Simulação do Crescimento das Áreas Antropizadas Utilizando Cadeia de Markov e Autômata Celular em Ambiente SIG

Gabriel Henrique de Almeida Pereira

Engenheiro Ambiental – UFPR – Brasil - alogabriel@hotmail.com

Profª. Drª. Sony Cortese Caneparo

Prof. Associada - Departamento de Geografia - UFPR – Brasil - sony@ufpr.br

Resumo

Para verificação do crescimento das áreas antropizadas na Bacia do Rio Verde (Paraná – Brasil) foram feitas algumas análises e simulações, utilizando procedimentos de análise espacial denominados de Cadeia de Markov e Autômata Celular, disponíveis em Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Estas análises e simulações foram realizadas utilizando dois mapas de Cobertura Vegetal e Uso do Solo da bacia, para os anos de 1976 e 2000, fazendo uma previsão para o ano de 2009. Os resultados obtidos foram comparados com o mapa de Cobertura Vegetal e Uso do Solo já existente para o ano de 2009, e apresentaram-se bem coerentes, mostrando grande semelhança com os mapas de 2000 e 2009. Apesar de algumas variações, conclui-se que os resultados obtidos para a Simulação do Crescimento das Áreas Antropizadas da Bacia do Rio Verde, utilizando Cadeia de Markov e Autômata Celular em ambiente SIG, foram satisfatórios.

Palavras chave: Bacia do Rio Verde, Cobertura Vegetal e Uso do Solo, Cadeia de Markov, Autômata Celular, Sistemas de Informações Geográficas.

Abstract

To check the growth of disturbed areas in the Basin of Rio Verde (Paraná - Brazil) were done some analysis and simulations, using spatial analysis procedures called Markov Chain and Cellular Automata, available in Geographic Information Systems (GIS). These tests and simulations were performed using two maps Vegetation Cover and Land Use basin for the years 1976 and 2000, making a prediction for the year 2009. The results were compared with the map of Vegetation

Cover and Land Use existing for the year 2009, and presented themselves well consistent, showing great similarity with the maps of 2000 and 2009. Despite some variations, it is concluded that the results for the Simulation of Growth of the disturbed areas of the Rio Verde Basin, using Markov Chain and Cellular Automata in a GIS environment, were satisfactory.

Key words: Basin of Rio Verde, Markov Chain, Cellular Automata, Geographic Information System.

Introdução

O Brasil possui, atualmente, uma população estimada superior a 190 milhões de habitantes, com uma taxa de crescimento populacional anual de 1,17%. Em 1940, apenas 31,24% da população encontrava-se em áreas urbanas, hoje são 84,35%. (IBGE, 2010).

Nas últimas décadas, os municípios que integram a Região Metropolitana de Curitiba (RMC), no Estado Paraná, Brasil, têm assistido a grande elevação no seu número de habitantes e um acentuado processo de urbanização. De modo geral, observa-se que as áreas municipais limítrofes à capital crescem num ritmo mais acentuado do que aqueles que estão espacialmente mais distantes.

O crescimento populacional acelerado e os avanços da antropização, seja com o desenvolvimento urbano ou rural, podem causar impactos severos ao meio ambiente, por vezes, comprometendo seriamente as condições naturais de uma determinada região. As modificações no meio provocadas pelo homem, muitas vezes, afetam a permeabilidade do solo, trazem riscos de erosão e produção de sedimentos, assoreamento, produção excessiva de nutrientes e matéria orgânica, poluição hídrica, riscos de alagamentos, degradação dos solos, desertificação, ilhas de calor, poluição atmosférica, entre outros.

As técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aliadas com Sistema de Informação Geográfica (SIG) vêm sendo aplicados em mapeamento do uso e cobertura do solo (LOPES, 2008).

Os SIG são ferramentas capazes de adquirir, armazenar, tratar, integrar, processar, recuperar, transformar, manipular, modelar, atualizar, analisar e exibir

informações digitais georeferenciadas, topologicamente estruturadas representando o relacionamento entre as entidades, associadas ou não a um banco de dados alfanuméricos (ROCHA, 2000).

Esses sistemas permitem a manipulação dos dados de diversas fontes como mapas, imagens e cadastros, permitindo recuperar e combinar informações para efetuar os mais diversos tipos de análises sobre os dados (ALVES, 1990).

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) podem ser definidos, então, como sistemas destinados ao tratamento automatizado de dados referenciados espacialmente.

Nos SIG, as sucessivas análises dos dados espaciais podem dividir grandes áreas heterogêneas em pequenas unidades homogêneas, sobre as quais os modelos são aplicados (TIM, 1994).

A principal vantagem da aplicação de modelos reside na possibilidade do estudo de vários cenários diferentes e de forma rápida, muitos deles ainda não explorados em experimentos reais. Outra importante vantagem da utilização de simulação de cenários está associada ao seu baixo custo. A maior limitação ao uso de modelos encontra-se na dificuldade em trabalhar com grande quantidade de dados que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais. Por essas razões, Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são empregados na criação do banco de dados desses modelos. (MACHADO et al., 2003).

O que se destaca na utilização de Sistemas de Informação Geográfica em modelagem é a maior facilidade para montar, testar e ajustar os modelos, operando no processo de calibração, quando as inter-relações e a importância dos diversos componentes são ponderados, de modo a reproduzir, da melhor maneira possível, a realidade.

Dentro deste contexto de Sistemas de Informação Geográficas, foram feitas algumas análises e simulações, utilizando procedimentos de análise espacial denominados de Cadeia de Markov e Autômata Celular.

Segundo o Manual do IDRISI TAIGA (2009), um processo markoviano é aquele em que o estado de um sistema no tempo n+1 pode ser previsto pelo estado do sistema no tempo n, dada uma matriz de probabilidades de transição de cada classe de Cobertura Vegetal e Uso do Solo. Um processo Markoviano é

simplesmente um estado em que o futuro de um sistema pode ser modelado apenas pelo estado imediatamente anterior.

Já os Autômatos Celulares (AC) podem ser descritos como uma malha composta por células, cujos estados dependem do estado das células vizinhas. Constituem uma grade regular uniforme, com variável discreta em cada célula, e em um tempo também discreto, sendo o valor da variável de cada célula afetado pelo valor nas células vizinhas (WOLFRAN, 1983).

Desta forma, os autômatos celulares podem ser entendidos como um sistema espacial dinâmico e relativamente simples, no qual o estado de cada célula depende do estado prévio das células que se encontram dentro de uma determinada vizinhança, de acordo com um conjunto de regras de transição (ROCHA, 2004).

Segundo ALMEIDA et al. (2007), é sensato afirmar que esse tipo de modelo constitui, ainda, uma das melhores técnicas atualmente disponíveis para responder a necessidade e interesses das investigações acerca de dinâmicas de Cobertura Vegetal e Uso do Solo urbano e regional.

A utilização conjunta da Cadeia de Markov e Autômata Celular se dá utilizando o resultado da Cadeia de Markov, a matriz de transição, como regra para a mudança de estados das células do Autômata Celular. Assim, o modelo CA_MARKOV combina tanto o conceito de alteração das células da Autômata Celular com a probabilidade de alteração da cadeia de Markov. (IDRISI, 2009)

O resultado deste processo, utilizando Cadeia de Markov e Autômata Celular, é que as mudanças na cobertura do solo irão acontecer segundo: as características da mudança no tempo anterior; a probabilidade desta mudança na Cobertura Vegetal e Uso do Solo, e a semelhança com as áreas mais próximas, dependência espacial e a Cobertura Vegetal e Uso do Solo na vizinhança.

A área estudada foi a Bacia do Rio Verde. Esta área constitui importante aspecto na estratégia da RMC na conservação dos recursos naturais, sobretudo hídricos. A bacia do Rio Verde está inserida entre as latitudes de 25° 18’S e 25°40’S e longitudes de 49°21’W e 49°49’W de Greenw ich.

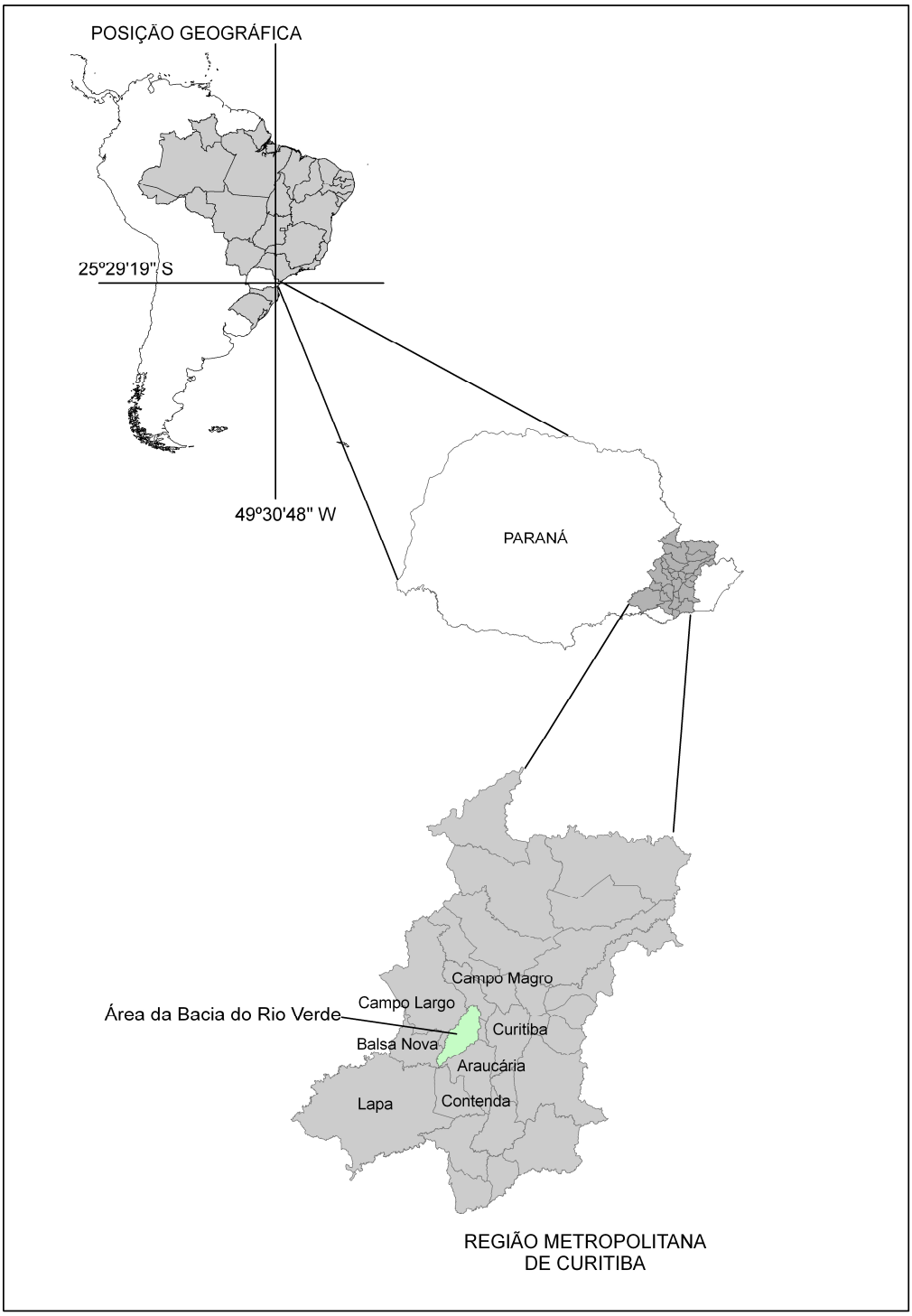


Figura 1 – Cartograma de Localização da Bacia do Rio Verde – Paraná – Brasil

Nesta área, estão inseridas porções dos municípios de Araucária, Campo Largo, Campo Magro e Balsa Nova, todos pertencentes à Região Metropolitana de Curitiba (RMC), no estado do Paraná, Brasil.

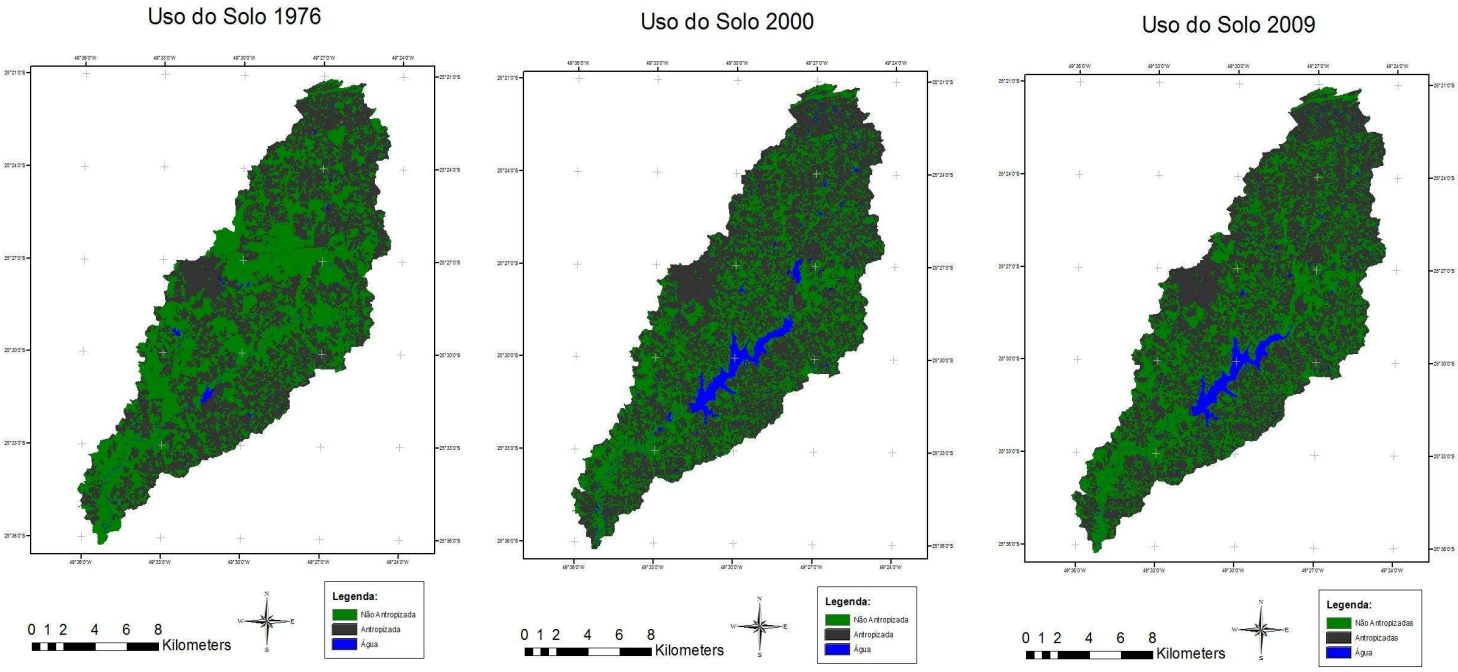
Há, nesta bacia, um reservatório que leva o mesmo nome, Reservatório do Rio Verde, cujo volume do mesmo é de aproximadamente 36.000.000 m^3 e, atualmente, somente a REPAR-PETROBRÁS e a SANEPAR possuem outorga para captação de água do mesmo.

Ainda na presente área a ser estudada há uma Área de Proteção Ambiental (APA), denominada APA do Rio Verde, com área de aproximadamente 147,56 Km^2, criada no ano de 2000.

Metodologia

As análises foram efetuadas com o Software IDRISI TAIGA, com os módulos MARKOV e CA_MARKOV. O sistema de coordenadas utilizado foi "Universal Transversa de Mercator" (UTM), Datum SAD 1969, Zona 22 S.

As análises aqui apresentadas foram feitas utilizando uma simplificação dos mapas de Cobertura Vegetal e Uso do Solo dos anos de 1976, 2000 e 2009. Sintetizou-se os mapas para apenas três discretizações do uso do solo: áreas verdes, áreas antropizadas e água. Incluem-se nas áreas verdes as áreas de vegetação nativa, de sucessão da floresta e de reflorestamento; nas áreas antropizadas incluem-se as áreas urbanizadas, industriais e agrícolas; e nas áreas de água estão agrupados os rios, corpos d'água, o reservatório e quaisquer porções de água.



Base Cartográfica: COMEC, 1976. Base cartográfica: SUDHERSA, 2000. Base Cartográfica: RODERJAN, 2009

Figura 1 – Comparativo dos três mapas utilizados com 3 categorias de Cobertura Vegetal e Uso do Solo, anos de 1976, 2000 e 2009.

A tabela a seguir traz as áreas relativas a cada mapa apresentado acima, em hectares e em porcentagem, em relação à área total da bacia, para cada uso do solo em cada ano.

	1976		2000		2009	
	Área		Área		Área	
Categoria	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Não Antropizadas	12388.69	51.87	9439.31	39.50	9940.92	41.81
Antropizadas	11328.29	47.43	13497.91	56.49	13077.30	55.01
Água	169.27	0.71	957.14	4.01	756.07	3.18
Total	23886.25	100.00	23894.35	100.00	23774.29	100.00

Tabela 1 - Áreas em hectares e em porcentagem em relação a toda bacia para cada uso do solo em cada ano.

É possivel verificar um acréscimo nas áreas de água entre os anos de 1976 e 2000, isto porque neste período houve a formação do Reservatório do Rio Verde. Também é possível verificar o aumento das áreas antropizadas para este mesmo período. Já para o ano de 2009 houve uma pequena redução das áreas antropizadas e de água, e um crescimento das áreas não antropizadas, provavelmente devido a criação da Área de Proteção Ambiental do Rio Verde.

Resultados

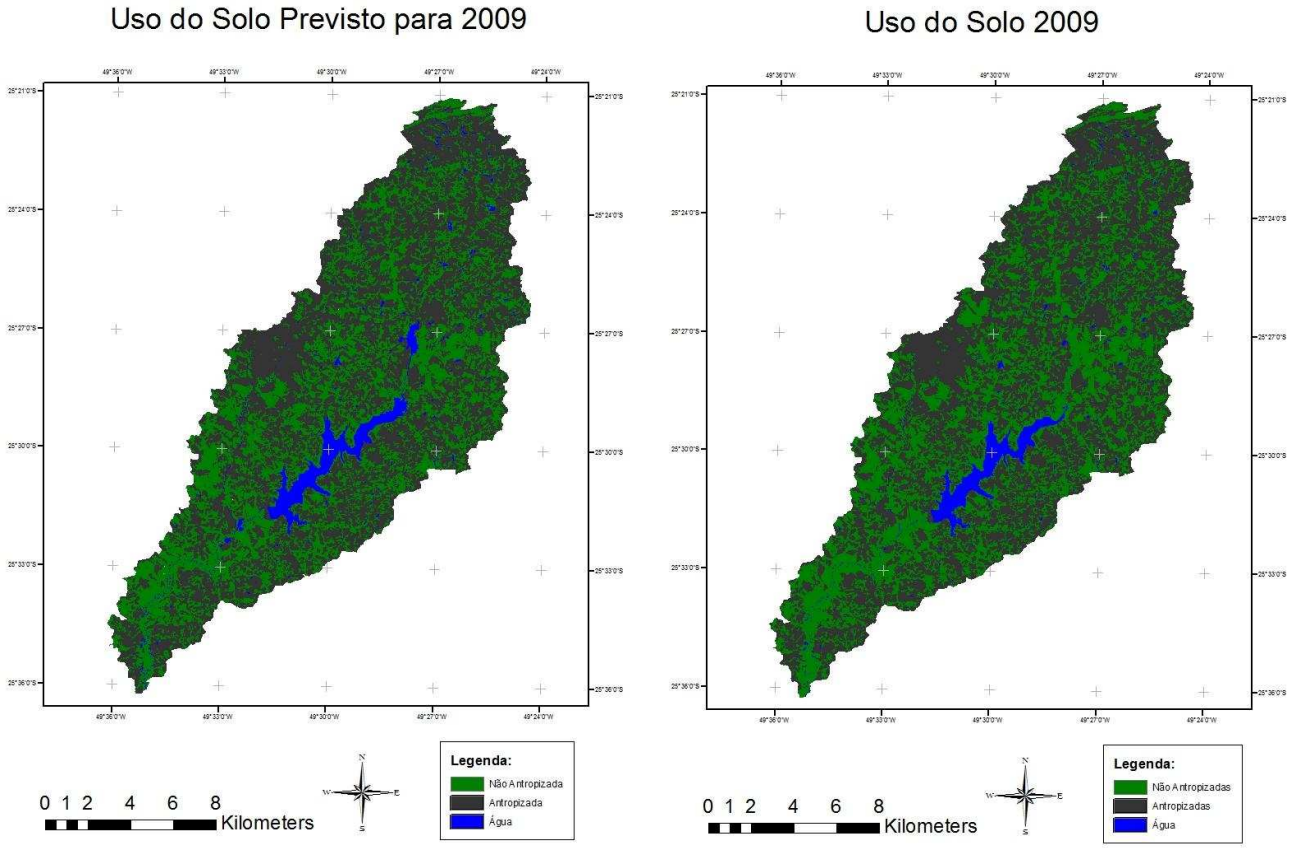
Abaixo é apresentada a matriz de probabilidade de transição, resultado da cadeia de Markov, utilizando-se os mapas de Cobertura Vegetal e Uso do Solo dos anos de 1976 e 2000, com apenas 3 categorias de Cobertura Vegetal e Uso do Solo.

	Não Antropizadas	Antropizadas	Água
Não Antropizadas	0,7151	0,2505	0,0344
Antropizadas	0,1395	0,8546	0,0060
Água	0,1369	0,0624	0,8007

Tabela 2 - Matriz de probabilidade de transição para 3 categorias de legenda.

O que esta matriz de probabilidade representa é a probabilidade de uma determinada área se tornar outra. Exemplificando, para áreas não antropizadas, a probabilidade de continuarem sendo áreas não antropizadas é de 71,51%. Já a probabilidade destas áreas se tornarem antropizadas é de 25,05%, e de se tornarem áreas cobertas com água é de 3,44%.

A partir dessa matriz de probabilidade de transição e usando o mapa de Cobertura Vegetal e Uso do Solo de 2000 como base, fez-se a previsão para o ano de 2009, utilizando Cadeia de Markov e Autômata Celular. O resultado obtido é apresentado a seguir, juntamente com o mapa já existente de 2009.



Base Cartográfica: RODERJAN, 2009

Figura 2 – Comparativo entre o Resultado da Previsão para o ano de 2009 e mapa do Uso do Solo de 2009, para 3 categorias de legenda.

A tabela abaixo apresenta os valores obtidos para as áreas, em hectares e porcentagens em relação à área total da bacia, na previsão para o uso do solo no ano de 2009 e os valores obtidos a partir do mapa já existente do uso do solo de 2009.

	Previsão 2009		2009	
	Área		Área	
Categoria	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Não Antropizadas	9380.974	39.26	9940.92	41.81
Antropizadas	13554.86	56.73	13077.30	55.01
Água	958.1147	4.01	756.07	3.18
Total	23893.95	100.00	23774.29	100.00

Tabela 3 - Comparação da Simulação do Crescimento das Áreas Antropizadas da Bacia do Rio Verde – Paraná – Brasil, para o ano de 2009, utilizando Cadeia de Markov e Autômata Celular e o Mapa da Cobertura Vegetal e Uso do Solo de 2000, para 3 categorias de legenda.

Percebe-se certa semelhança entre os resultados obtidos nas simulações e o mapa já existente. Os valores absolutos de cada área em hectares e as porcentagens em relação a bacia inteira mostraram-se próximos. Mas não iguais. Acredita-se que esta variação entre os resultados, e até mesmo das áreas totais da bacia, se deêm devido à diferenças nas digitalizações, dados utilizados na confecção dos mapas, etc..

Para uma análise mais detalhada dos resultados gerados, utilizou-se da ferramenta CROSSTAB (tabulação cruzada) para verificar as alterações entre os anos de 2000 e o resultado da previsão para o ano de 2009. Com este resultado do CROSSTAB fez-se o cálculo da área, em hectares, e as porcentagens em relação a área total da bacia. Estes resultados são apresentados na tabela 4.

	2000 x Previsão 2009		Previsão 2009 x 2009	
	Área		Área	
CATEGORIA	(ha)	(%)	(ha)	(%)
PERMANECEU NÃO ANTROPIZADA	9323.22	39.02	8182.92	34.42
ANTROPIZADAxNÃO ANTROPIZADA	56.29	0.24	1591.72	6.70
ÁGUAxNÃO ANTROPIZADA	1.47	0.01	166.28	0.70
NÃO ANTROPIZADAxANTROPIZADA	114.00	0.48	1175.52	4.94
PERMANECEU ANTROPIZADA	13437.12	56.24	11862.59	49.90
ÁGUAxANTROPIZADA	3.74	0.02	39.19	0.16
NÃO ANTROPIZADAxÁGUA	2.09	0.01	0.98	0.00
ANTROPIZADAxÁGUA	4.50	0.02	2.67	0.01
PERMANECEU ÁGUA	951.52	3.98	752.42	3.16
TOTAL	23893.95	100.00	23774.29	100.00

Tabela 4 - Alterações no uso do solo nos anos de 2000 e previsão para 2009; e previsão de 2009 e o mapa já existente de 2009, para 3 legendas.

Uma das primeiras análises que pode ser feita, através da tabela acima apresentada, é a alteração ocorrida em cada uso do solo no ano de 2000 com a simulação do ano de 2009. Como exemplo, pode-se citar que, apenas 0,48% da área total da bacia sofreu alteração de área não antropizada, em 2000, para antropizada, na simulação para 2009; e que 56,24% era em 2000, e continua sendo, na simulação para 2009, antropizada.

Para verificar a validade dos resultados obtidos, comparou-se também a previsão obtida para 2009 com o mapa já existente de 2009, também apresentada

na tabela acima. Nesta comparação, era esperado que as porcentagens das áreas que permanecem com a mesma Cobertura Vegetal e Uso do Solo fossem predominantes. Isto porque, quanto mais próximos fossem os valores entre os usos do solo, menor seria a variação entre a previsão e o mapa já existente de 2009.

Realmente, ao se verificar a tabela, percebe-se que os maiores valores obtidos são das áreas antropizadas que permaneceram antropizadas, das não antropizadas que permaneceram não antropizadas e áreas com água que continuam sendo áreas com água.

Porém, em uma porção correspondente a 6,70% da área total da bacia, o modelo previu que seriam de áreas antropizadas, mas, na verdade, são áreas não antropizadas no mapa de 2009.

Apesar desta diferença entre os mapas, entende-se que os valores obtidos na previsão estão próximos aos esperados, uma vez que as alterações estão similares às ocorridas realmente. As mudanças deram-se nas áreas onde realmente houve certa alteração no ano de 2009, mas sem perder a ligação com o mapa base da Cobertura Vegetal e Uso do Solo em 2000.

Conclusão

Os modelos apresentam-se muito dinâmicos, aceitando diferentes tipologias de legendas, seja com 3, como apresentado neste trabalho, ou com 7 categorias de legendas, como feito na continuação do mesmo. Sendo possível, então, fazer análises mais simples ou mais complexas. Os modelos denotam também uma certa tolerância às diferenças entre bases cartográficas, como nas diferenças na área total da bacia.

Sugere-se que, quando possível, a utilização de bases cartográficas mais semelhantes, a fim de alcançar maior confiabilidade nos dados usados e, consequentemente, nos resultados obtidos. Recomenda-se então, a utilização de bases cartográficas mais coerentes entre si, sejam em características como áreas e delimitações, ou de séries temporais mais próximas, para evitar desvios nos resultados.

Entretanto, os resultados obtidos nas simulações descritas, utilizando Cadeia de Markov e Autômata Celular, mostraram-se muito coerentes. Nas simulações, as áreas onde houve avanço de determinado uso do solo sobre outro, são muito similares aos ocorridos na realidade, se comparados com os mapas de 2000 e 2009.

Ao fim deste estudo, pode-se constatar que, as análises feitas com o auxílio destes modelos, consistem em uma importante ferramenta na previsão e entendimento das tendências de alterações do uso do solo e ocupação humana.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, C. M.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; BATTY, M., **Geoinformação em Urbanismo: Cidade Real x Cidade Virtual.** Oficina de Textos, São Paulo, 2007.

ALVES, D. S., **Sistema de Informação Geográfica.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO,1., São Paulo, 1990. Anais. São Paulo: USP, Escola Politécnica, 1990. p.66-78.

IBGE, **Censo** 2010.

LOPES, L. H. M**. Uso e Cobertura do Solo no Município de Tailândia – PA Utilizando o TM/LANDSAT e Técnica de Classificação Não-Supervisionada.** ENGEVISTA, v. 10, n. 2, p. 126-132, 2008.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C., **Simulação de Cenários Alternativos de Cobertura Vegetal e Uso do Solo em uma Microbacia Utilizando Técnicas de Modelagem e Geoprocessamento.** Revista Brasileira Cientifica Solo, 27, p.727-733, 2003.

MANUAL IDRISI - EASTMAN, J. R., **IDRISI TAIGA: Guide to GIS and Image Processing.** Clark University. USA. 2009

ROCHA, C. H. B., **Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar**. Juiz de Fora, 2000.

ROCHA, J.; TENEDÓRIO, J. A.; **GEOCOMPUTAÇÃO E ANÁLISE ESPACIAL: A utilização de Autómatos celulares com base em Redes Neuronais na previsão de alterações nos padrões de Cobertura Vegetal e Uso do Solo num contexto periurbano.** VIII Encontro de Utilizadores de Informação Geográfica . USIG. Oeiras, Portugal, 2004.

RODERJAN, C. V., Projeto **Interdisciplinar de Pesquisa sobre Eutrofização no Reservatório Rio Verde, Petrobrás.** Departamento de Ciências Florestais da UFPR. 2009.

TIM, U. S.; JOLLY, R., **Evaluation Agricultural Nonpoint-Source Pollution Using Integrate Geographic Information Systems and Hydrology /Water Quality Model.** Journal I Environmental Quality, v-23, p.25-35, 1994.

WOLFRAN, S., **The statistical mechanics of cellular automata**. Review of Modern Physics, 55:601-643. 1983.