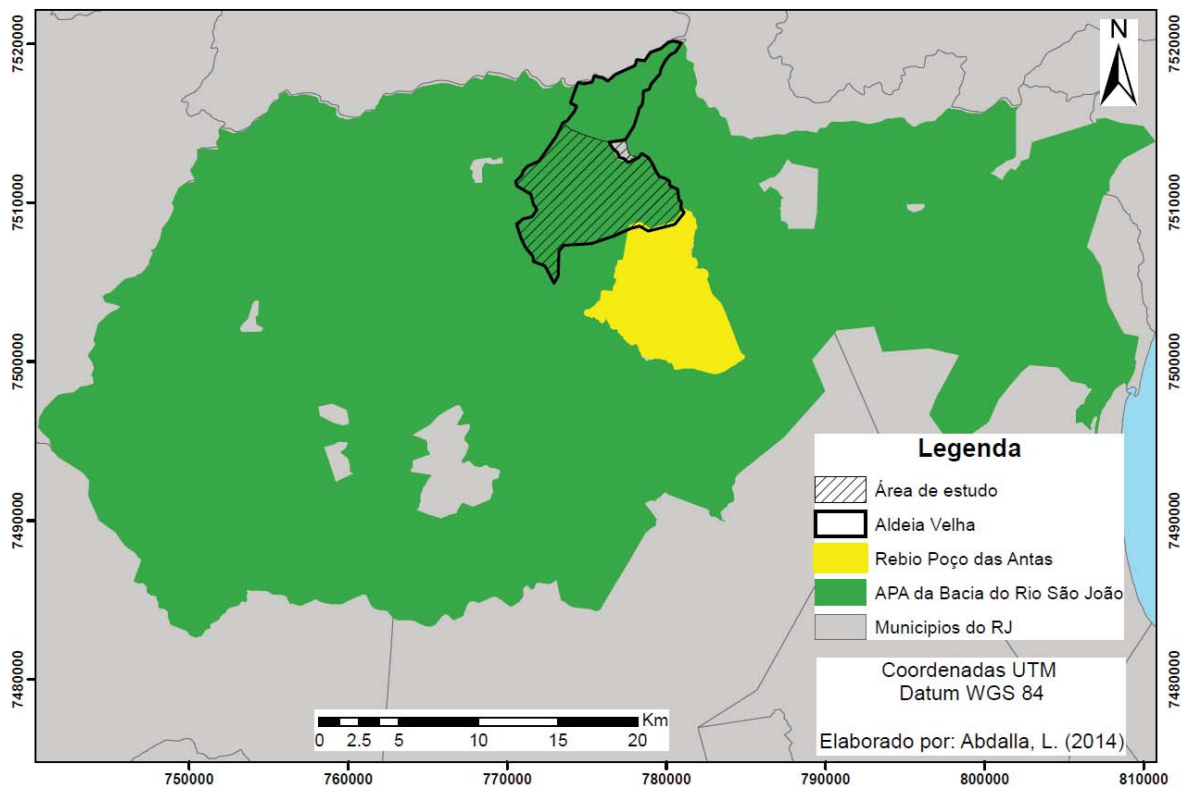


Fig. 1 - Aldeia Velha e suas UCs.

## 2.2 Materiais

Nesta pesquisa foram utilizadas imagens de alta resolução espacial, sendo duas fotografias aéreas ortorretificadas - resoluções de 0,63 m e 1 m- e uma imagem orbital do satélite Wordview II com resolução de 0,50 m, produto da fusão do modo multiespectral com o modo pancromático. A fim de padronizar a resolução espacial da base

de dados utilizada, todas as imagens tiveram seu tamanho de pixel reamostrados para 1 metro. As fotografias aéreas ortorretificadas correspondem aos anos de 1999 e 2005, sendo a primeira disponibilizada pela empresa de fornecimento de energia Ampla e a segunda pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. A imagem orbital corresponde ao ano de 2010 e

foi disponibilizada pelo laboratório Espaço do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Para a execução das operações digitais de pré-processamento, classificação das imagens foram utilizados os softwares Definiens 7.0 e ArcGIS 10.0. Para a modelagem por autômato celular foi utilizado o programa Dinamica EGO.

### 2.3 Fases da metodologia

A pesquisa desenvolvida foi dividida de acordo com o fluxograma simplificado na figura 2. Todas as fases serão descritas informando os processos envolvidos, assim como os métodos utilizados.

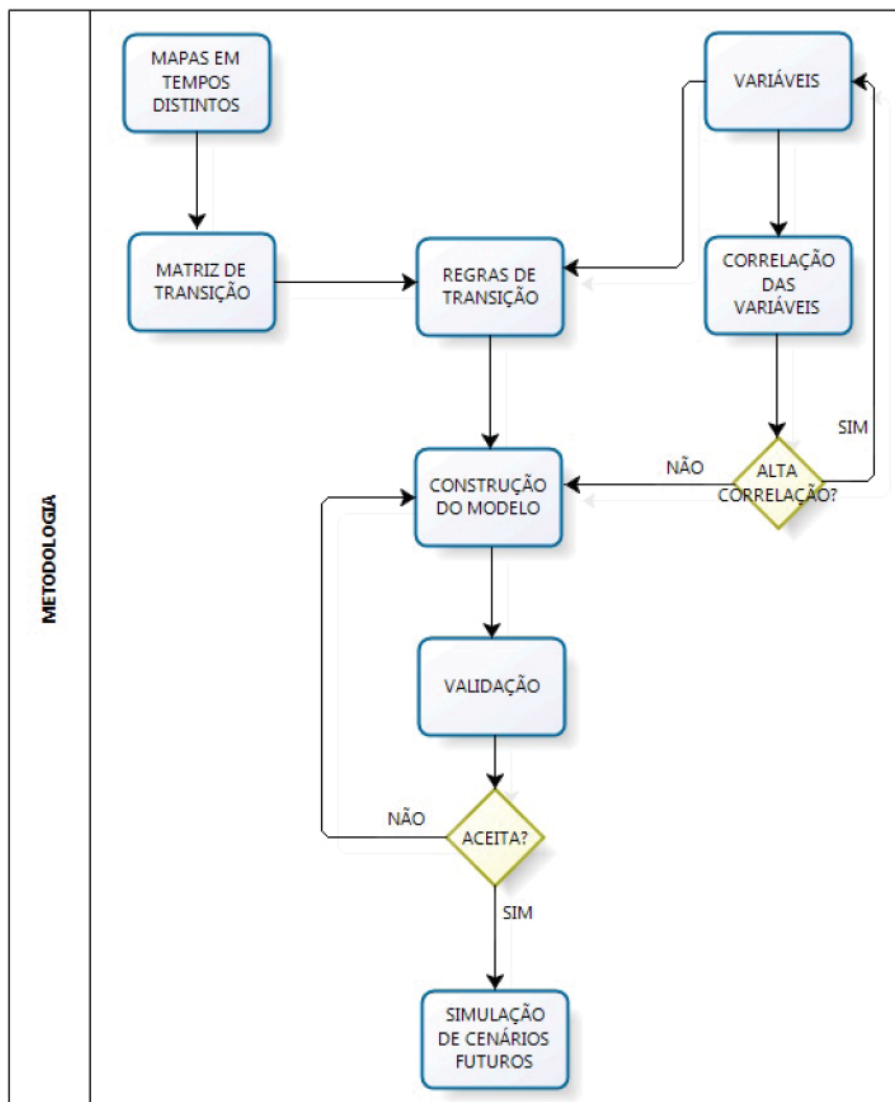


Fig. 2 - Fases da metodologia.

#### 2.3.1 Mapas em tempos distintos

Para a elaboração dos mapas de uso e cobertura da terra foi necessário a aquisição de uma série temporal de imagens da região, com intervalo de tempo satisfatório para que a dinâmica de regeneração ocorresse. Outro aspecto importante é a necessidade das imagens com alta resolução espacial que fossem identificadas as distinções entre as classes sucessionais da vegetação envolvidas no

processo de regeneração.

Para a classificação das imagens foi adotada metodologia híbrida de classificação, na qual inicialmente as imagens foram segmentadas de modo automatizado pelo algoritmo multirresolução implementado no software Definiens. Em seguida, os arquivos referentes à segmentação foram exportados em formato *shapefile* e conduzidos ao ambiente GIS. No software ArcGIS, os arquivos com os segmentos

foram sobrepostos as imagens correspondentes, e foi desempenhada a meticulosa etapa de fotointerpretação dos segmentos, que corresponde ao preenchimento da tabela de atributos com as classes de uso e cobertura conforme a feição do terreno identificada na imagem sobreposta. A etapa de fotointerpretação dos segmentos além da resposta espectral dos pixels utilizou como chave de interpretação a textura, o que favoreceu a identificação das diferentes classes de regeneração da vegetação (Fig. 3).

As classes de uso e cobertura vegetal (Tabela 1) foram definidas pela análise visual

das imagens, com o intuito de detalhar as classes correspondentes aos estágios sucessionais da vegetação no local. Por último, foi necessário reamostrar novamente o tamanho dos pixels dos mapas de uso e cobertura, visto que os demais dados utilizados na modelagem (variáveis ambientais e antrópicas) possuem resolução espacial máxima de 10 metros, correspondentes a suas escalas de mapeamento. Dessa maneira, foi concluída a etapa de elaboração dos mapas de uso e cobertura da terra fornecendo informações sobre o estado anterior, intermediário e recente da cobertura vegetal e do uso na região.

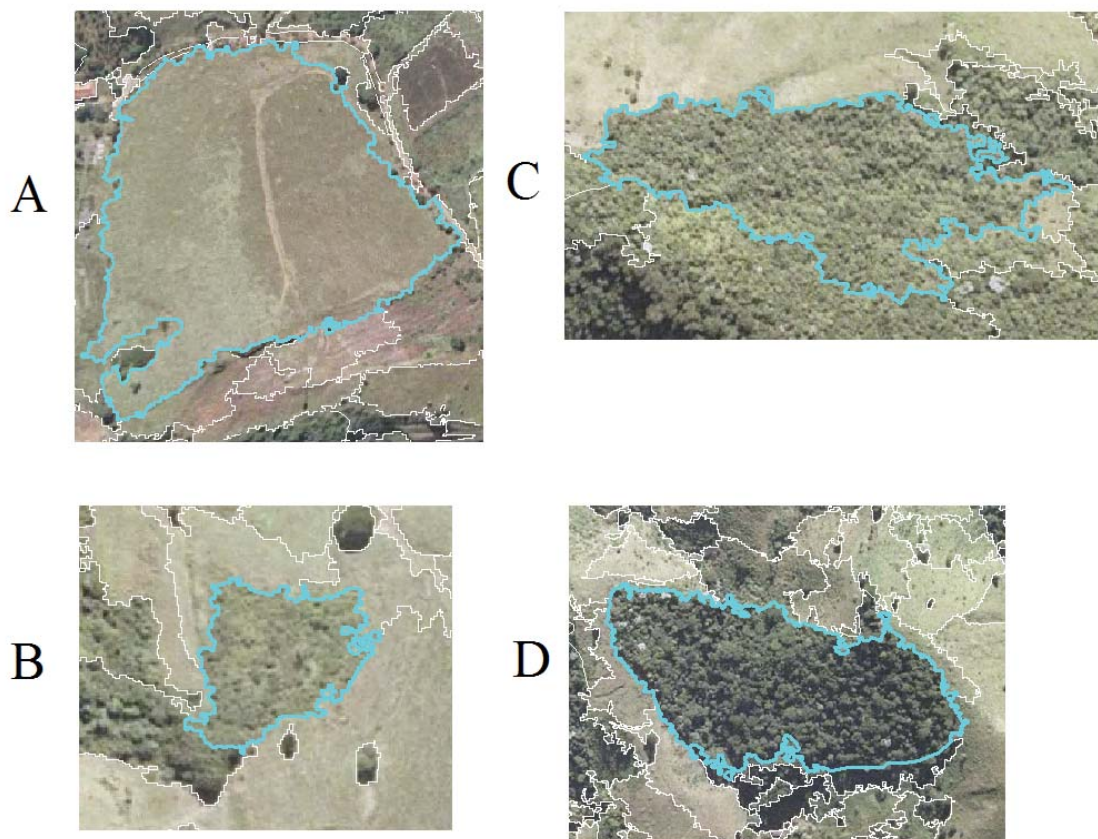


Fig. 3 - Exemplo dos segmentos de (A) Gramínea – textura lisa; (B) Capoeira – textura pouco enrugada com plantas e arbustos de pequeno porte; (C) Vegetação secundária – textura enrugada com árvores de médio porte; (D) Floresta – textura bastante enrugada com árvores de grande porte e altura variada.

### 2.3.2 Variáveis

Foram selecionadas onze variáveis ambientais e antrópicas com relevância e influência no processo de regeneração da vegetação. Tendo sido produzidas a partir da utilização de funções do ArcGIS. Dentre as variáveis referentes à topografia, o Modelo Digital de Elevação (MDE) é a representação matemática contínua da distribuição espacial

das variações de altitude numa área. Este foi produzido a partir da base cartográfica da Ampla, adquirida em formato dwg, na qual foram devidamente selecionadas as curvas de nível com intervalos de 10 metros, e em sequência transformadas em *shapefile*. A partir das curvas em formato vetorial, foi possível utilizar a função *Create Tin*, na qual se criou a rede triangular irregular, que em seguida foi transformada em

Tabela 1: Classes de uso e cobertura identificadas e suas descrições

| Classe                 | Descrição  |
|------------------------|--|
| Floresta intermediária | Áreas de formações florestais em estágio de sucessão médio.  |
| Vegetação Secundária   | Áreas onde a vegetação florestal original foi degradada com áreas de regeneração da vegetação.   |
| Capoeira               | Vegetação aberta com forração de gramíneas e outras ervas; árvores e arbustos esparsamente distribuídos.   |
| Gramínea               | Vegetação rasteira dominante com predomínio de gramíneas com rara presença de ervas e arbustos.  |
| Solo Exposto           | Áreas aonde não existem nenhum tipo de cobertura sobre o solo, normalmente atrelada à degradação, exploração mineral ou resposta a certos tipos de manejo, como queimadas. |
| Agricultura            | Áreas de diversos tipos de cultivos (exemplo: cana-de-açúcar).   |
| Água                   | Constituída pelos corpos hídricos principais (rios, lagos, etc).   |
| Área Urbana            | Áreas com construções em núcleos urbanos.  |

MDE pela função *TIN to raster*. Com o modelo digital de elevação (MDE), foram extraídas as outras variáveis topográficas de primeira ordem: declividade e face de exposição das vertentes.

A declividade corresponde ao ângulo de inclinação da superfície local, e é expresso como a mudança de elevação sobre certa distância. Esta camada foi elaborada em porcentagem, utilizando a função *Slope*. As classes de declividade foram separadas em seis intervalos, de acordo com a classificação da EMBRAPA (1979). A outra camada referente à topografia é a orientação das vertentes que é a medida do ângulo horizontal da direção esperada do escoamento superficial, geralmente expressa em azimute, isto é, em relação ao norte geográfico. O valor é de 0° a 360°, crescendo desta direção no sentido horário. Esta foi gerada utilizando a função *Aspect*, e as vertentes foram separadas e reclassificadas.

As variáveis de distâncias representam a distância métrica, em linha reta, entre os vetores apresentados, criando em função disso uma superfície contínua de valores, que corresponde à distância de cada pixel à fonte mais próxima. As variáveis de distância das rodovias e distância dos rios foram obtidas a partir da vetorização dessas feições nas ortofotos de 1999, e em sequência utilizada a função de Distância Euclidiana. Enquanto que as variáveis: distância das florestas, distância das principais áreas agrícolas e distância das principais áreas urbanas foram obtidas a partir das classes floresta, agricultura e urbano do mapa de uso e cobertura da terra de 1999, também utilizando a função de Distância Euclidiana.

Por último, foram ainda utilizadas duas variáveis ambientais em formato categórico, ou seja, com classes pré-definidas: tipos de solos obtido com a EMBRAPA, elaborado com base no novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006); e a variável com tipos de vegetação fornecida pela Fundação SOS Mata Atlântica contendo as fisionomias vegetais originais e as classes de uso da terra que se estabeleceram entre os remanescentes florestais do local.

### 2.3.3 Matriz de transição

Com a matriz de transição são obtidas todas as transições encontradas entre as classes de uso e cobertura da terra. Esta consiste basicamente na tabulação cruzada dos mapas inicial e final do local em estudo. Para a construção do modelo foi considerada a matriz por todo o período, single step matrix do software Dinamica. A análise da matriz de transição entre classes coopera no processo de definição das regras de transição, pois ela contribui na identificação de quais classes representam os principais atores envolvidos na dinâmica de regeneração do local, e para quais direções elas apresentaram suas maiores taxas de crescimento (SOARES-FILHO *et al.*, 2009).

### 2.3.4 Regras de transição

Inicialmente determinaram-se quais transições seriam consideradas na modelagem. Para isso, tornou-se necessário observar tanto o que teoricamente representa a transição natural

e gradativa entre as classes de vegetação, quanto às transições reais que ameaçam diretamente alguma classe de vegetação. Nesse sentido, foram consideradas transições correspondentes à regeneração natural da vegetação e o desenvolvimento de atividades de procedência antrópica.

Em seguida foi identificada a importância de cada camada ambiental/antrópica em cada transição considerada, e a partir disso foi possível definir as classes ou intervalos de valores dessas variáveis que possuem influências positivas ou negativas. As influências das variáveis ambientais/antrópicas utilizadas nesta fase de modelagem são descritas a seguir.

O modelo digital de elevação não condiciona apenas processos ecológicos, mas também a ação humana, o que torna evidente o fato dos remanescentes florestais concentrarem-se em áreas menos apropriadas para a agricultura, o que é fortemente dependente do relevo acidentado (NOGUEIRA, 2012). O MDE se caracteriza como facilitador da regeneração conforme o aumento da cota altimétrica, já que áreas mais elevadas são menos vulneráveis às ações antrópicas de construção e pecuária.

A declividade tem influência sobre o equilíbrio entre a infiltração de água no solo e escoamento superficial. Influi também no tempo de permanência e disponibilidade da água para aproveitamento pelas plantas (MACHADO *et al.*, 2009). As faixas de ondulado a montanhoso favorecem a dinâmica da regeneração, enquanto as áreas planas são sujeitas a pressões antrópicas, principalmente pelo fato de localizarem-se em declividades menores, sendo preferidas para atividades agropecuárias.

A orientação das vertentes dos morros possui enorme importância no processo de regeneração, pois em função da diferenciação da incidência solar sob as vertentes dos morros ocorrem grandes distinções para o processo. Áreas sob incidência solar constante promovem dificuldades da vegetação se desenvolver, enquanto a área sob baixa incidência solar possui favorabilidade muito grande no desenvolvimento e regeneração da vegetação (MACHADO *et al.*, 2009). No hemisfério sul as vertentes orientadas para norte recebem maior irradiância solar, enquanto

que as vertentes voltadas para o sul recebem menor incidência solar, sendo, portanto, menos privilegiadas quanto à insolação. Em relação às vertentes voltadas para leste, estas apresentam beneficiamento quanto ao conforto térmico, sendo favoráveis principalmente à ocupação urbana, já que a insolação ocorre de forma direta pela manhã, período em que as temperaturas são mais amenas. Desta maneira, apresentam-se adequadas para a implantação de projetos que visem à restauração da floresta. Já as vertentes orientadas para oeste caracterizam-se, como as mais desfavoráveis quanto à incidência solar e ao conforto térmico, pois recebem a radiação solar direta durante toda à tarde, período em que a temperatura é mais elevada (HENZ *et al.*, 2003; NASCIMENTO, 2010; NOGUEIRA, 2012).

Foram consideradas as vertentes voltadas ao Sul e Leste como áreas potenciais à regeneração, pela incidência solar mais amena e, conseqüentemente, serem áreas mais úmidas. Enquanto que as vertentes voltadas ao Norte e Oeste foram consideradas prejudiciais a regeneração por sofrerem mais com a forte e constante incidência solar, o que acabam tornando essas áreas mais secas e com vegetação mais limitada à plantas rasteiras e gramíneas.

A variável distância das rodovias representa menor probabilidade de regeneração conforme a proximidade com as rodovias (LIMA, 2012), visto que a agricultura e a ocupação urbana tendem a se desenvolver em locais mais próximos a itens de infraestrutura rodoviária.

A distância dos rios representa influência positiva no processo de regeneração conforme a maior proximidade com os rios, visto que a disponibilidade, a qualidade e a quantidade de água natural nos leitos d'água são diretamente relacionadas com a presença da vegetação, principalmente com formações florestais consolidadas, pois estas demandam de grande quantidade de água para seu estabelecimento e desenvolvimento (LIMA, 2012).

A distância das florestas sugere que a proximidade com as bordas dos fragmentos florestais contribui positivamente para a regeneração da vegetação, visto que o processo de germinação de plantas é facilitado pela ação dos ventos e animais que atuam nas



áreas de pastagem adjacentes às florestas bem estabelecidas (VALCARCEL *et al.*, 2007).

A distância das principais áreas de agricultura representa forte ameaça à regeneração ou conservação de fragmentos florestais próximos, visto os impactos ambientais associados e ao consumo dos recursos naturais do local (desmatamento, perda de solos, redução da fertilidade natural, erosão genética, etc.).

A distância das principais áreas urbanas também representa ameaça ao processo de regeneração ou conservação das florestas, ao mesmo tempo em que indica favorabilidade ao crescimento e desenvolvimento da urbanização dos locais mais próximos à medida que ocorrem novas obras de saneamento, drenagem e canalização de rios, impermeabilização do solo pelo asfaltamento de ruas, dentre outras ocorrências.

O conhecimento das características morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas dos solos identificados na região foi obtido através de Lumbreras (2001). O solo do tipo Cambissolo Háplico possui maior ocorrência na região e se caracteriza por ser bem drenado e estar situado em posições fisiográficas de morros e montanhas com encostas dissecadas, sendo predominantemente recobertos por florestas alteradas. O segundo solo mais frequente na região é Latossolo Vermelho-Amarelo que se caracterizam por horizontes muito profundos e bem drenados, são solos situados em posições fisiográficas de colinas meias- laranja e morros com encostas convexas de relevo ondulado a montanhoso, sendo predominantemente utilizados com pastagens, apresentando também áreas expressivas de floresta. Outro solo menos frequente, mas ainda representativo é o Neossolo Flúvico que se caracterizam como moderada e imperfeitamente drenados, ocorrendo em posições fisiográficas de planície costeira e em relevo plano, e são atualmente utilizados com pastagens e secundariamente ocupados por floresta alterada, possuindo elevado potencial agrícola principalmente devido a restrições de drenagem interna e ao ocasional risco de inundação. Outro solo menos frequente é o Gleissolo Háplico que ocorrem em posições fisiográficas de várzeas da planície costeira, de sedimentos aluvionares e fluviomarinhos,

em relevo plano e sendo predominantemente utilizado com pastagens. O solo Neossolo Litólico foi pontualmente identificado na porção do extremo norte da área de estudo e se caracteriza como solo raso, normalmente associado a relevos declivosos e são normalmente indicados para a preservação da flora. Foram considerados os solos do tipo Cambissolo Háplico, Latossolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Litólico como influencia positiva para a regeneração, visto suas características de drenagem e por estarem mais associados a coberturas florestais. Enquanto o solo Gleissolo Háplico e o Neossolo Flúvico com influencia positiva ao desenvolvimento da agricultura e conseqüentemente ao desmatamento.

Já dentre as classes da variável vegetação, as áreas correspondentes as Floresta Ombrófila Densa Montana, Submontana e de Terras Baixas foram consideradas como facilitadoras a regeneração, enquanto que as classes de Agricultura e Pastagem favoráveis às transições de desmatamento, agricultura e crescimento urbano, foram consideradas prejudiciais a regeneração.

### 2.3.5 Correlação das variáveis

Esta etapa destina-se a avaliar a dependência ou associação entre os pares de variáveis ambientais/antrópicas, para que seja selecionado o melhor conjunto de variáveis para a construção do modelo. Para realizar as estimativas sobre quais variáveis são independentes entre si, foram utilizados dois índices: o Índice de Cramer e a Incerteza da Informação Conjunta. Esses índices foram calculados a partir das transições identificadas na matriz de transição entre classes.

O índice de Cramer (V) é definido por Bonham-Carter (1994) pela seguinte fórmula:

$$V = \sqrt{X^2/T..M},$$

em que:

T = totais marginais da matriz de tabulação cruzada entre dois mapas A e B;

X<sup>2</sup> = estatística qui-quadrado;

M = mínimo de (n-1, m-1), em que n é igual ao número de linhas e m é o número de colunas da matriz de tabulação cruzada entre os mapas A e B.

A Incerteza de Informação Conjunta (U) também se baseia na matriz de tabulação cruzada T. Assim,  $U(A, B)$  pode ser usada como uma medida de associação, sendo definida por (BONHAM-CARTER, 1994):

$$U(A,B) = 2 [H(A) + H(B) - H(A,B) / H(A) + H(B)],$$

O índice  $U(A,B)$  varia entre 0 e 1, sendo que quando os dois mapas são completamente independentes, então  $H(A,B) = H(A) + H(B)$  e  $U(A,B)$  é 0, e quando os dois mapas são completamente dependentes,  $H(A) = H(B) = H(A,B) = 1$ , e  $U(A,B)$  é 1 (ALMEIDA *et al.*, 2003).

Em ambos os índices, os valores variam de zero a um, sendo que as variáveis são independentes quando seu valor é igual a zero e completamente dependentes quando igual a um. Então, quanto maior for o valor do coeficiente, maior é a dependência entre as variáveis. Bonham-Carter (1994), reporta que valores inferiores a 0,5 sugerem menor associação.

Nessa pesquisa o limiar de corte foi fixado no valor de 0,5, conforme Bonham-Carter (1995), de maneira que quando ultrapassado este limiar, uma das variáveis foi descartada. Foram analisados todos os pares de variáveis em todas as transições consideradas e em sequência eliminadas as variáveis com alto valor de correlação. A partir do cálculo dos índices de Cramer e da Incerteza da Informação Conjunta foi verificado que em todas as transições a variável Vegetação possui alta correlação quando em par com a classe Solos, e com outras variáveis em algumas transições. Nesse sentido, a variável vegetação foi automaticamente excluída de todas as transições modeladas.

A escolha das variáveis se deu após a realização de vários testes, com apoio da função Determine Weights of Evidence Coefficients, levando em consideração a influência dessas sobre as transições observadas. Assim foram utilizadas as variáveis que apresentaram melhores resultados dentro de cada transição modelada.

### 2.3.6 Construção do modelo

Pela natureza complexa do processo de regeneração e pela sucessão entre as classes de vegetação ocorrer de maneira encadeada

ao longo do tempo, foi necessário estruturar a modelagem em cinco diferentes níveis de transição. Inicialmente foi modelada apenas a transição da classe Gramínea para a Capoeira, mantendo as demais classes fixas. Em seguida, a partir do resultado desse primeiro nível da modelagem, foi modelada a transição da classe Capoeira para Vegetação Secundária, mantendo as demais classes inalteradas. A partir do resultado do segundo nível foi modelada a transição da classe Vegetação Secundária para Floresta. Por último, ainda foi modelada a transição da classe Gramínea para Urbano, e as classes Solo exposto, Agricultura para a classe Gramínea.

Foi necessário modelar as transições em diferentes níveis e utilizar o resultado do nível anterior para a transição no nível seguinte, pois as transições simultâneas de todas as classes de vegetação promoveu uma sucessão acumulada equivocada, transformando todas as feições de capoeira e vegetação secundária em florestas, não correspondendo aos avanços ou restrições reais ocorridas no local. O processo de calibração dos pesos de evidência e o ajuste dos parâmetros internos utilizados na construção do modelo são apresentados a seguir, de acordo com os cinco níveis de transição utilizados.

#### 2.3.6.1 Calibração dos pesos de evidência

Os melhores ajustes encontrados para os pesos dos intervalos das variáveis utilizadas são apresentados através dos gráficos contidos nas figuras 4, 5, 6, 7 e 8, correspondentes aos cinco níveis de transição modelados. Nos gráficos, o eixo Y corresponde ao peso atribuído à variável e o eixo X corresponde aos valores da variável. Os pesos positivos indicam as faixas que são favoráveis à transição, os pesos próximos a zero indicam que as faixas não exercem efeito sobre a transição e os pesos negativos indicam as faixas que repelem a transição. Nessa etapa, teve um aspecto empírico envolvido, sendo necessário a realização de múltiplos e diferentes testes de calibração até a obtenção da calibração dos pesos mais ajustada a modelagem, por meio da observação do mapa simulado.

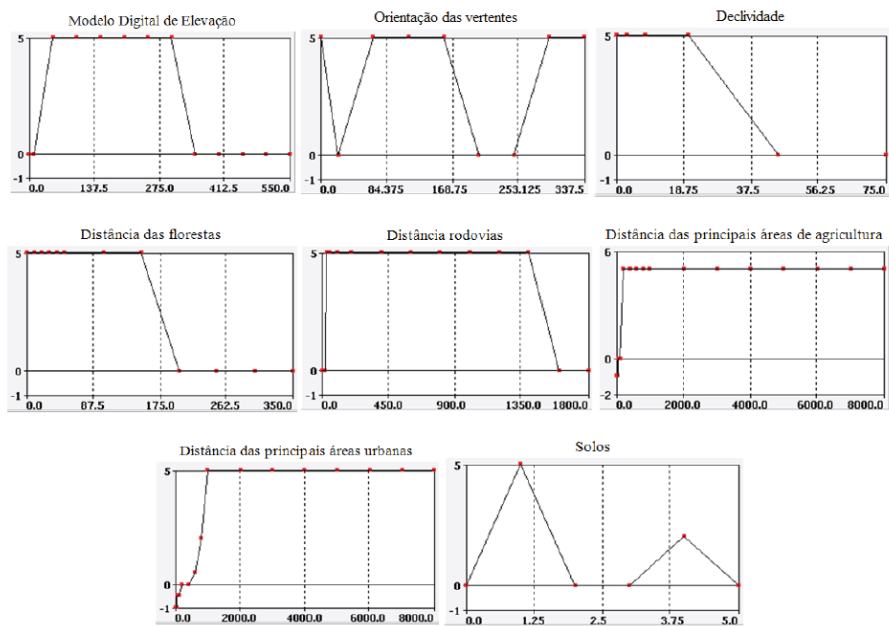


Fig. 4 - Pesos de evidência calibrados da transição Gramínea para Capoeira.

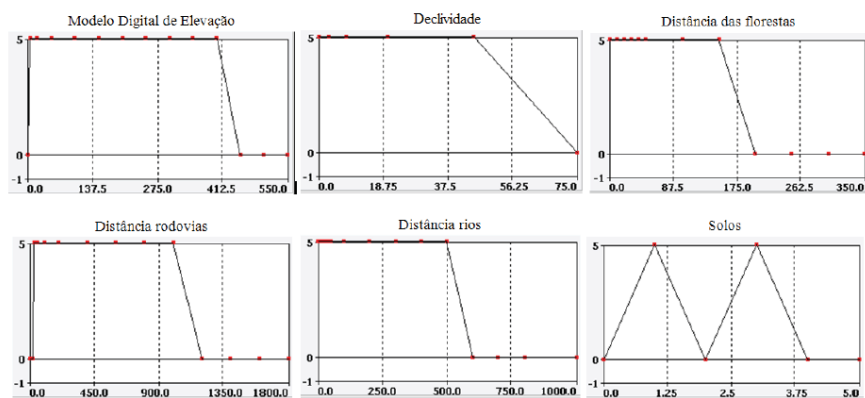


Fig. 5 - Pesos de evidência calibrados da transição Capoeira para Vegetação Secundária.

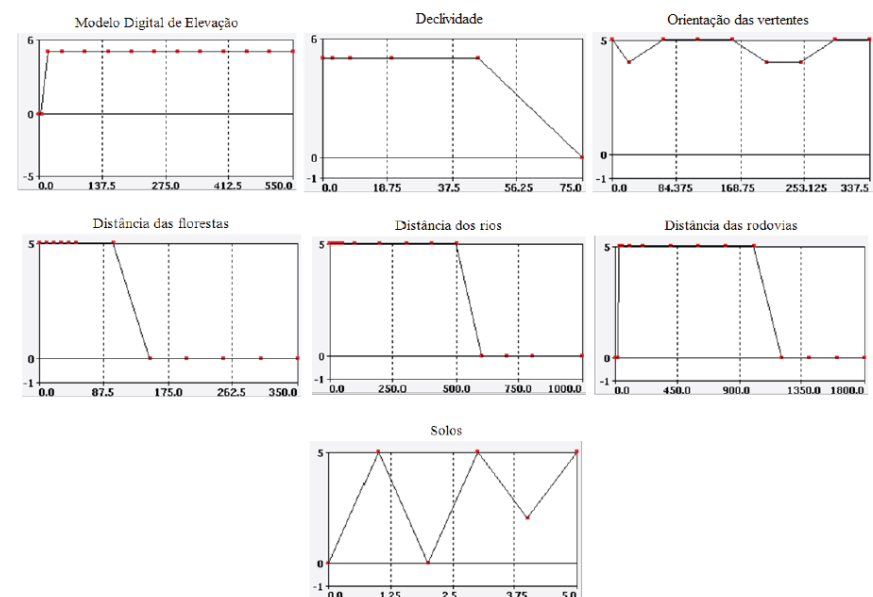


Fig. 6 - Pesos de evidência calibrados da transição Vegetação Secundária para Floresta.

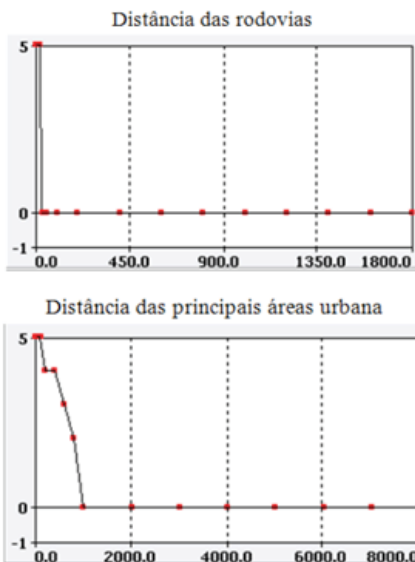


Fig. 7 - Pesos de evidência calibrados da transição Gramínea para Urbano.

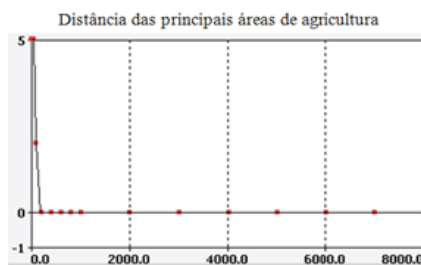


Fig. 8 - Gráfico do peso de evidência calibrado da transição Solo exposto e Agricultura para Gramínea.

### 2.3.6.2 Ajuste de parâmetros

Nessa etapa foram definidos apenas os parâmetros do algoritmo *patcher*, baseado no conceito de autômatos celulares e empregado para a criação das manchas de uso e cobertura da terra no modelo de simulação. O operador *patcher* busca as células que apresentam a maior probabilidade de transição e gera novas manchas de uma determinada classe usando um mecanismo de semeadura (SOARES-FILHO *et al.* 2009). As definições do tamanho médio e variância do tamanho das novas manchas de desmatamento se deram por meio de um procedimento heurístico, no qual o valor ideal de tamanho médio resultou em 1 ha e de variância em 1 ha. O índice de isometria adotado foi de 2,0.

Outros operadores foram utilizados nessa etapa, como o Calc Change Matrix, que calcula a quantidade de mudanças, multiplicando as taxas de transição pelo número de células de

cada categoria a ser alterada e o Mux Categorical Map, que cria um mapa categórico atualizado dinamicamente, alimentado em cada iteração pelo mapa de saída do modelo. As iterações correspondem ao intervalo de tempo entre o mapa inicial e o mapa final, ou seja, entre 1999 e 2010 temos 11 iterações. Essas iterações são controladas pela função Repeat. Essa função contém todos os operadores acima descritos e faz com que o fluxo de dados seja repetido n vezes, conforme o número de iterações.

### 2.3.7 Validação

Na etapa de validação do modelo foi aplicado o método de diferença e similaridade baseada na lógica fuzzy adaptado da Hagen (2003), que calcula os erros e acertos da modelagem. A similaridade corresponde ao grau de correspondência espacial entre o mapa real e o simulado para 2010, que varia de 0 a 1, que corresponde a combinação perfeita. Os tamanhos das janelas testadas foram de 11x11, 21x21 e 41x41 pixels (correspondente a 0,012 km<sup>2</sup>; 0,044 km<sup>2</sup> e 0,168 km<sup>2</sup>, respectivamente). Os valores de similaridade obtidos com os diferentes tamanhos de janela são apresentados na Tabela 2. Lima (2012) modelou a dinâmica florestal de todo o bioma Mata Atlântica e testou diferentes tamanhos de janelas para a validação do seu modelo, chegando a definir como tamanho de janela ideal 69 pixels (correspondente a 34,5 km), visto que acima desse valor ficou saturada a similaridade.

Tabela 2: Tamanho das janelas e grau de similaridade obtido

| Janela  | Similaridade |
|---------|--------------|
| 11 x 11 | 0,76         |
| 21 x 21 | 0,85         |
| 41 x 41 | 0,93         |

Os valores de similaridade obtidos apresentaram valores acima de 0,7, demonstrando que o modelo teve uma boa capacidade em prever a localização dos pixels de regeneração e antropização. Com a validação do modelo aceita, tornou-se possível extrapolar a modelagem e dar prosseguimento à etapa de simulação para datas futuras.

### 2.3.8 Simulação de cenários futuros

Para a simulação de cenários futuros foram utilizadas as mesmas configurações do modelo validado (regras de transição, pesos de evidência, patcher e expander). Nesta fase final, a simulação iniciou-se com o ano de 2010, sendo feita a primeira projeção para o ano de 2021 e em seguida feita a segunda projeção para o ano de 2032.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da modelagem de regeneração da vegetação de Aldeia Velha são apresentados a seguir, os resultados e constatações de outras pesquisas são paralelamente apresentados e contribuem para a análise e discussão dos resultados deste trabalho.

### 3.1 Mudanças no uso da terra e cobertura vegetal

A partir dos mapas de uso e cobertura da terra foram observados nítidos processos de regeneração entre as quatro classes de vegetação: Floresta, Vegetação Secundária, Capoeira e Gramínea. Os processos de regeneração observados revelaram que apesar de serem bem distribuídos ao longo da área de estudo, ocorrem de maneira bastante concentrada nas proximidades dos fragmentos florestais já estabelecidos.

Em algumas transições foi possível identificar a regeneração ocorrendo de maneira encadeada, ou seja, algumas áreas inicialmente

ocupadas por capoeira em 1999, evoluíram para vegetação secundária em 2005 e para floresta em 2010. Em outras áreas ocorreram também processos de regeneração encadeada, só que de maneira mais gradual, no qual a vegetação secundária foi discretamente evoluindo para a classe floresta. Paralelamente em outros locais foram verificados processos ainda mais discretos, ocorrendo somente o estabelecimento e adensamento de uma mesma classe ao longo dos três períodos. O exemplo mais comum é a classe capoeira, que em muitos locais apenas teve suas proporções adensadas, não chegando a evoluir para outra classe de regeneração.

### 3.2 Matriz de transição

A partir da análise das transições ocorridas de 1999 e 2005 (Tabela 3) se percebeu que as classes Floresta, Gramínea e Urbano, tiveram as maiores taxas de permanência, ou seja, não perderam parcelas significativas para nenhuma das outras classes. Já as classes Vegetação Secundária, Capoeira e Agricultura tiveram uma permanência mediana, porém com transições apropriadas, ou seja que correspondem à dinâmica de regeneração natural da vegetação. As únicas exceções desses dois grandes grupos de permanência e transições foram: a classe Solo Exposto, que teve tanto transição favorável a regeneração (Gramínea) quanto contrária em função da influencia agrícola; e a classe Água que não sofreu nenhuma alteração de valor.

Tabela 3: Matriz de transição entre classes

| 2005                        | 1999     |                      |          |          |              |             |      |        |
|-----------------------------|----------|----------------------|----------|----------|--------------|-------------|------|--------|
|                             | Floresta | Vegetação Secundária | Capoeira | Gramínea | Solo Exposto | Agricultura | Água | Urbano |
| <b>Floresta</b>             | 99.3%    | 26.7%                | 0.0%     | 0.0%     | 0.0%         | 0.0%        | 0.0% | 0.0%   |
| <b>Vegetação Secundária</b> | 0.0%     | 71.8%                | 31.4%    | 0.0%     | 0.0%         | 0.0%        | 0.0% | 0.0%   |
| <b>Capoeira</b>             | 0.0%     | 0.0%                 | 67.1%    | 2.3%     | 5.6%         | 0.0%        | 0.0% | 0.0%   |
| <b>Gramínea</b>             | 0.4%     | 1.5%                 | 1.5%     | 90.5%    | 44.4%        | 36.7%       | 0.0% | 0.3%   |
| <b>Solo Exposto</b>         | 0.0%     | 0.0%                 | 0.0%     | 0.0%     | 5.6%         | 0.0%        | 0.0% | 0.0%   |
| <b>Agricultura</b>          | 0.0%     | 0.0%                 | 0.0%     | 0.8%     | 44.4%        | 63.3%       | 0.0% | 0.0%   |
| <b>Água</b>                 | 0.0%     | 0.0%                 | 0.0%     | 0.0%     | 0.0%         | 0.0%        | 100% | 0.0%   |
| <b>Urbano</b>               | 0.3%     | 0.0%                 | 0.0%     | 6.4%     | 0.0%         | 0.0%        | 0.0% | 99.7%  |
| <b>Total</b>                | 100%     | 100%                 | 100%     | 100%     | 100%         | 100%        | 100% | 100%   |

### 3.3 Simulação para 2010

Como resultado das etapas de calibração e ajuste, foram obtidos os cenários de simulação, por classe, para o ano de 2010. Apesar de terem sido realizadas várias simulações, são apenas apresentados os cenários considerados como satisfatórios para cada classe de uso e cobertura simulada (figuras 9, 10, 11 e 12). Por último é apresentado o cenário final de simulação para 2010, com todas as classes de uso e cobertura, que contém acumulado todos os níveis da modelagem realizada (Figura 13).

As variáveis mais significativas para a modelagem e que foram adotadas na calibração dos pesos de evidência foram: modelo digital de elevação, declividade, distância das rodovias e distância das principais áreas de agricultura. E em teoria conforme descrito no item regras de transição, essas quatro variáveis representam influências diretas com o processo de regeneração.

Pode-se observar na simulação que a classe Capoeira apresentou uma lógica de ocupação sistemática, sendo as novas manchas criadas localizadas bem próximas às áreas ocupadas por vegetação com estágio sucessional mais

avançado (floresta e vegetação secundária). Pode se perceber um excesso de manchas criadas, principalmente na área cercada por dois fragmentos florestais bastante próximos. Isso pode ser justificado pelo grande intervalo de tempo que compreende essa simulação, 11 anos.

As simulações das classes Vegetação secundária e Floresta já apresentaram lógica de ocupação bastante condizente com a realidade, podendo ser isso associado ao fato que esses dois tipos de simulação correspondem à evolução de um estágio sucessional anterior que já apresentava feições bem definidas e era discretamente localizada na paisagem mapeada.

Já as simulações das classes Gramínea e Urbano seguiram uma lógica de distribuição associada à presença inicial dessas classes, principalmente na classe urbano, onde foi possível simular o adensamento do núcleo urbano e a pavimentação de estradas de terras. Na classe Gramínea também foi possível observar uma lógica próxima a realidade observada, visto que o crescimento de novas gramíneas ocorreu bastante próximo às áreas de agriculturas já inicialmente estabelecidas.

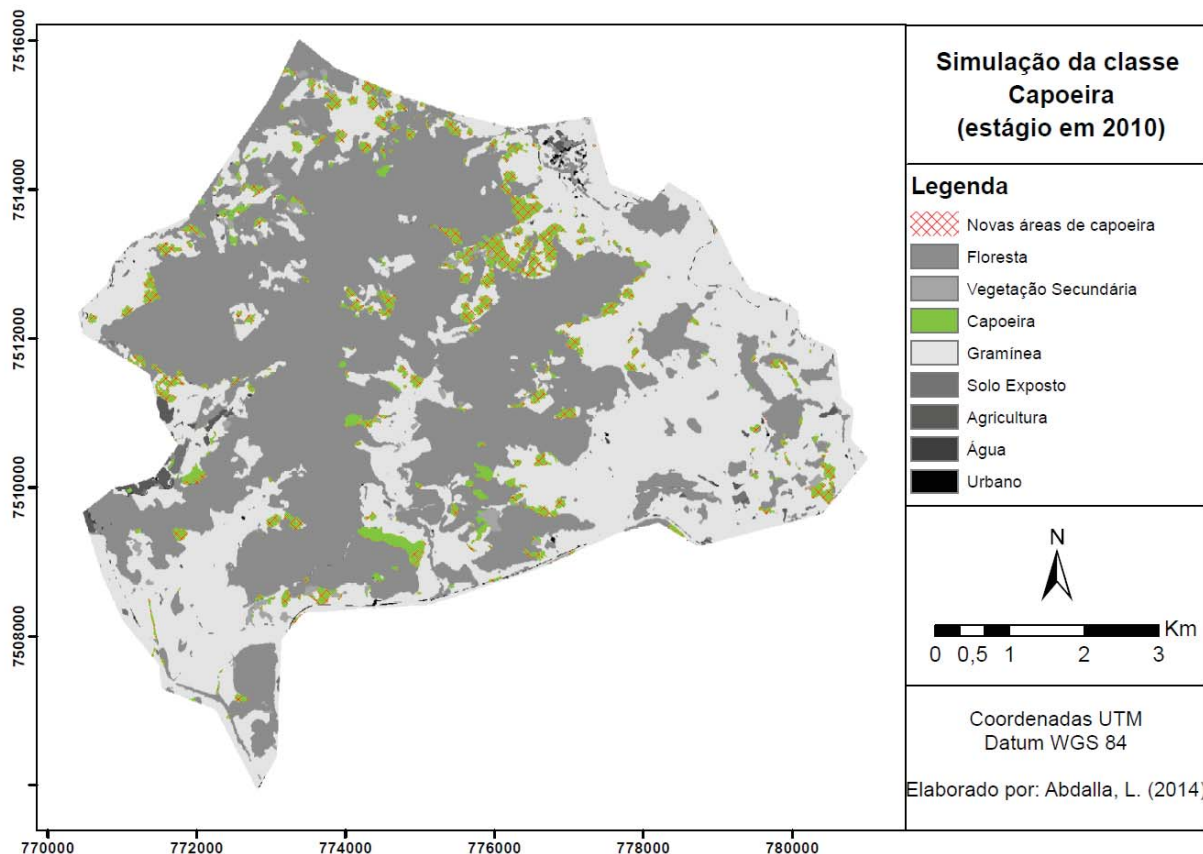


Fig. 9 - Simulação da classe Capoeira.

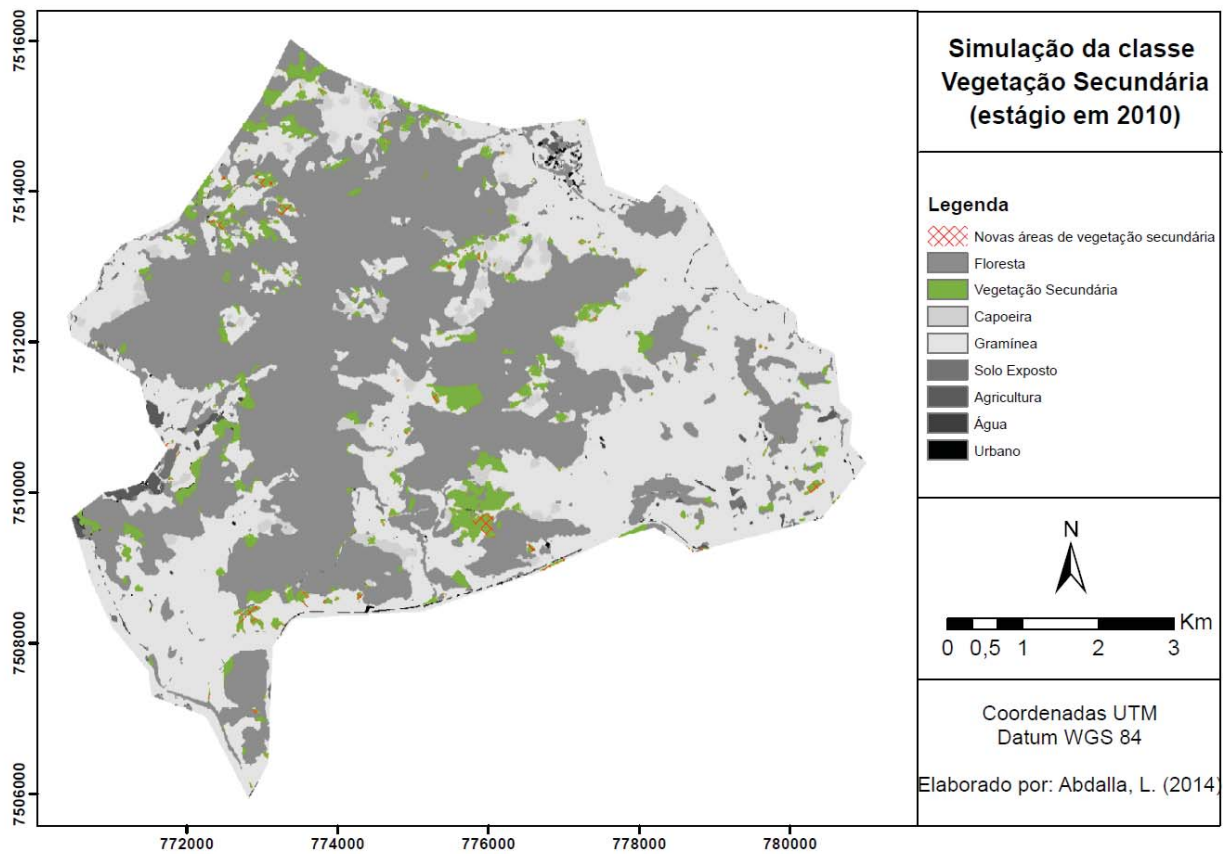


Fig. 10 - Simulação da classe Vegetação secundária.

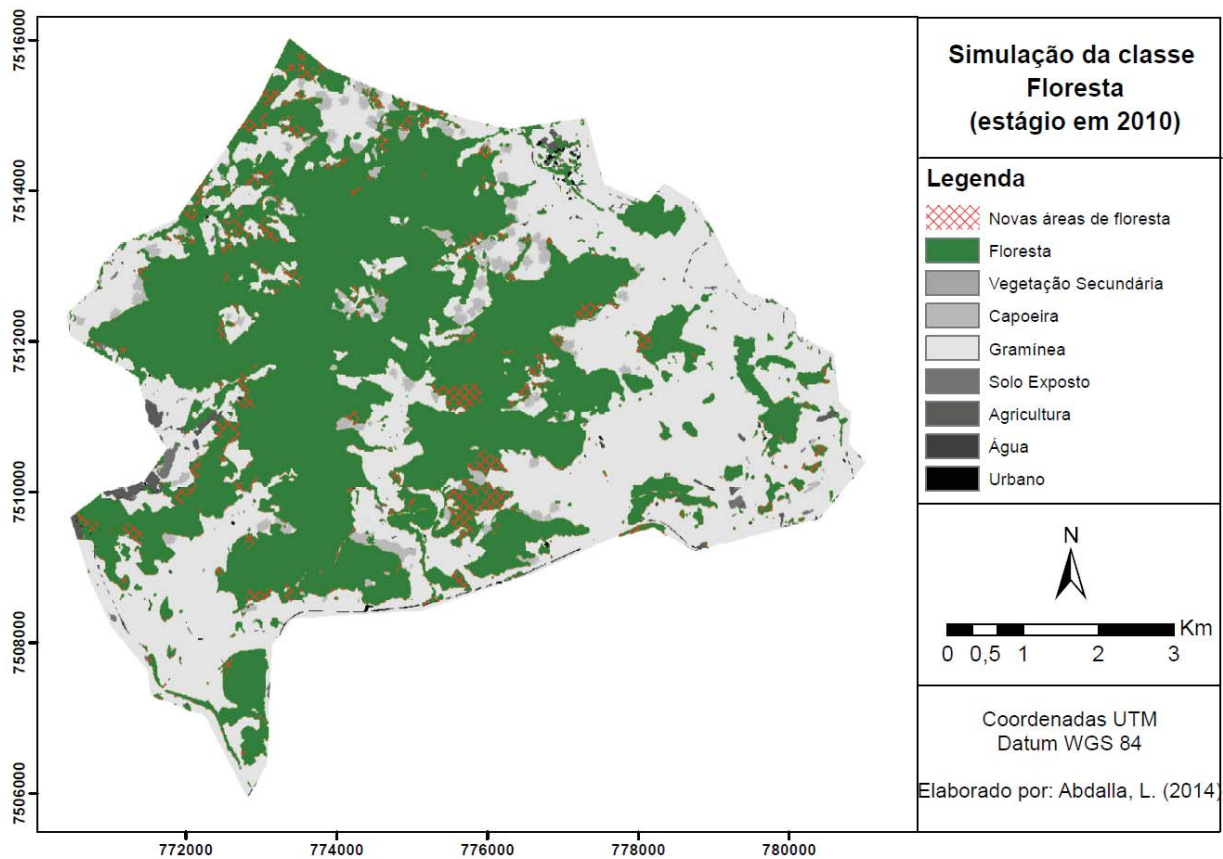


Fig. 11 - Simulação da classe Floresta.

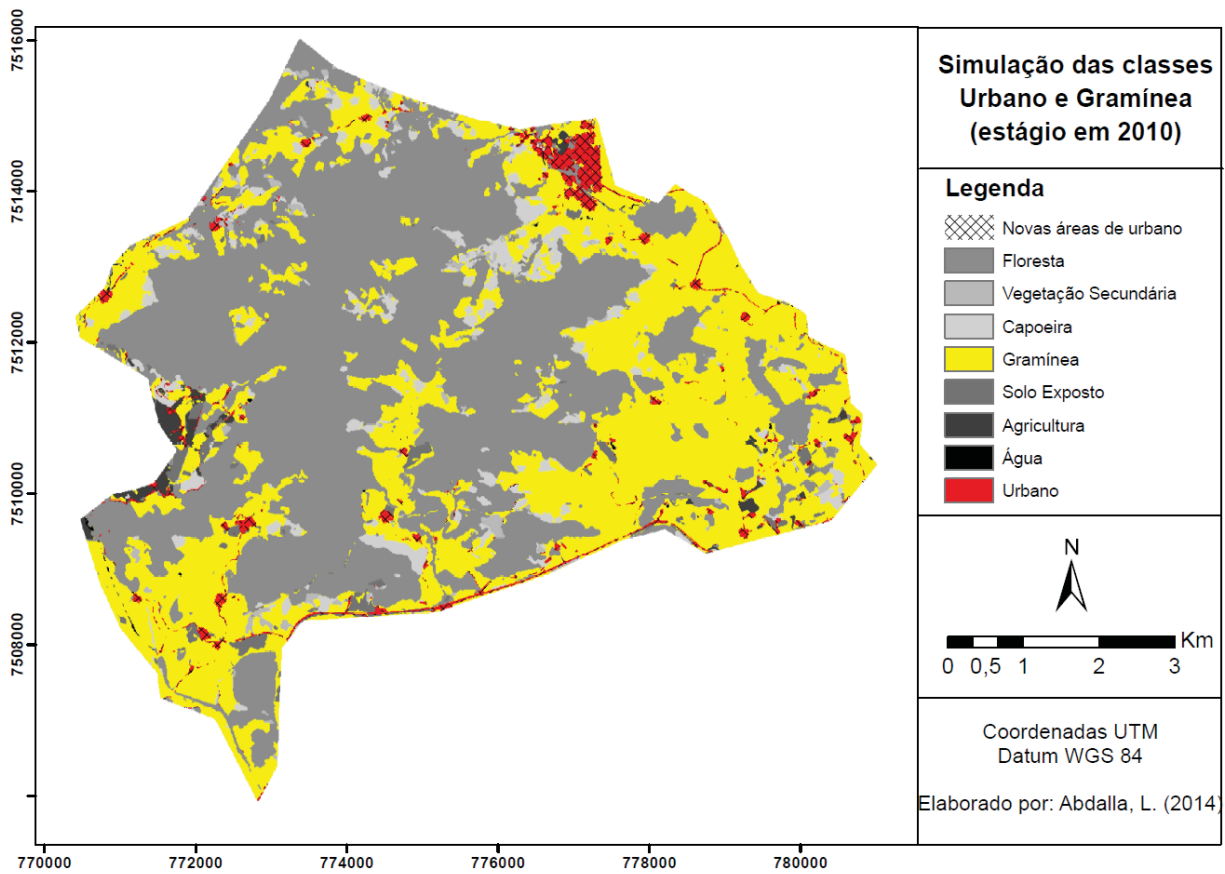


Fig. 12 - Simulação das classes Urbano e Gramínea.

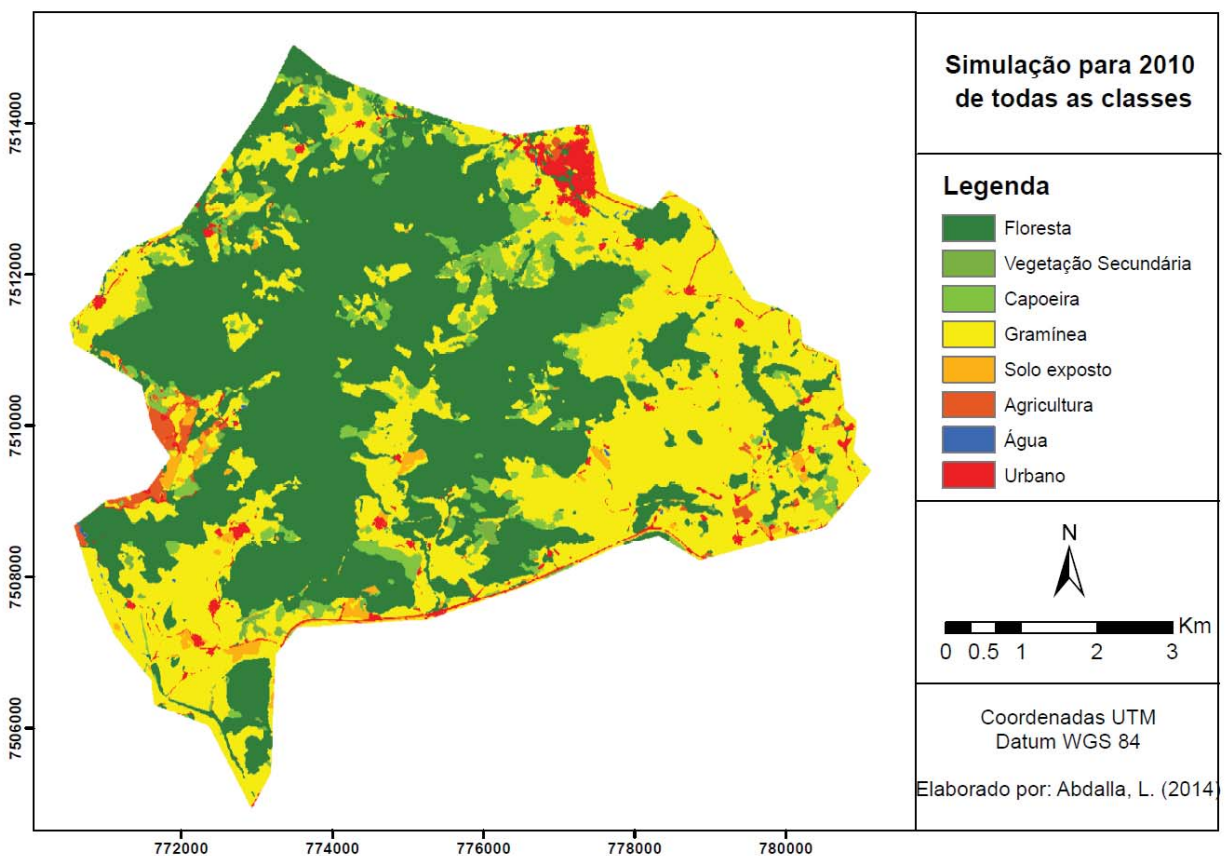


Fig. 13 - Simulação de todas as classes para ano de 2010.



### 3.4 Simulação de cenários futuros

Nessa etapa foram elaborados os cenários de tendências futuras. Esses cenários partem da calibração obtida para simulação do cenário de 2010, mantendo todos os parâmetros utilizados inalterados, assim como a modelagem em cinco níveis de transição. Apenas foi alterado o mapa inicial, que passou a ser o mapa de uso e cobertura da terra de 2010 e o número de iterações atribuídas ao Repeat, que passou a ser correspondente a data de 2021 e 2032, logo 22 iterações.

Segundo Almeida *et al.* (2003) deve-se evitar a simulação de longo prazo pelo fato de que as mudanças são dificilmente previsíveis para grandes períodos, isso por sofrer influência de setores como a economia, infraestrutura, dentre outros. Para a autora, apenas o curto e médio prazo são relevantes para a definição de prioridades, alocação de recursos e tomada de decisão. Apesar de não existirem definições oficiais com relação a curto e médio prazo em estudos de projeção de cenários futuros, para estudos de uso do solo urbano, a autora considera para curto prazo um período de 5 anos e para médio prazo um período de 11 anos.

Num primeiro momento pode-se imaginar a predição como sendo não adequada, já que

o processo dinâmico natural da vegetação com certeza sofre influências externas, como as mudanças promovidas pela antropização do ambiente. No entanto, como não foram observadas intervenções antrópicas tão expressivas no histórico de evolução da área de estudo, principalmente por esta se tratar de uma unidade de conservação no qual o manejo é controlado pela legislação ambiental, não houve razão suficiente para reduzir o período de projeção futura, mesmo tendo dobrado o período estabelecido de médio prazo por Almeida *et al.* (2003). Além disso, esse prazo foi estabelecido considerando o resultado positivo da construção do modelo para o ano de 2010. Os cenários obtidos com a simulação para o futuro são apresentados nas figuras 14 e 15.

Os cenários simulados apresentaram tendências mais expressivas da regeneração da classe capoeira em áreas ocupadas por gramíneas em 2010, ocorreu regeneração expressiva também da classe vegetação secundária em áreas ocupadas por capoeira, enquanto que a regeneração da classe floresta se apresentou de maneira bastante discreta e pontual, pela própria natureza do processo, sendo apenas perceptível na simulação para 2032 (exemplos de ocorrência indicados pelos círculos vermelhos nas figuras 14 e 15).

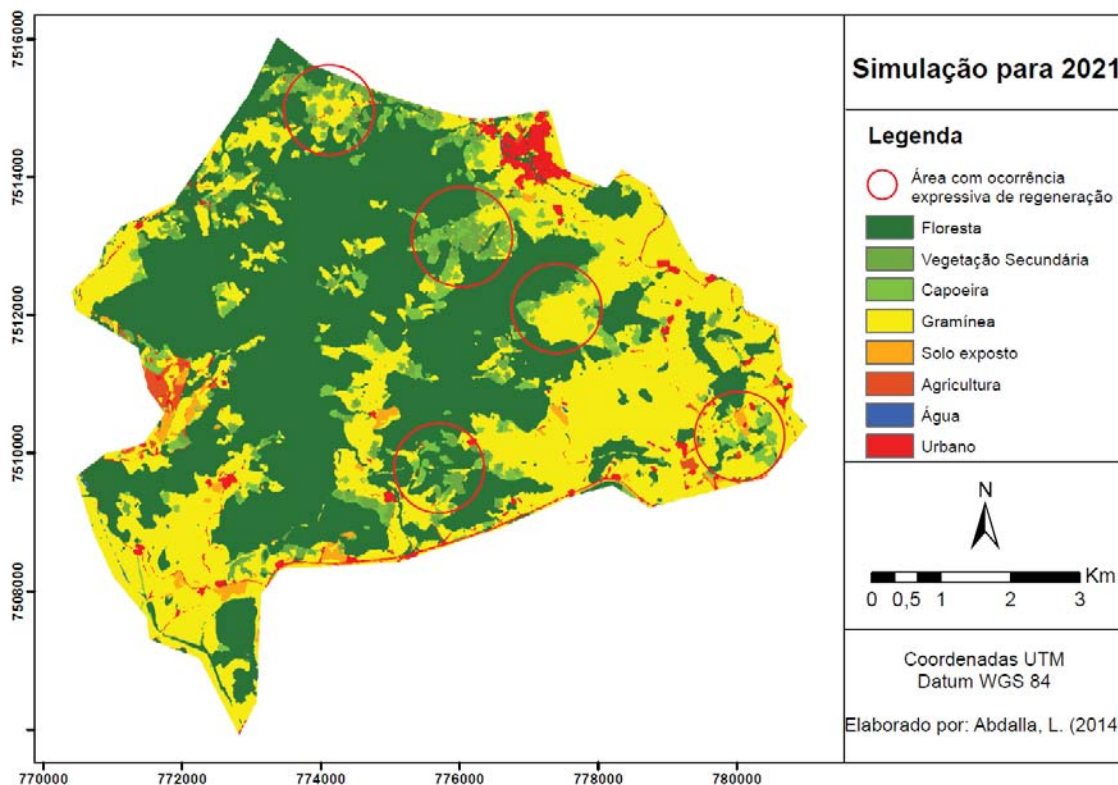


Fig. 14 - Simulação de uso e cobertura da terra para 2021.

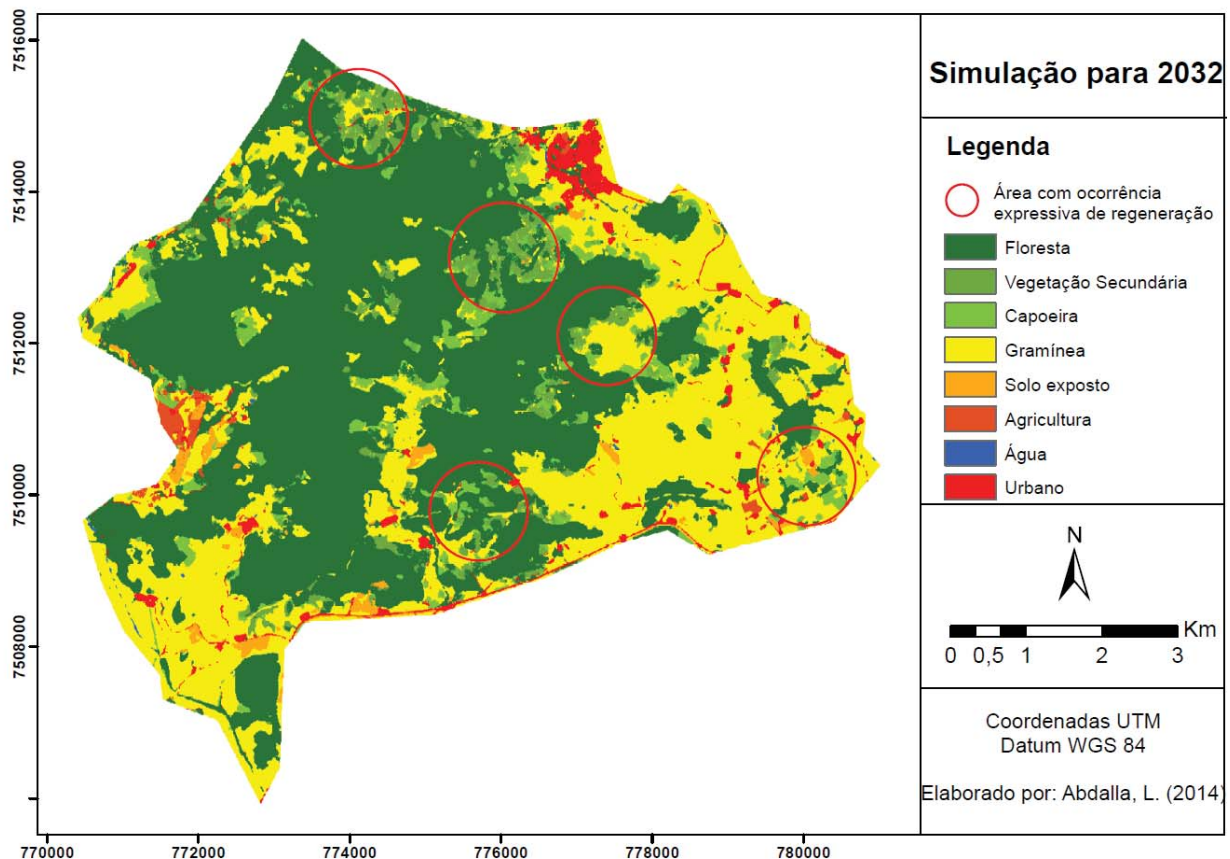


Fig. 15 - Simulação de uso e cobertura da terra para 2032.

Os locais em que ocorreram as regenerações de capoeira para 2021 e 2032 seguiram a mesma lógica de distribuição da modelagem validada anteriormente. Próximas às áreas ocupadas por tipo de vegetação com estágio sucessional mais avançado (floresta e vegetação secundária), principalmente na área cercada por dois fragmentos florestais bastante próximos. As transições referentes às gramíneas e expansão das áreas urbanas corresponderam à regra de proximidade com as feições existentes a essas classes em 2010, ou seja, o crescimento das gramíneas ficou bem próximo aos locais em que já vinha sendo praticada rotação de culturas e de terras. As áreas de expansão urbana também se mantiveram vinculadas a áreas próximas as margens dos núcleos urbanos e a beira das principais estradas. De maneira análoga, Suarez e Candeias (2014) destacaram que a proximidade ao desmatamento pré-existente e às áreas urbanizadas exercem grande influência na ocorrência da transformação de remanescentes florestais de Mata Atlântica em outros tipos de cobertura.

Mesmo que a simulação possa alcançar

melhores resultados com relação à representação da regeneração na Mata Atlântica, a modelagem deverá abranger áreas maiores, seja na totalidade da APA da bacia do Rio São João, na qual o distrito de Aldeia Velha está inserido, seja em todas as unidades de conservação distribuídas nos remanescentes de Mata Atlântica. Possivelmente, de maneira a poder melhor caracterizar as áreas, a estratégia de montar submodelos seja mais adequada à realidade de cada região. Para tanto deve-se ter claro que a complexidade do modelo tende a aumentar com o número de variáveis e transições no uso do solo, visto a grande heterogeneidade estrutural, biológica e climática que possui a Mata Atlântica. Para Gonçalves *et al* (2011) o resultado na modelagem com autômatos celulares depende de vários fatores como, por exemplo: o número de estados escolhidos, a vizinhança escolhida e principalmente a escolha das regras de transição.

Os resultados encontrados apontam para a capacidade eficaz de regeneração natural da vegetação. Dessa maneira, se existirem políticas de preservação e conservação dos fragmentos florestais, como a Associação Mico

Leão Dourado, torna-se possível que a própria dinâmica ecológica do local se encarregue de recuperar a biodiversidade e o equilíbrio ambiental dessas regiões. Para as áreas com poucas evidências de regeneração, podem aplicados incentivos políticos fiscais para o reflorestamento com espécies nativas.

#### 4. CONCLUSÕES

A modelagem dinâmica baseada em autômatos celulares, implementada no software Dinamica demonstrou ser eficiente por ser totalmente ajustável e adaptável ao fenômeno que se está modelando. A partir da calibração dos pesos de evidência foi possível verificar a real influência de cada variável na dinâmica da vegetação do local de estudo, revelando como característica inerente dessa modelagem a transparência no seu processamento interno. Em contrapartida, apresentou prejuízos na simulação da regeneração da vegetação em um único nível de modelagem, pois as transições simultâneas de todas as classes de vegetação promoveram uma sucessão acumulada equivocada, sendo por isso necessária a modelagem em diferentes níveis.

A classificação das imagens de alta resolução espacial através da interpretação visual dos segmentos foi uma etapa muito dispendiosa, porém importante, visto que a identificação dos estágios sucessionais da vegetação dependem da percepção combinada da resposta espectral com o padrão textural. Além disso, foi verificada a necessidade do mapeamento em grande escala, pois como o fenômeno da regeneração se trata de um evento bastante discreto e pontual, foi essencial que existisse a percepção dos menores detalhes ao longo da paisagem observada.

Os produtos dessa pesquisa – tanto a modelagem quanto o mapeamento temporal – contribuíram para a comprovação da hipótese de que o fenômeno da regeneração esteja em curso na Mata Atlântica, como também para a confirmação dos estudos biológicos in situ já realizados, que indicam que a vegetação do município de Silva Jardim está em processo de regeneração natural. Além disso, fornece evidências sobre a importância estratégica das unidades de conservação na preservação dos remanescentes florestais, capaz de definir normas sob o uso e o manejo dos recursos naturais da área, reduzindo com isso os impactos antrópicos

e facilitando a recuperação ambiental do local.

Em estudos futuros sugere-se testar a influência de outras três variáveis ambientais: curvatura vertical do terreno, radiação solar e índice topográfico de umidade. A curvatura vertical do terreno corresponde ao caráter côncavo/convexo, e está relacionada aos processos de migração e acúmulo de água, minerais e materiais orgânicos no solo, favorecendo a formação de fragmentos florestais. A radiação solar influencia dinâmica da vegetação, de modo que as maiores áreas de fragmentos em processo de regeneração natural possuem baixos valores de radiação global anual. E o índice topográfico de umidade indica que áreas com solos mal drenados possuem menor percentual com cobertura vegetal. Também se deve experimentar a modelagem em diferentes intervalos de tempos, de modo a investigar qual o comportamento do autômato celular na evolução baseada em passos discretos de tempo. Recomenda-se ainda a experimentação da modelagem por subáreas, possibilitando a construção de modelos mais ajustados às características ambientais e físicas dos locais mapeados.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, C.; BATTY, M.; MONTEIRO, M.; CAMARA, G.; SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G.; PENNACHIN, C. L. 2003. 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, set. 2003. Disponível em: < [http://www.dpi.inpe.br/gilberto/papers/claudia\\_almeida\\_ceus.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/papers/claudia_almeida_ceus.pdf)> Acesso em: 04 out. 2012.
- AYRES, J. M.; FONSECA, G. A. B.; RYLANDS, A. B.; QUEIROZ, H. L.; PINTO, L. P.; MASTERSON, D. e CAVALCANTI, R. B. **Os corredores ecológicos das florestas tropicais do Brasil**. Belém: Sociedade Civil Mimirauá, 2005. Disponível em: < <http://www.conservation.org.br/publicacoes/files/CorredoresEcologicos.pdf>> Acesso em: 03 fev. 2013.
- BENEDETTI, A. C. P. **Modelagem dinâmica para simulação de mudanças na cobertura florestal das serras do sudeste e campanha meridional do Rio Grande do Sul**. 2010. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) –

- Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria - 2010. Disponível em: <[http://coral.ufsm.br/ppgef/pdf/TESE/TESE\\_Ana\\_Caroline\\_Paim\\_Benedetti.pdf](http://coral.ufsm.br/ppgef/pdf/TESE/TESE_Ana_Caroline_Paim_Benedetti.pdf)> Acesso em: 03 out. 2012.
- BONHAM-CARTER, G. F., 1994. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Pergamon, Oxford, 398pp.
- BONHAM-CARTER, G.F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Computer methods in the geosciences**, volume 13. England, Pergamon. 398p., 1996.
- BOHRER, C. B. A. Mata Atlântica e formações associadas. In: Mozart V. Serra; Maria Teresa F. Serra. (Org.). **Guia de História Natural do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Ed. Cidade Viva, 2012, p. 138-157.
- CARVALHO, F. A.; NASCIMENTO, M. T.; OLIVEIRA, P. P.; RAMBALDI, D. M. e FERNANDES, R. V. A importância dos remanescentes florestais da Mata Atlântica de baixada costeira fluminense para a conservação da biodiversidade na APA da Bacia do Rio São João/Mico-Leão-Dourado/IBAMA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO, n. IV, 2004, Curitiba, **Livro de resumos...** Fundação O Boticário de Proteção à Natureza: Rede Nacional Pró Unidades de Conservação, 2004. p. 106-113. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/publication/248381550\\_A\\_IMPORTANCIA\\_DOS\\_REMANESCENTES\\_FLORESTAIS\\_DA\\_MATA\\_ATLANTICA\\_DA\\_BAIXADA\\_COSTEIRA\\_FLUMINENSE\\_PARA\\_A\\_CONSERVAO\\_DA\\_BIODIVERSIDADE\\_NA\\_APA\\_DA\\_BACIA\\_DO\\_RIO\\_SO\\_JOOICO-LEO-DOURADOIBAMA\\_-\\_RJ](http://www.researchgate.net/publication/248381550_A_IMPORTANCIA_DOS_REMANESCENTES_FLORESTAIS_DA_MATA_ATLANTICA_DA_BAIXADA_COSTEIRA_FLUMINENSE_PARA_A_CONSERVAO_DA_BIODIVERSIDADE_NA_APA_DA_BACIA_DO_RIO_SO_JOOICO-LEO-DOURADOIBAMA_-_RJ)> Acesso em: 09 jul. 2012.
- CHRISTO A. G., GUEDES-BRUNI R. R., SOBRINHO F. A. P. Structure of the shrub-arboreal component of an Atlantic Forest fragment on a hillock on the central lowland of Rio de Janeiro, Brazil. **Interciencia**, Rio de Janeiro, v. 34, n. 4, p. 232–239, 2009. Disponível em: <<http://www.producao.usp.br/handle/BDPI/27651>> Acesso em: 08 set. 2012
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2a ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 286 p.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: **Reunião técnica de levantamentos de solos**, n. 10. 1979, Rio de Janeiro. Súmula. Rio de Janeiro, 1979. p 83. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).
- FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas da evolução dos remanescentes florestais e ecossistemas associados no domínio da Mata Atlântica no período 1995-2000**. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2002. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2003/06.02.07.45/doc/RelatorioAtlas.pdf>> Acesso em: 03 ago. 2012.
- GONÇALVES, R. M.; CENTENO, T. M.; CANDEIAS, A. L. B. Autômatos celulares aplicados na modelagem de tendência em imagens multi-temporais. **Revista Brasileira de Cartografia – RBC**. n 63/02, p. 233-241, 2011. Disponível em: <<http://www.rbc.lsie.unb.br/index.php/rbc/article/view/375/368>> Acesso em: 15 jun. 2015
- GREMONINI, L.; VICENTINI, E. Autômatos celulares: revisão bibliográfica e exemplos de implementações. **Revista eletrônica Lato Sensu - UNICENTRO**, Ed. 6, p. 3-19. 2008. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/82372266/Automatos-Celulares-1-Ed6-CE-Autom-MUITO-BOM>> Acesso em: 22 set. 2012.
- HENZ, J, SILVEIRA, R.D., FILHO, W.P., CASSOL, R, Correlação entre orientação das vertentes e uso do solo das bacias hidrográficas Arroio Travesseiro e Sanga do Velocindo-RS. In: 10o Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. **Anais**. Rio de Janeiro, pp.2141-2143. 2003.
- HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**, London, v. 17, n. 3, p 235-249. 2003. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/13658810210157822>> Acesso

em: 22 set. 2012.

LIMA, C. M. G. **Modelagem de transição florestal na Mata Atlântica**. 2012. 64 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: < [http://www.csr.ufmg.br/modelagem/dissertacoes/carolina\\_guilen.pdf](http://www.csr.ufmg.br/modelagem/dissertacoes/carolina_guilen.pdf)> Acesso em: 22 jul. 2013.

LUMBRERAS, J.F.; CARVALHO FILHO, A.; CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, R.D. 2001. **Levantamento pedológico, vulnerabilidade e potencialidade ao uso das terras – Quadrículas de Silva Jardim e Rio das Ostras, Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2001. (Boletim de Pesquisa n° 23). Disponível em: <[www.cnps.embrapa.br/publicacoes/pdfs/bp23\\_2001\\_silva\\_jardim.pdf](http://www.cnps.embrapa.br/publicacoes/pdfs/bp23_2001_silva_jardim.pdf)> Acesso em: 12 ag. 2012.

MACHADO, L. G. Análise da influência da topografia na variação sazonal de fitofisionomias na bacia do Rio Veríssimo – GO. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 25-30, abril 2009. Natal. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto**, Natal, INPE, 2009. p. 2817-2822.

MAZZOTTI, F. J.; VINCI, J. J. **Validation, verification, and calibration: Using standardized terminology when describing ecological models**. University of Florida. IFAS Extension. 2p. 2007. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/uw256>> Acesso em 23 out. 2012.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Processo de Atualização das Áreas Prioritárias para Conservação, Uso Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira**. Brasília: Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2006.

NASCIMENTO, D.R. **Efeito Da Variação De Vertente Sobre A Área Foliar da Bromélia Quesnelia Sp**. Prática da pesquisa em Ecologia da Mata Atlântica. Curso de Pós-Graduação em Ecologia Universidade de São Paulo. 2010. 3 p.

NEVES, G. M. S. e PEIXOTO, A. L. Florística e estrutura da comunidade arbustivo-arborea de

dois remanescentes em regeneração de Floresta Atlântica secundária na Reserva Biológica de Poço das Antas, Silva Jardim, Rio de Janeiro. **Pesquisas Botânica**. v. 59, p. 71-112, 2008.

NOGUEIRA, P. M. **Influência de variáveis ambientais no processo de regeneração natural da Mata Atlântica no Vale do Paraíba do sul**. 2012. 55 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/inst/monografia/2012I/polyana.pdf>> Acesso em: 02 de set. 2012

PEDROSA, B. M. **Ambiente Computacional para Modelagem Dinâmica Espacial**. 2003. 98 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2003. Disponível em: <<http://mtc-m16.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2003/10.08.14.50/doc/publicacao.pdf>> Acesso em: 22 out. 2012.

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O.; COSTA, W. L. 2009. **Modelagem de Dinâmica Ambiental com Dinamica EGO**. Centro de Sensoriamento Remoto. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Minas Gerais. 116p. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>>. Acesso: 02 out. 2012.

SOARES-FILHO, B. S. **Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. 1998. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. Disponível em: < <http://www.csr.ufmg.br/csr/publicacoes/tese/capa.pdf>> Acesso em: 02 set. 2012.

SUAREZ A.F., CANDEIAS A.L.B. Modelagem dinâmica de cobertura da terra na mata atlântica no município de Maragogipe – BA. **Revista Brasileira de Cartografia**, n° 66/5. 2014. 953-981pp. Disponível em: < <http://www.rbc.lsie.unb.br/index.php/rbc/article/view/557/720>> Acesso em: 15 jun. 2015.

TABARELLI, M.; PINTO, L. P.; SILVA, J. M. C.; HIROTA, M. M. & BEDÊ, L. C. Desafios e oportunidades para a conservação da biodiversidade na Mata Atlântica brasileira. **Megadiversidade**. Pernambuco, v. 1, p. 132-138,

2005. Disponível em: <[http://www.conservacao.org/publicacoes/files/18\\_Tabarelli\\_et\\_al.pdf](http://www.conservacao.org/publicacoes/files/18_Tabarelli_et_al.pdf)> Acesso em: 03 set. 2012.

VALCARCEL, R.; VALENTE, F. D. W.; MOROKAWA, M. J.; NETO, F. V. C.; PEREIRA,

C. R. Avaliação da biomassa de raízes finas em área de empréstimo submetida a diferentes composições de espécies. **Árvore**, v.31, n.5, p.923-930, 2007. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48831516>> Acesso em: 20 nov. 2012.