

MODELOS DE SIMULAÇÃO DINÂMICA DO DESMATAMENTO NA AMAZÔNIA

Anderson Ruhoff

Instituto de Pesquisas Hidráulicas
anderson.ruhoff@ufrgs.br

Ibraim Fantin-Cruz

Instituto de Pesquisas Hidráulicas
ibraimfantin@gmail.com

Walter Collischonn

Instituto De Pesquisas Hidráulicas
collischonn@iph.ufrgs.br

RESUMO

Atualmente, a Amazônia é foco de diversos estudos científicos que buscam analisar impactos da ocupação humana sobre a cobertura florestal. Os principais questionamentos relacionados a esta temática diz respeito à evolução do processo de desmatamento e a maneira de prevê-los. Por isso, este trabalho teve por objetivo simular e validar a dinâmica do desmatamento em uma região Amazônica. Para tanto, são ajustados dois modelos de simulação: (1) Cadeias de Markov, e, (2) Redes Neurais Artificiais, com dados de uso e cobertura da terra extraídos de imagens LANDSAT, nos períodos de 1997 e 2001. Para validação dos modelos, foram comparados os valores simulados e observados do ano de 2004. Dados de uso e cobertura da terra indicam que na área estudada as taxas absolutas de desflorestamento diminuíram de 4,71% para 1,43%, enquanto as taxas de regeneração florestal aumentaram de 0,14% para 2,53%, durante o estudo. A simulação por Cadeias de Markov apresentou menores variações (12,5%) quando comparadas as redes neurais (23%) para áreas de não-florestas entre dados observados e simulados. Os modelos de simulação não mostraram-se eficientes uma vez que o processo de desmatamento não ocorreu de forma estacionária.

Palavras chave: uso e ocupação do solo, desflorestamento, dinâmica da paisagem, Cadeias de Markov, Redes Neurais Artificiais, LANDSAT.

DYNAMIC SIMULATION MODELS OF DEFORESTATION IN THE AMAZON RAINFOREST

ABSTRACT

The Amazon rainforest today is the focus of a variety of scientific studies that seek to analyze the impact of human occupation on the forest cover. The main issues relating to this theme involve the evolution of the deforestation process and how to predict it. Therefore, the objective of this work was to simulate and validate the dynamics of deforestation in region of the Amazon. To this end, two simulation models: (1) Markov Chains, and (2) Artificial Neural Networks, were fitted with data on land use and cover extracted from LANDSAT images from the periods of 1997 and 2001. To validate the models, comparisons were made of the simulated values and the values observed in 2004. Data on land use and cover indicate that in the area of study the absolute deforestation rates declined from 4.71% to 1.43%, while the forest regeneration rates increased from 0.14% to 2.53% during this study. Markov Chain simulation showed small variations (12.5%) compared with neural network (23%) between observed and simulated data for non-forest areas. The simulation models proved to be inefficient, since the deforestation process did not occur in a stationary mode.

Keywords: land use and occupation, deforestation, landscape dynamics, Markov Chains, Artificial Neural Networks, LANDSAT.

Recebido em 20/02/2010
Aprovado para publicação em 17/12/2010

INTRODUÇÃO

Atualmente, a Amazônia é foco de diversos estudos científicos que buscam analisar impactos da ocupação humana sobre a cobertura florestal. Esses estudos são motivados principalmente por questões relacionadas às mudanças climáticas, emissão e seqüestro de carbono e aquecimento global. As taxas brutas de desmatamento, segundo dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2007), vêm se acelerando em cerca de 13% ao ano (para o biênio 2002-2003). Diversas são as causas do desmatamento, bem como diversas são suas conseqüências. As causas do desmatamento compreendem, desde incentivos fiscais e políticas de colonização, as quais desencadearam fortes processos migratórios, até cenários macroeconômicos atuais, envolvendo exploração madeireira, pecuária e expansão de cultura de soja sobre áreas de pastagens (GARCIA et al., 2007). A abertura e pavimentação de estradas, segundo Nepstad et al. (2002) e Laurence et al. (2004), consolidam esse quadro, uma vez que promovem a viabilidade econômica das atividades realizadas na Amazônia, com conseqüente valorização de suas terras. Dada à importância ambiental da Amazônia e as potenciais conseqüências negativas do desflorestamento, diversos estudos buscam compreender a dinâmica das mudanças de uso e cobertura da terra na região.

Dentro desses estudos, destacam-se Nepstad et al. (2002), na análise das políticas de ocupação da Amazônia e suas relações diretas com o processo de desmatamento; Lamb et al. (2005) e Lambin et al. (2003), analisam as principais forças direcionadoras do processo de desmatamento em florestas tropicais; Metzger e Oliveira-Filho (2006) avaliam os principais padrões de desmatamento; Achard et al. (2002) determinam as taxas de desflorestamento; enquanto Garcia et al. (2007), Soares-Filho et al. (2006), Walsh et al. (2008) e Flamenco-Sandoval et al. (2007) simulam o processo de desflorestamento, com base em modelos dinâmicos de mudanças de uso e cobertura da terra.

A partir disso, o objetivo desse trabalho compreende: (1) simular o processo de desmatamento na Amazônia, com base em dados de uso e cobertura da terra, para os anos de 1997 e 2001, utilizando Cadeias de Markov e redes neurais artificiais; e, (2) comparar os resultados simulados com dados de uso e cobertura da terra para o ano de 2004, tendo estes como verdades de campo.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada ao oeste do estado do Pará. Segundo Metzger e Oliveira Filho (2006), a precipitação média anual é de 2350 mm e a temperatura média é de 24,5 C, com umidade relativa do ar variando entre 80 e 85%. As altitudes variam entre 50 e 300 metros em formações de origem pré-cambriana. A vegetação corresponde à floresta pluvial tropical. A região corresponde à órbita-ponto 227-63 do satélite LANDSAT. Destacam-se na área de estudo importantes vias de acesso para a região e vetores de desmatamento, como as rodovias BR 163 e BR 230, além dos rios Iriri e Tapajós (Figura 1).



FIGURA 1. Área de estudo, na qual se destacam as rodovias BR 230 e parte da BR 163, além do padrão de desmatamento denominado *espinha de peixe*. Fonte: *Global Land Cover Facility* (2007).

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram obtidos a partir do processamento de imagens LANDSAT para os anos de 1997, 2001 e 2004. Sobre as imagens foram aplicadas técnicas lineares de mistura espectral e segmentação de imagens.

O modelo linear de mistura espectral visa estimar a proporção dos componentes solo, vegetação e sombra, para cada pixel, a partir da resposta espectral nas diversas bandas do TM, gerando as imagens-fração solo, vegetação e sombra. O modelo de mistura espectral é definido conforme a equação 1.

$$R = a*vege + b*solo + c*agua + e \quad (1)$$

onde R corresponde a resposta do pixel na banda da imagem TM/Landsat; a , b e c são proporções de vegetação, solo e água que compõem o pixel; $vege$, $solo$ e $agua$ correspondem as respostas espectrais de cada uma dessas componentes citadas; e é o erro de estimação intrínseco para cada banda. As bandas 3, 4 e 5 do satélite LANDSAT são utilizadas, formando um sistema de equações lineares resolvido a partir do método dos mínimos quadrados ponderados. Após a aplicabilidade do modelo de mistura, são resultantes três bandas sintéticas, representando as proporções de vegetação, de solo e de sombra existente em cada pixel da imagem.

Modelos de simulação

Cadeias de Markov

Mudanças de uso e cobertura da terra, simuladas a partir de Cadeias de Markov, baseiam-se em teorias de probabilidade. Esse processo é considerado estocástico e dado pela equação 2.

$$\prod(t+1) = P^n \prod_t \quad (2)$$

onde $\prod(t)$ corresponde ao estado do sistema no tempo t , $\prod(t+1)$ corresponde ao estado do sistema após o instante (t) e P^n são os estados passíveis de acontecer, que são representados em matrizes de possibilidades de transição. Essas matrizes de transição representam a possibilidade de um determinado estado i permanecer o mesmo ou mudar para o estado j durante o instante de tempo $t \geq (t+1)$.

As probabilidades de transição são usualmente derivadas de amostras relativas a certo instante de tempo. Cadeias de Markov assumem que o estado futuro do sistema depende apenas do seu estado presente e das possibilidades de transição, sendo independente da trajetória que o levou àquele estado. Este modelo não ignora o passado, mas assume que toda a informação do passado está concentrada no presente estado do sistema. Desta forma, as interações são instantâneas, sendo irrelevante o tempo de permanência das variáveis em cada estado (SOARES-FILHO, 1998).

Para a Cadeia de Markov, as probabilidades de transição não mudam com o tempo, o que o caracteriza como um processo estacionário. As principais vantagens das Cadeias de Markov são a simplicidade operacional e matemática do modelo aliadas à facilidade com que podem ser aplicadas a dados provenientes de sensoriamento remoto e implementadas em GIS. Outra grande vantagem é o fato de não necessitar de grande quantidade de dados antigos para prever o futuro.

As principais limitações das Cadeias de Markov incluem o fato do modelo não explicar o fenômeno (por que) e ser limitado na resposta espacial (onde e/ou quanto), entretanto o modelo pode fazer previsões (quando) desde que os processos sejam estacionários. Além

disto, o modelo não suporta de imediato a inclusão de variáveis exógenas como variáveis sócio-econômicas ou outras forças direcionadoras, embora esta limitação possa ser superada.

REDES NEURAS ARTIFICIAIS

O modelo de simulação de mudanças de uso e cobertura da terra baseado em redes neurais artificiais ou regressão logística, correspondendo a um módulo do aplicativo *Idrisi Andes Edition*, denominado *Land Change Modeler*. O LCM é composto por cinco funções: (1) análise de mudanças de uso e cobertura da terra, (2) simulação do potencial de transição, (3) previsão de mudanças, (4) avaliação das implicações das alterações sobre a biodiversidade, e, (5) elaboração de planos de manutenção da diversidade biológica.

O processo de transição de uso e cobertura da terra e as previsões de mudanças são realizadas por sub-modelos baseados em variáveis estáticas (que expressam condições em um determinado período de tempo e são consideradas constantes em todo processo de transição) e variáveis dinâmicas (que são dependentes das forças direcionadoras e variam conforme o processo de transição). Os sub-modelos são estabelecidos a partir de índices que correlacionam o processo de transição com forças direcionadoras.

O LCM utiliza redes neurais artificiais denominadas de *Multi Layer Perceptron (MLP backpropagation)* para realizar o processo de simulação. Uma rede neural artificial é composta por várias unidades de processamento, cujo funcionamento é bastante simples. Essas unidades, geralmente são conectadas por canais de comunicação que estão associados a determinado peso. As unidades fazem operações apenas sobre seus dados locais, que são entradas recebidas pelas suas conexões. O comportamento inteligente de uma rede neural artificial vem das iterações entre as unidades de processamento da rede: (1) sinais são apresentados à entrada; (2) cada sinal é multiplicado por um peso, que indica a sua influência na saída da unidade; (3) os sinais são somados, produzindo um nível de atividade; (4) se esse nível de atividade exceder um certo limite a unidade produz uma determinada resposta de saída.

Os modelos de redes neurais possuem regras de treinamento, onde os pesos de suas conexões são ajustados de acordo com os padrões apresentados, aprendendo através de exemplos. Arquiteturas neurais são tipicamente organizadas em camadas, com unidades que podem estar conectadas às unidades da camada posterior. Usualmente as camadas são classificadas em três grupos, compostos por (1) camada de entrada, onde os padrões são apresentados à rede; (2) camadas intermediárias, onde é realizado o processamento, através das conexões ponderadas; e, (3) camada de saída, onde o resultado final é concluído e apresentado.

O algoritmo *MLP backpropagation* opera em uma sequência de dois passos. Primeiro, um padrão é apresentado à camada de entrada da rede. A atividade resultante flui através da rede, camada por camada, até que a resposta seja produzida pela camada de saída. No segundo passo, a saída obtida é comparada à saída desejada para esse padrão particular. Se esta não estiver correta, o erro é calculado. O erro é propagado a partir da camada de saída até a camada de entrada, e os pesos das conexões das unidades das camadas internas vão sendo modificados conforme o erro é retropropagado.

Para este trabalho, o modelo de simulação baseado em redes neurais assume as transições com base nas probabilidades calculadas a partir das forças direcionadoras. Foram consideradas como forças direcionadoras: (1) probabilidade de evidência de transição de florestas para não-florestas, (2) distância das áreas desmatadas em 2001, (3) distâncias da rede de estradas, (4) distâncias da rede de drenagens, e, (5) relevo SRTM. A importância de cada força direcionadora é analisada segundo o Índice Cramer V, destinado a avaliar a existência de dependência ou associação espacial entre duas variáveis. Com isso, o algoritmo *MLP backpropagation* calcula a probabilidade de transição para cada possibilidade de transição de uso e cobertura da terra. Cada possibilidade de transição é considerada como um sub-modelo. Esses dados são combinados e uma matriz de transição é criada para quantificar e espacializar o processo de transição de uso e cobertura da terra.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aspectos gerais do desmatamento

A partir de dados de uso e cobertura da terra (Tabela 1), pode-se fazer algumas análises empíricas relacionadas às mudanças de uso e as forças direcionadoras que comandam o processo de desflorestamento. De uma área total de 23.539,97 km², para o período 1997-2001, houve um decréscimo de 1.075,14 km² nas áreas de florestas, o que representa um percentual de 4,57% do total da área de desflorestamento para o período. Para o período 2001-2004, houve um aumento de 257,23 km² nas áreas de florestas, o que representa um percentual de apenas 1,09%. Como existem apenas duas classes de uso e cobertura da terra (florestas e não-florestas), todo decréscimo que ocorre na transição de floresta para não-floresta, ocorre sob forma de acréscimo na transição de não-floresta para floresta.

TABELA 1

Dados de uso e cobertura da terra para os anos de 1997, 2001 e 2004, obtidos a partir do modelo linear de mistura espectral e do processo de segmentação de imagens.

	1997	2001	2004
Floresta	21129,24 km ²	20054,10 km ²	20311,33 km ²
Não-Floresta	2250,18 km ²	3327,25 km ²	3067,85 km ²
Hidrografia	160,55 km ²	158,62 km ²	160,80 km ²
Total	23539,97 km²	23539,97 km²	23539,97 km²

A partir da seqüência multi-temporal das imagens do satélite LANDSAT (Figura 2), buscou-se analisar as mudanças espaciais ocorridas na área de estudo, de modo a localizar as conversões de floresta/não-floresta para os períodos 1997-2001 e 2001-2004. A Tabela 2 apresenta os dados de transição de uso e cobertura da terra.

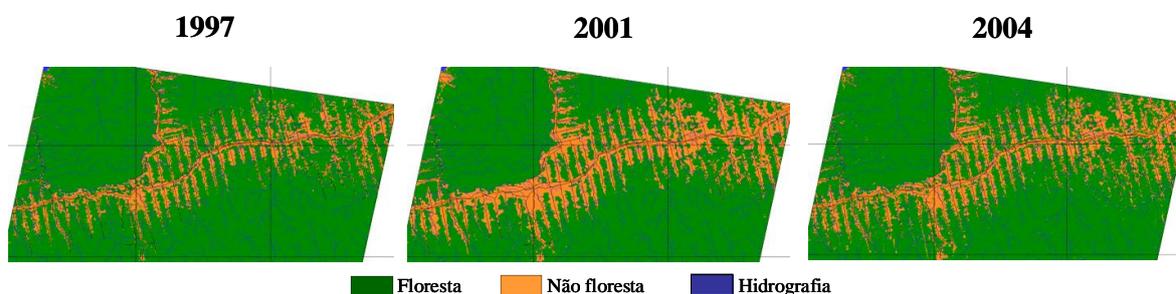


FIGURA 2. Dados de uso e cobertura da terra para imagens multi-temporais do satélite LANDSAT, órbita-ponto 227-63.

Para o período 1997-2001, ocorreu uma conversão de 4,93% (1.161,86 km²) do uso e cobertura da terra, representado principalmente pela conversão de florestas em não-florestas. Essa conversão ocorreu principalmente nas adjacências das áreas pioneiras ou já desmatadas, o que confirma que a acessibilidade é um dos principais fatores do desflorestamento, assim como observado por Alves, 2002. Do total da área de transição, foram desflorestados 1.109,96 km², o que representa 4,71% da área de estudo, enquanto apenas 32,78 km² foram convertidos em florestas, ou seja, apenas 0,14% da área de estudo.

Para o período de 2001-2004, ocorreu uma conversão de 4,04% (951,89 km²), de uso e cobertura da terra. De uma maneira generalizada, neste período, as áreas de florestas aumentaram e as áreas de não-florestas diminuíram, o que teoricamente implica em uma redução do processo de desflorestamento e aumento no processo de regeneração florestal. Todavia, houve uma variação espacial significativa no processo de conversão florestas/não-florestas, uma vez que surgiram novas manchas de desflorestamento.

Do total da área de transição, foram desflorestados 336,64 km², o equivalente a 1,43% da área de estudo, enquanto as áreas de conversão de não-florestas para florestas representam 596,24 km², ou seja, 2,53% da área de estudo.

Com isso, observa-se que houve uma diminuição das taxas de desflorestamento de 4,71% (período 2001-2004) para 1,43% (período 2001-2004), enquanto que as taxas de regeneração florestal aumentaram de 0,14% (período 1997-2001) para 2,53% (2001-2004).

TABELA 2

Dados de transição de uso e cobertura da terra para os períodos de 1997-2001 e 2001-2004.

	1997-2001	2001-2004
Floresta	20011,03 km ²	19707,13 km ²
Não-Floresta	2217,06 km ²	2730,75 km ²
Transição	1161,86 km ²	951,89 km ²
Hidrografia	150,02 km ²	150,20 km ²
Total	23539,97 km²	23539,97 km²

A partir de uma análise detalhada da transição e conversão de uso e cobertura da terra na área de estudo, observa-se que o processo de desmatamento 1997-2001-2004 não se comporta de maneira estacionária, pois, para o período 2001-2004 não houve desmatamento nas bordas das áreas desmatadas até 2001 nem próximo as estradas e vias de acesso terrestre (Figura 3). De acordo com Lambin e Geist (2001), o processo de desmatamento de florestas tropicais obedece a um modelo dinâmico, de interações locais, regionais e globais. O processo é dividido em: causas do desmatamento, e, forças de direcionamento do desmatamento. As principais causas correspondem a expansão da agricultura, exploração madeireira e expansão de infra-estrutura (urbana e de transportes). Os principais fatores correspondentes são de ordem econômica, política e institucional, tecnológica, cultural e demográfica.

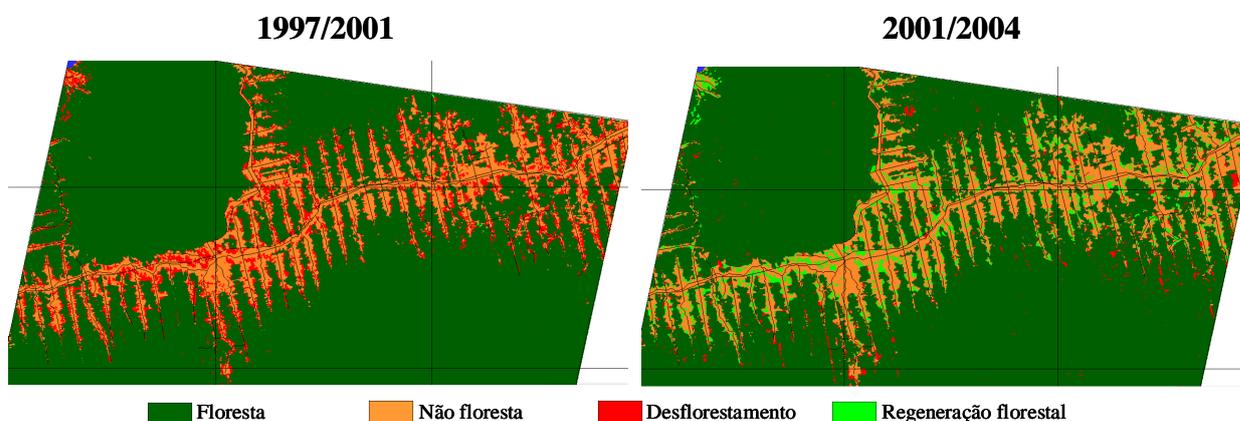


FIGURA 3. Transição de uso e cobertura da terra na área de estudo para os períodos de 1997-2001 e 2001-2004 (Regeneração florestal representa áreas de transição de não-florestas para florestas; Desflorestamento representa áreas de transição florestas para não-florestas).

SIMULAÇÃO DE MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DA TERRA

O modelo de simulação dinâmica baseado em Cadeias de Markov assume as transições como estacionárias, ou seja, transições nas quais as estatísticas não mudam com o passar do tempo. Dessa forma, os estados futuros são calculados conforme uma matriz de transição (Tabela 3). A partir dessa matriz, são geradas as simulações de uso e cobertura da terra para o ano de 2004.

TABELA 3

Matriz de probabilidade de transição de uso e cobertura da terra para o período 1997-2001, calculada anualmente, para simulação de uso e cobertura da terra para o ano de 2004.

	Para floresta	Para não-floresta	Para hidrografia
De floresta	0,9599	0,0398	0,0003
De não-floresta	0,0110	0,9889	0,0001
De hidrografia	0,0489	0,0007	0,9504

Assumindo que as probabilidades de transição de uso e cobertura da terra para o ano de 2004, dadas pela Tabela 3, pode-se entender as probabilidades condicionais como: (1) a probabilidade de floresta em 2001 continuar a ser floresta em 2004 corresponde a 95,99%, (2) a probabilidade de floresta em 2001 ser convertida em não-floresta em 2004 corresponde a 3,98%, (3) a probabilidade de não-floresta em 2001 continuar a ser não-floresta em 2004 corresponde a 98,89%, (4) a probabilidade de não-floresta em 2001 ser convertida em floresta em 2004 corresponde a 1,10%.

A partir da matriz de probabilidades, com base no estado do sistema em 2001, representado por percentuais de 85,19% para florestas, 14,14% para não-florestas e 0,67% para hidrografia, simulou-se o estado do sistema para o ano de 2004. Dessa forma, obteve-se 19.640,00 km² para áreas de florestas, o que representa 83,43% do total da área de estudo, 3.744,69 km² para áreas de não-florestas, o que representa 15,91% do total da área de estudo, além de 155,28 km² para áreas de hidrografia, o que representa 0,66% do total da área de estudo.

O incremento do desflorestamento foi de 417,44 km², ou seja, 1,77% do total da área de estudo e 12,55% do total desflorestado até o ano de 2001. A Figura 4 apresenta um detalhamento da espacialização aleatória das manchas de desflorestamento sobre a área de estudo, com base em Cadeias de Markov.

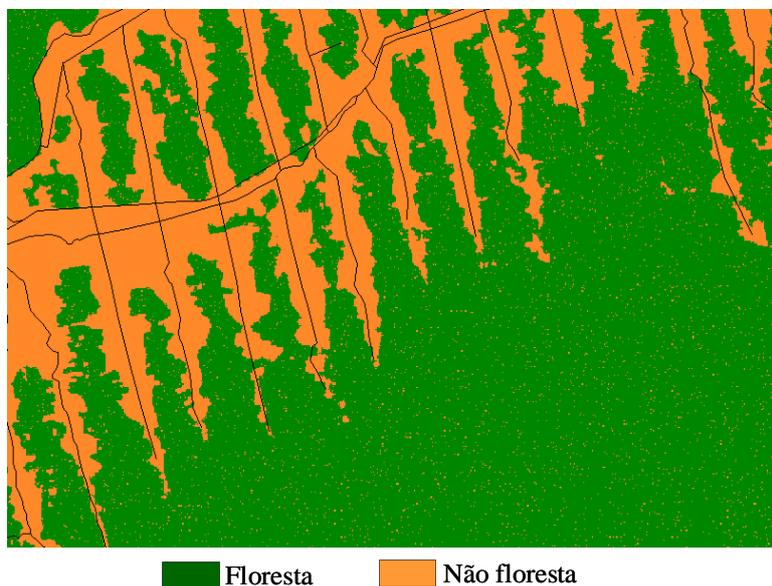


FIGURA 4. Detalhes da simulação de uso e cobertura da terra para o ano de 2004, com base em Cadeias de Markov.

Como o simulador baseado em Cadeias de Markov não suporta de imediato a inclusão de variáveis exógenas como as forças direcionadoras do desflorestamento, as transições de uso e cobertura da terra são espacializadas aleatoriamente sobre toda a área de estudo.

Dessa forma, os dados de transição de floresta para não-floresta tornam-se inconsistentes, uma vez que dificilmente ocorrerão manchas de desflorestamento isoladas dentro de áreas florestais. Segundo Alves (2002), o desmatamento ocorre principalmente próximas de áreas pioneiras. Contudo, pode-se considerar o valor quantificado da simulação, tendo como base um cenário futuro em que não ocorram alterações nas causas do desmatamento e nas suas forças direcionadoras. Assim, o processo de desmatamento ocorreria nas mesmas taxas brutas atuais. O processo de desmatamento verificado a partir de tabulação cruzada entre dados de uso e cobertura da terra para os anos de 1997, 2001 e 2004 não se manteve estacionário, os valores simulados por Cadeias de Markov apresentaram variações significativas.

Variações de áreas de não-florestas entre dados observados e simulados foram de 676,84 km², correspondendo a aproximadamente 22,06% do total da área de não-florestas para o ano de 2004. O modelo de simulação baseado em redes neurais assume as transições com base nas probabilidades calculadas a partir das forças direcionadoras.

Segundo o Índice Cramer V a principal variável que comanda o processo de desmatamento é representada por áreas já desmatadas, enquanto as evidências de máxima verossimilhança (probabilidade calculada a partir das transições de florestas para não-florestas ocorridas entre 1997 e 2001) e distâncias de rede de estradas contribuem significativamente no processo de desmatamento, enquanto que o relevo e a distância da rede de drenagens são variáveis pouco significativas (Tabela 4).

TABELA 4

Índice Cramer V para análise das forças direcionadoras do desmatamento, com base no processo de transição de florestas para não-florestas.

	Índice Cramer V
Distância de áreas desmatadas até 1997	0,8982
Evidências de máxima verossimilhança	0,7692
Distâncias de estradas	0,7057
Relevo SRTM	0,3277
Distâncias de drenagens	0,0885

A partir das forças direcionadoras, o modelo de simulação *LMC* estimou em 19.294,29 km² (81,96%) as áreas de florestas, 4.088,59 km² (17,37%) para áreas de não-florestas, além de 157,09 km² (0,67%) para áreas de hidrografia. O incremento do desflorestamento foi de 3,23% (761,34 km²) do total da área de estudo e aproximadamente 23% do total desflorestado até o ano de 2001. Variações de áreas de não-florestas entre dados observados e simulados foram de 33,27% (1020,74 km²) do total da área de não-florestas para o ano de 2004.

A partir das forças direcionadoras, o algoritmo *MLP backpropagation* calcula a probabilidade de transição para cada possibilidade de transição de uso e cobertura da terra. Cada possibilidade de transição é considerada como um sub-modelo. Esses dados são combinados e uma matriz de transição é criada para quantificar e espacializar o processo de transição de uso e cobertura da terra.

A partir do modelo de simulação *LCM* (Multi Layer Perceptron), obteve-se 19.294,29 km² para áreas de florestas, o que representa 81,96% do total da área de estudo, 4.088,59 km² para áreas de não-florestas, o que representa 17,37% do total da área de estudo, além de 157,09 km² para áreas de hidrografia, o que representa 0,67% do total da área de estudo. O incremento do desflorestamento foi de 761,34 km², ou seja, 3,23% do total da área de estudo e aproximadamente 23% do total desflorestado até o ano de 2001.

Variações de áreas não-florestas entre dados observados e simulados foram de 1020,74 km², correspondendo a aproximadamente 33,27% do total da área de não-florestas para o ano de 2004 (Figura 5).

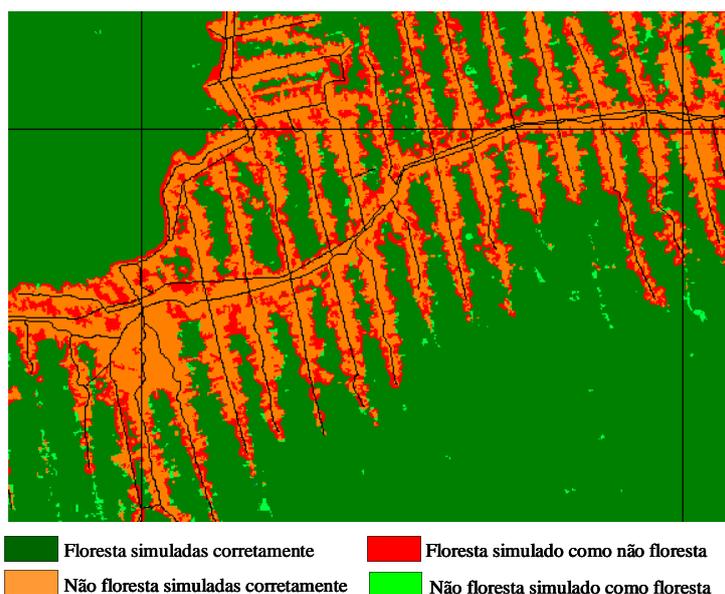


FIGURA 5. Detalhes da simulação de uso e cobertura da terra para o ano de 2004, a partir de redes neurais artificiais MLP (Multi Layer Perceptron).

A simulação por redes neurais pode ser entendida conforme a Tabela 5, quando comparada com dados observados para o mesmo período. Dessa forma, 286,46 km² de não-florestas foram simulados como florestas, em função do aparecimento de novas manchas de desmatamento próximas a estradas abertas depois de 2001. Da mesma forma, 1.310,72 km² de não-florestas foram simuladas como florestas, uma vez que todo incremento do desmatamento foi espacializado próximo as áreas já desmatadas em 2001. Tem-se um valor extremamente elevado por dois motivos, que caracterizam a não-estacionariedade do processo: (1) houve regeneração de 596,24 km² de florestas dentro de áreas já desmatadas, e, (2) não se observou incremento do desmatamento nas bordas das áreas já desmatadas.

TABELA 5

Comparação de uso e cobertura da terra entre dados observados (linhas) e simulados (colunas) por redes neurais artificiais.

	Florestas	Não-Florestas	Hidrografia
Florestas	19000,15 km ²	1310,72 km ²	0,48 km ²
Não-Florestas	283,46 km ²	2777,69 km ²	6,68 km ²
Hidrografia	10,68 km ²	0,18 km ²	149,93 km ²
Total	19294,29 km²	4088,59 km²	157,09 km²

O algoritmo *MLP backpropagation* simulou o processo de transição de maneira eficiente, uma vez que as áreas de incremento de não-florestas localizaram-se nas bordas das áreas já desmatadas, obedecendo ao padrão verificado durante o período 1997-2001. Como o processo de transição não mostrou-se estacionário, as manchas de desflorestamento ocorreram principalmente próximas a rede de estradas abertas depois de 2001, considera-se o modelo ineficiente. Essas manchas de desmatamento localizadas próximas as estradas não foram simuladas, uma vez que a rede de estradas foi considerada constante durante o processo de simulação.

Comparando as simulações feitas por Cadeias de Markov e redes neurais e os dados observados, constatou-se que o primeiro modelo estimou valores mais próximos aos reais (Tabela 6). A simulação por Cadeias de Markov obteve variações de 676 km² para áreas de não-florestas entre dados observados e simulados, correspondendo a 12,5% do total da área desmatada até o ano de 2001.

A simulação por redes neurais obteve variações de 1.020 km² para áreas de não-florestas, o que corresponde a 23% do total da área desmatada até o ano de 2001. Verificou-se que os modelos de simulação não mostraram-se eficientes uma vez que o processo de desmatamento não ocorreu de forma estacionária.

TABELA 6

Dados de uso e cobertura da terra simulados para o ano de 2004 a partir de Cadeias de Markov e redes neurais artificiais comparados com dados de verdades de campo para o mesmo ano, obtidos a partir do processamento digital de imagens.

	Observado	Cadeias de Markov	Redes Neurais
Floresta	20311,33 km ² 86,28%	19640,00 km ² 83,43%	19294,29 km ² 81,96%
Não-Floresta	3067,85 km ² 13,04%	3744,69 km ² 15,91%	4088,59 km ² 17,37%
Hidrografia	160,80 km ² 0,68%	155,28 km ² 0,66%	157,09 km ² 0,67%
Total	23539,97 km² 100%	23539,97 km² 100%	23539,97 km² 100%

CONCLUSÕES

Dados de uso e cobertura da terra indicam que na área estudada as taxas absolutas de desflorestamento diminuíram de 4,71% (período 1997-2001) para 1,43% (período 2001-2004), enquanto as taxas de regeneração florestal aumentaram de 0,14% (período 1997-2001) para 2,53% (2001-2004). A simulação por Cadeias de Markov obteve variações 12,5% para áreas de não-florestas entre dados observados e simulados, valor bem inferior aos 23% simulado por redes neurais. Devido ao processo de desmatamento ter ocorrido de forma não estacionária, os modelos de simulação foram considerados ineficientes para prever a dinâmica espacial de desmatamento na floresta Amazônia.

REFERÊNCIA

ACHARD, F.; EVA, H.D.; STIBIG, H.J.; MAYAUX, P. GALLEGO, J.; RICHARDS, T.; MALINGREAU, J.P. Determination of Deforestation Rates of the World's Humid Tropical Forests. **Science**, v. 297, n. 5583, p. 999-1002, 2002.

ALVES, D.S. Space-time dynamics of deforestation in Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 14, p. 2903-2908, 2002.

FLAMENCO-SANOUAL, A.; MARTINEZ RAMOS, M.; MASERA, O.R. Assessing implications of land-use and land-cover change dynamics for conservation of a highly diverse tropical rain forest. **Biological Conservation**, v. 138, n. 1, p. 131-145, 2007.

GARCIA, R.A.; SOARES-FILHO, B.S.; SAWYER, D.O. Socioeconomic dimensions, migration, and deforestation: An integrated model of territorial organization for the Brazilian Amazon. **Ecological Indicators**, v. 7, p. 719-730, 2007.

LAMB, D.; ERSKINE, P.D.; PARROTTA, J.A. Restoration of Degraded Tropical Forest Landscapes. **Science**, v. 310, n. 5754, p. 1628 - 1632, 2005.

LAMBIN, E.F.; GEIST, H.J. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. **Bioscience**, v. 52, n. 2, p. 143-150, 2002.

LAMBIN, E.F.; GEIST, H.J.; LEPPERS, E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annual Reviews of Environmental Resources**, v. 28, p. 205-241, 2003.

LAURANCE, W. F.; ALBERNAZ, A. K. M.; FEARNSTIDE, P. M.; VASCONCELOS, H. L.; FERREIRA, L.V. Deforestation in Amazonia. **Science**, v.304, n.5674, p.1109 – 1111, 2004.
METZGER, J.P.; OLIVEIRA FILHO, F.J.B. Thresholds in landscape structure for three common deforestation patterns in the Brazilian Amazon. **Landscape Ecology**, v. 21, p. 1061–1073, 2006.

NEPSTAD, D.; MCGRATH, D.; ALENCAR, A.; BARROS, A.C.; CARVALHO, G.; SANTILLI, M.; VERA DIAZ, M. C. Frontier Governance in Amazonia. **Science**, n. 295, p. 629-631, 2002.

SOARES FILHO, B.S. **Modelagem dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

SOARES-FILHO, B.S.; NEPSTAD, D.C.; CURRAN, L.M.; CERQUEIRA, G.C.; GARCIA, R.A.; RAMOS, C.A.; VOLL, A.; MCDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modelling conservation in the Amazon basin. **Nature**, v. 440, p. 520-523, 2006.

WALSH, S.J.; MESSINA, J.P.; MENA, C.F.; MALANSON, G.P.; PAGE, P.H. Complexity theory, spatial simulation models, and land use dynamics in the Northern Ecuadorian Amazon. **Geoforum**, v. 39, n. 2, p. 867-878, 2008.