

Modelagem espacial de uso e ocupação do solo estabelecida mediante análise da vulnerabilidade ambiental

Mariana dos Santos Diniz ¹
Wagner Santos de Almeida ¹
Juan Pablo Catamusca Salazar ¹

¹ Universidade de Brasília- UnB/ENC
CEPP 70910-900- Brasília-DF, Brasil
marianadiniz12@gmail.com
wagnersa@unb.br
juan.catamusca.s@uniautonomia.edu.co

Abstract. The goal of this research is to analyze the environmental vulnerability of the Municipality of Formosa (GO), between the years of 1999 and 2014, and, for the most susceptibility area, generate a prospective land use map using geoprocessing and Cellular Automata (CA). For this purpose, digital maps of pedology, roads and drainage networks, and terrain declivity map (obtained from the digital elevation model SRTM/NASA) were used, in addition to images captured by the Landsat 5 and 8 satellites. The methodology applied consisted of three steps: a) first, land use maps of the years 1999 and 2014 were created using geoprocessing algorithms available in the Spring and ArcGIS/Erdas software; b) second, environmental vulnerability maps were generated using both Analytic Hierarchy Process and fuzzy logic; and finally, c) third, a land use map for the year 2019 was generated for the most anthropized and vulnerable area using the software Dinamica EGO/UFGM, which employs CA. The maps showed a considerable urban growth towards the northwest and southeast directions, which is of great concern because of the proximity to the main bodywater of the Municipality, the Lagoa Feia. These results subsidize public policies for basic sanitation management, urban and rural planning, sanitation, and mitigation measures to reduce environmental impacts of uncontrolled anthropic growth.

Palavras-chave: celular automata, fuzzy logic, geoprocessing, land use, autômato celular, lógica fuzzy, geoprocessamento, uso do solo.

1. Introdução

No Brasil com a mudança da Capital Federal no início da década de 60, o fenômeno da migração de pessoas das diversas regiões do País para o Centro-Oeste potencializou-se. A busca por uma melhor qualidade de vida e por oportunidades de emprego gerou impactos diversos na economia e no uso do solo da região. Com o passar dos anos, a população imigrante com menor poder aquisitivo dirigiu-se para as cidades satélites e o Entorno do DF.

Formosa (GO) é um desses municípios do Entorno do DF que tem enfrentado esse crescimento acentuado, hoje apresenta uma população de mais de cem mil habitantes (IBGE, 2010), sendo que mais de 90% da sua população encontra-se em sua área urbana. Formosa (GO) é, também, um dos municípios constituintes da área denominada de Região Integrada de Desenvolvimento Econômico (RIDE/DF) que foi criada para diminuir as desigualdades econômicas e de infraestrutura dos municípios situados nessa região do Entorno/DF, de forma a se buscar a integração do planejamento e a organização e execução das funções públicas municipais.

Dessa forma, os planejadores públicos precisam articular suas políticas de maneira a garantir que os serviços básicos de saneamento, mobilidade e acessibilidade sejam oferecidos a todos e avancem concomitantemente com a modificação do espaço urbano. Para isso, faz-se necessário que as decisões sejam pautadas em dados confiáveis e atualizados que incorporem, sobretudo, a natureza do território ao planejamento.

Assim, a utilização do geoprocessamento se faz vantajosa e pertinente, pois permite obter dados do território em um intervalo de tempo compatível com as mudanças ocorridas no espaço urbano. Os mapas de vulnerabilidade ambiental e a modelagem ambiental do uso e

cobertura do solo, bem como, a criação de cenários futuros, são ferramentas importantes de subsídio para elaboração políticas públicas afins.

A geração dos mapas de vulnerabilidade ambiental, segundo a metodologia constante em Ross (1994) é baseada no princípio das Unidades Ecodinâmicas de Tricart (1977). No caso da construção de cenários futuros que vem sendo investigado e aprimorado na literatura recente utiliza-se o modelo com abordagem probabilística e de autômatos celulares (AC) baseando-se nos trabalhos da dinâmica do uso e cobertura do solo (Almeida, 2004; Soares-Filho et al., 2007).

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a dinâmica de ocupação do uso e cobertura do solo do Município de Formosa (GO) por meio da utilização de algoritmos de geoprocessamento inserido em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e modelagem espacial da sua dinâmica ambiental na plataforma do Dinamica EGO. Dessa forma, os mapas de vulnerabilidade ambiental indicarão a região mais susceptível de sofrer degradação ambiental e, a partir dessa área, produzir um cenário futuro de modo a subsidiar futuras políticas públicas voltadas para ocupação racional do espaço urbano e de saneamento básico, além de permitir a compreensão da área de estudo em seus diferentes aspectos físico-espaciais.

2. Materiais e Métodos

A área de estudo abrange o Município de Formosa (GO) e encontra-se entre as coordenadas geográficas 15° 30' e 15° 35' de latitude sul e 47° 16' e 47° 16' de longitude oeste, localizado à 79 km de Brasília (DF).

Foram utilizados algoritmos de processamento de imagens e de geoprocessamento existentes nos sistemas de informações geográficas (SIG), o Spring 5.2.7, o ArcGis 10.2.2 versão *trial* e como plataforma de simulação ambiental o sistema Dinamica EGO.

A princípio para a confecção dos mapas de uso e cobertura do solo foram obtidas as imagens digitais do satélite Landsat 7 referentes ao mês de junho/julho do ano de 1999 e as do satélite Landsat 8 referentes ao mesmo período, mas do ano de 2014; disponibilizadas gratuitamente no site da instituição *United States Geological Survey* (USGS).

Os mapas de uso e cobertura foram gerados no *software* Spring por meio de uma série de passos metodológicos constantes de Almeida et al. (2012), descritos a seguir. a) registro: as imagens Landsat 7 foram georreferenciadas por meio de pontos de controle a partir de mapa já referenciado; as imagens do Landsat 8 já se encontram georreferenciadas; b) realce: com a finalidade de obtenção de uma melhor qualidade visual por meio de operações digitais de contraste de imagens; c) fusão: no qual por meio de uma composição colorida tipo falsa-cor RGB, converte-se para o espaço cromático IHS e em seguida de volta para o espaço cromático RGB, e a realização da fusão acontece trocando a banda S (correspondente a saturação no espaço de cores IHS) pela Pancromática (banda 8), dessa maneira obtém-se composições com resolução espacial de 15 metros; d) componentes principais: as imagens foram submetidas ao algoritmo de análise de componentes principais, e as três primeiras bandas espectrais resultantes foram utilizadas por possuir mais de 85% das informações espectrais das bandas originais; e) Índice de Vegetação Normalizada (IVDN): gerado por meio da utilização de algoritmos de operações aritméticas com objetivo de aumentar o contraste entre solo e a vegetação; f) segmentação: utilizou-se o algoritmo de segmentação de imagens com os valores adotados para similaridade e área de pixel de 40 e 1000, respectivamente, para as imagens Landsat 7 e de 10240 e 1500 para o satélite Landsat 8, os valores são distintos pela diferença de resoluções espacial e radiométrica das imagens; g) classificação temática: utilizou-se as três bandas de componentes principais, a imagem do IVDN e a imagem segmentada, em seguida, empregou-se as técnicas de classificação *por regiões* utilizando o algoritmo IsoSeg (não supervisionado) e a classificação *pixel a pixel*

através do algoritmo MAXVER (supervisionado), e a obtida como MAXVER foi escolhida para posterior vetorização. Dessa forma, as classes temáticas selecionadas baseadas em visitas à área de estudo foram do tipo: campo, campo sujo, cerrado, mata galeria, cultura irrigada, cultura temporária, áreas inundadas, corpos d'água, queimada, solo exposto, área urbana, e para imagens com cobertura de nuvens, classes temáticas adicionais para classificar as nuvens e respectivas sombras.

Por último, as imagens classificadas foram vetorizadas e transferidas para o sistema ArcGIS, a fim de realizar uma edição posterior da classificação temática, de modo a eliminar dados espúrios, utilizando as imagens do Google Earth como alicerce.

Para a geração do mapa de vulnerabilidade ambiental fez-se necessário a utilização do software sistema ArcGIS, do modelo digital de elevação (MDE) com resolução de 30 m obtidos por meio do radar altimétrico da missão orbital Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) e do mapa intermediário de pedologia com escala de 1:500 000 obtido no banco de dados do Governo do Estado de Goiás (SIEG, 2014).

A metodologia utilizada para a geração dos mapas de vulnerabilidades fundamentou-se nas recomendações Mass & Ross (2012). Nesse sentido, o mapa de vulnerabilidade potencial integra os diferentes elementos territoriais (pedologia, geomorfologia, e corpos d'água) que determinam a potencialidade dos recursos naturais. Esses componentes incorporados as intervenções antrópicas causadas no meio ambiente dão origem aos mapas de vulnerabilidade emergentes. Os graus de fragilidade foram atribuídos da seguinte maneira: do mais baixo ao mais forte (1 a 5), vide Figura 1.

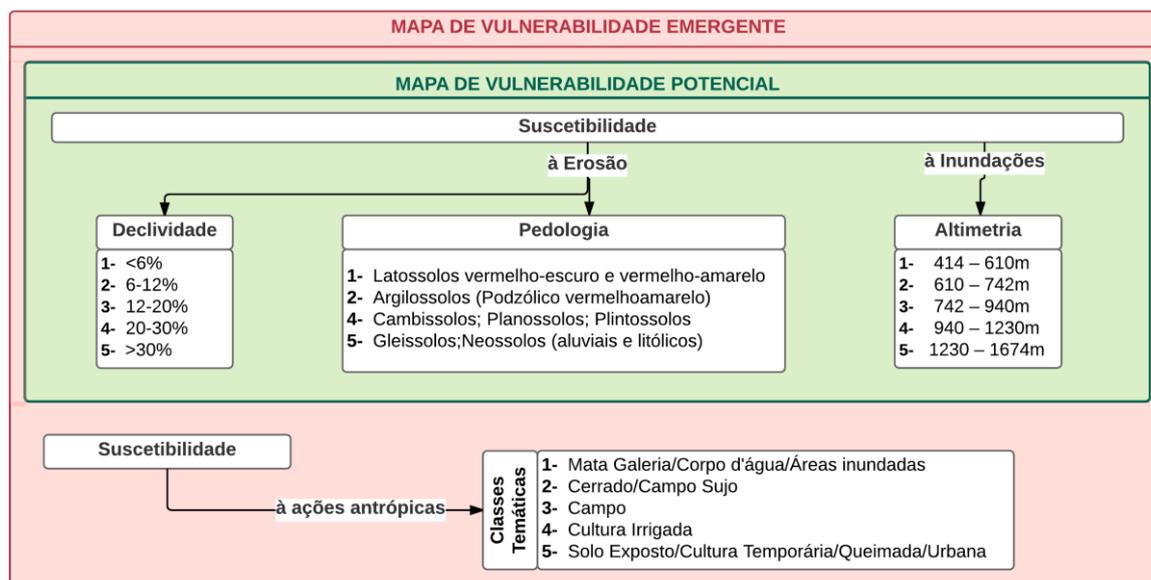


Figura 1. Fluxograma da geração dos mapas de vulnerabilidade com seus atributos.
 Fonte: Adaptado de Mass & Ross (2012)

Os mapas finais, uma vez delimitados os atributos para cada uma das classes, foram gerados por meio da metodologia da Análise Hierárquica de Processos (AHP) proposto por Saaty (1980), uma ferramenta que auxilia na tomada de decisões complexas sendo possível determinar valores intermediários na composição entre os mapas seguindo a lógica *Fuzzy*. Com utilização da ferramenta AHP do Spring os pesos de cada mapa componente foram atribuídos baseando-se principalmente na escala cartográfica dos mapas, ou seja, os mapas com escalas pequenas tiveram ordem de importância inferior. O algoritmo, por sua vez, analisa as consistências das comparações, gerando e determina a razão de consistência (RC).

A AHP, então, gera as equações com os respectivos pesos de cada mapa intermediário utilizados para a composição do mapa de vulnerabilidade ambiental final.

A área mais susceptível à degradação ambiental observada no mapa de vulnerabilidade ambiental emergente de 2014 foi a escolhida para a simulação de curto para o prazo de 5 anos no Dinamica EGO. Para a geração da cena futura, é necessária a utilização dos mapas de uso e cobertura do solo dos anos de 1999 e 2014 e dos mapas digitais de pedologia (escala 1:500 000), malha viária (escala 1:250 000) e drenagem (escala 1:100 000) obtidos no banco de dados do Governo do Estado de Goiás (SIEG).

Os mapas de uso e coberturas do solo obtidos para os anos de 1999 e 2014 da área escolhida (Figura 3), foram reclassificados reduzindo-se para 5 classes temáticas, dessa maneira, diminui-se a complexidade das diversas transformações que precisam ser processadas pelo Dinamica EGO. Para a execução da modelagem ambiental do uso e cobertura do solo seguiu-se as fases de parametrização, calibração e validação e simulação. A parametrização é a etapa que engloba vários métodos para gerar pesos às variáveis de entrada; a calibração é um processo interativo de mudanças de parâmetros por meio de comparações entre as cenas reais (mapa temático) e a simulada; e a validação utiliza métodos estatísticos para avaliar a conformidade entre a cena simulada e a real (Almeida, 2004).

Na parametrização utilizou-se procedimentos para a geração das matrizes de transição (passo único e passos múltiplos) e cálculo dos pesos de evidências. As matrizes de transição fornecem as mudanças percentuais das classes de uso do solo entre os mapas inicial (1999) e final (2014) por meio do algoritmo de tabulação cruzada. Os pesos de evidência, por sua vez, baseiam-se no teorema da probabilidade condicional de Bayes (Bonham-Carter, 1994), que se utilizam de probabilidades condicionais, afim de se obter relação de mudança de cada um dos fatores nos mapas inicial e final.

A calibração do modelo é executada por meio de autômatos celulares (AC). Os ACs podem ser compreendidos como sistemas de grades de células (*arrays*), nos quais os processos de mudança são representados célula a célula, como um simples mapeamento do estado atual de uma célula e das suas vizinhas para o estado da mesma no instante de tempo seguinte. Essa mudança ocorre em tempos discretos sendo que os estados que cada célula pode assumir dependem de um conjunto específico de regras de transição (Almeida, 2004).

O Dinamica EGO trabalha com os AC denominados de *patcher*, os que criam novas manchas para as classes em estudo observadas (Soares-Filho et al, 2007) e os *expander* que expandem as classes pré-existentes. Para o modelo adotou-se um tamanho médio dos fragmentos de 10 hectares (ha) para o *patcher* e 5 ha para o *expander*, para a variância do tamanho e a isometria adotou-se, respectivamente, 20 ha e 1.5 para ambos os operadores.

Para a simulação utilizou-se os mapas temáticos inicial (1999) e final (2014) e um “cubo” de variáveis estáticas (não sofrem alterações durante a simulação), que nada mais são do que o conjunto mapas digitais citados anteriormente. A validação do modelo se deu no software Dinamica EGO medindo-se a similaridade espacial entre os mapas simulado e temático do ano de 2014 por lógica *fuzzy* (Hagen, 2003). O método utilizado foi o de decaimento constante onde um pixel de mudança não alocado exatamente no mesmo local do pixel de mudança observado é considerado correto ao se encontrar nos limites da vizinhança (Soares-Filho et al., 2007). Com a calibração e validação do modelo foi executada a simulação para o ano de 2019.

3. Resultados e Discussão

As classificações temáticas do uso e cobertura do solo da área de estudo referentes aos anos de 1999 e 2014, conforme ilustrado na Figura 2, sintetizam a dinâmica de ocupação do solo do Município de Formosa (GO) e servem de alicerce para a compreensão dos mapas de fragilidade emergentes.

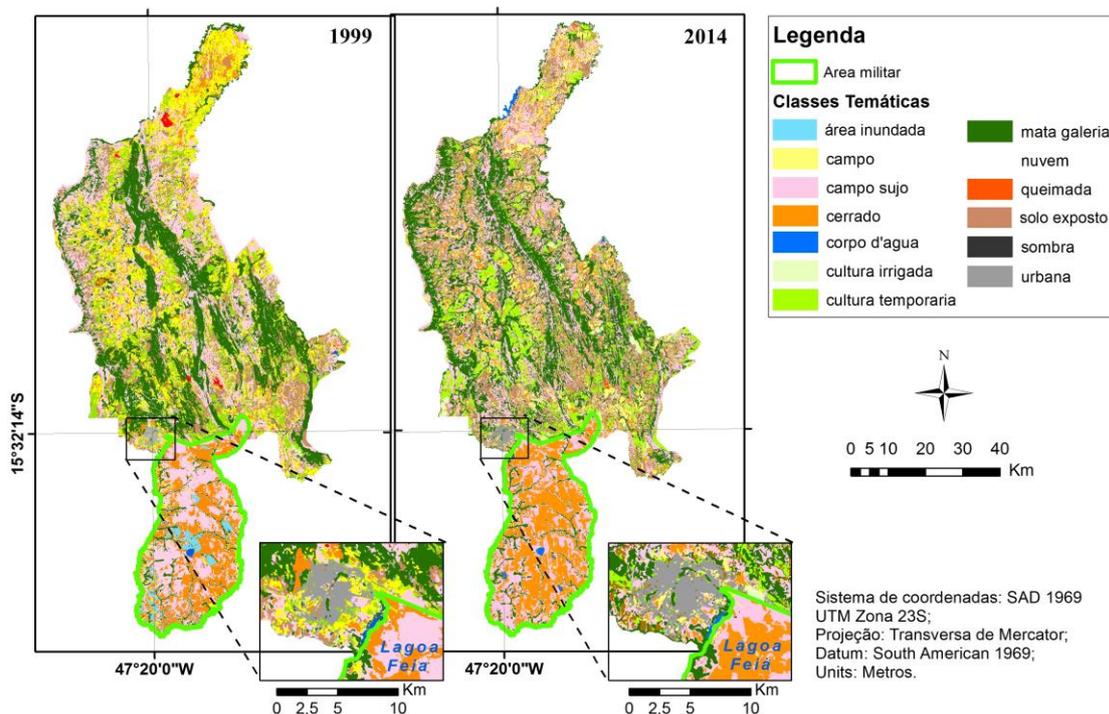


Figura 2. Mapas de uso e cobertura do Município de Formosa (GO).

Com a classificação temática foram verificadas as mudanças no uso do solo da região entre os anos estudados. A princípio, a expansão da zona urbana é bastante expressiva e corrobora o crescimento acelerado da população nos últimos anos. Além disso, outra situação agravante é que as margens da Lagoa Feia estão sendo ocupadas pela população de forma desordenada e sem obedecer suas áreas de proteção permanente, talvez pela ausência de fiscalização governamental. Devido a essa ocupação e a outros problemas de saneamento enfrentados na região, como má gestão da coleta de resíduos sólidos e despejo de efluentes domésticos, tem-se observado elevado grau de assoreamento da Lagoa assim como pontos de contaminação, com indícios de eutrofização como foram atestados no trabalho de Santos (2005).

Outras mudanças significativas referem-se a um aumento de cerca de 50% da quantidade de solo exposto (591,2 km² para 864,6 km²), da área irrigada (10,5 km² para 52,5 km²) e redução das áreas inundadas e corpos d'água (70,4 km² para 24,5 km²), o que caracteriza um aumento da área de agricultura mecanizada ocupando as áreas de vegetação nativa tipo cerrado. As demais classes temáticas, apesar de não apresentarem elevada variância em relação quantidade de área total houve uma nítida variação das suas distribuições espaciais entre os dois períodos, vide Figura 2.

Os mapas de vulnerabilidades potencial e emergentes foram obtidos com os atributos adotados para os mapas intermediários (vide metodologia constante na Figura 1), mas também com os pesos atribuídos para cada um dos mapas (equações 1 e 2), no qual obteve-se razão de consistência geradas pela ferramenta “suporte a decisão (AHP)” do *software* Spring para a equação 1 de 0,011 e para a equação 2 de 0,057, ambas são inferiores ao limite superior recomendado na literatura que é de 0,1, indicando que as comparações feitas são coerentes e geram resultados seguros. As equações obtidas com a AHP são as citadas a seguir:

$$VP = 0.462 S_1 + 0.462 S_2 + 0.077 S_3 \quad (1)$$

$$VE = 0.177 S_1 + 0.177 S_2 + 0.041 S_3 + 0.550 S_4 \quad (2)$$

No qual, “VP” é a vulnerabilidade potencial; “VE” é a vulnerabilidade emergente; “S₁” mapa de suscetibilidade à inundação; “S₂” mapa de suscetibilidade em função da declividade; “S₃” mapa de suscetibilidade em função da pedologia; “S₄” mapa de suscetibilidade em função do uso do solo.

Utilizando-se a ferramenta Raster Calculator/ArcGIS, com os pesos determinados pela AHP (equações 1 e 2), foram obtidos os mapas de vulnerabilidades ambiental potencial e emergente, apresentados na Figura 3.

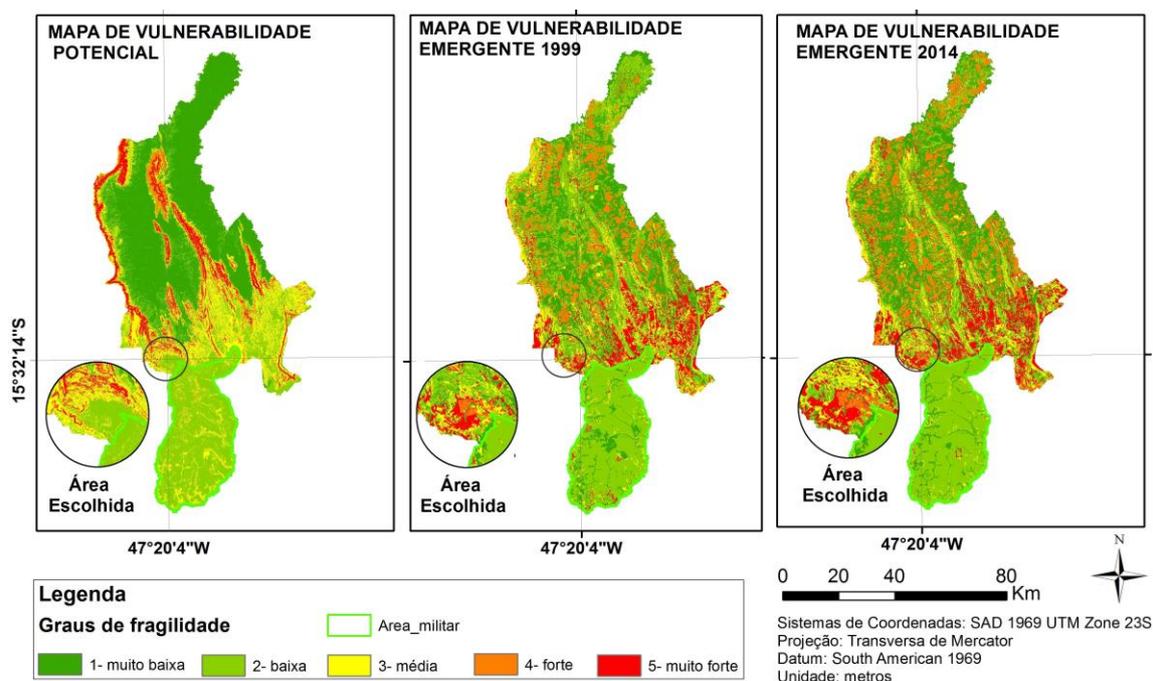


Figura 3. Mapas de vulnerabilidades ambiental do Município de Formosa (GO).

Deve se ressaltar que os resultados para os mapas de vulnerabilidades ambientais seriam mais precisos caso fossem utilizados mais mapas intermediários com escala cartográfica maiores, como o mapa de pedologia, pois o seu peso nas equações 1 e 2 acabou sendo bem menor ao que deveria ser atribuído dada a sua importância na vulnerabilidade ambiental.

O mapa de vulnerabilidade ambiental potencial da região indica que a maior parte do solo possuía uma baixa fragilidade e demonstra o quanto às intervenções humanas foram significativas para a elevada degradação do meio ambiente. A área do município com menor fragilidade nos mapas de vulnerabilidade emergentes é a área militar do Exército Brasileiro (EB), compreensível por ser uma área protegida de domínio da União.

Os locais com maior degradação no mapa representam, como pode ser comparado na carta geotécnica (escala 1:120 000) resultante do mapa de uso e cobertura do solo, as áreas com atividade humana intensa de urbanização, uso agrícola ou exploração excessiva dos recursos naturais, alterando a dinâmica natural do ambiente e superando sua capacidade de resiliência.

A área escolhida para a modelagem ambiental, foi selecionada por ser uma área classificada com elevada vulnerabilidade ambiental emergente, sendo que era uma área que naturalmente possuía grau de fragilidade baixo-médio. Além disso, essa área apresentou elevado crescimento urbano nos últimos anos.

Como resultado para a validação do modelo tem-se os índices de similaridades mínimas recíprocas (Tabela 1) que demonstram que com uma resolução inferior, os mapas obtidos para o ano de 2014 pelo software Dinamica EGO se aproximam do mapa temático uso e cobertura do solo do ano de 2014.

Tabela 1- Índices de similaridade entre o mapa simulado e real em função da resolução (*window Size*) obtidos pelo método de decaimento constante

| | | | | | | |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Similaridades mínimas | 0.3826 | 0.4843 | 0.5763 | 0.6480 | 0.7020 | 0.7442 |
| Window Size | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 |
| Resolução (metros) | 30 | 90 | 150 | 210 | 270 | 330 |

Tendo em vista o gráfico acima, pode-se afirmar que para uma resolução de 150 metros o valor de ajuste de similaridade foi de cerca de 58%, dessa maneira, valida-se a simulação e pode-se executar a modelagem futura (Figura 4). Cabe salientar que os resultados do modelo poderiam ter se ajustado melhor, caso o número de classes temáticas fosse ainda mais reduzido, pois isso geraria um modelo com menor número de transições e mapas de entrada com resoluções melhores e equivalentes.

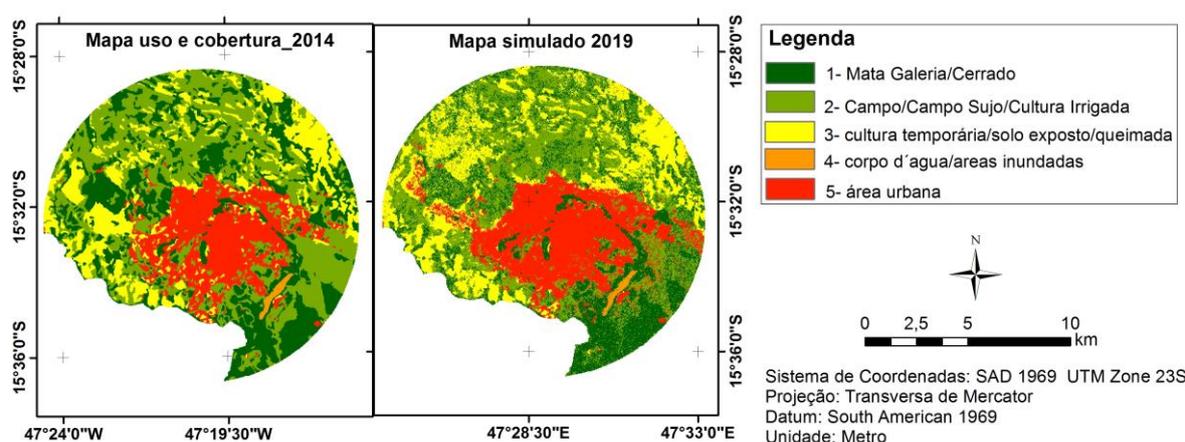


Figura 4. Mapa temático do uso e cobertura do solo de 2014 comparado com o cenário gráfico para o ano de 2019.

O cenário futuro do uso e cobertura do solo do ano de 2019 seguiu a tendência do crescimento urbano acelerado, observado nos últimos anos em Formosa (GO), no qual pode-se inferir que caso políticas públicas não sejam consolidadas, haverá uma expansão urbana no sentido noroeste e sudeste, esse que é a mais preocupante, pois pode acelerar os processos de eutrofização e contaminação da Lagoa Feia já constatados.

4. Conclusões

As técnicas de processamento de imagens de sensores remotos utilizadas possibilitaram a produção de mapas temáticos de uso e cobertura do solo que permitiram verificar as principais transformações ocorridas na área de estudo e, esses mapas foram os principais subsídios na determinação da vulnerabilidade ambiental.

Os mapas de vulnerabilidade ambiental foram condizentes com a metodologia utilizada, resultando em dados importantes para subsidiar uma melhor gestão ambiental do espaço municipal, afinal é possível compreender esse espaço de maneira abrangente e integrada, entendendo principalmente o território estudado com suas características intrínsecas.

A simulação do uso e cobertura do solo para o ano de 2019, executada por meio do cenário gráfico obtido com a modelagem no Dinamica EGO atestou o crescimento acelerado da população urbana e a necessidade de que hajam políticas públicas de controle dessa expansão para que ela ocorra de maneira ordenada e não venha a comprometer o meio ambiente e os seus recursos naturais. Apesar do ótimo resultado ressalta-se que a simulação

teria um melhor ajuste caso fossem considerados um menor número de classes temáticas e mapas com uma maior compatibilidade de resolução.

A utilização das ferramentas de geoprocessamento assim como dos programas SIG, mostraram-se eficientes e complementares para o alcance do objetivo da pesquisa, além da plataforma de simulação Dinâmica EGO, pois a geração do cenário prospectivo permitirá subsidiar futuras políticas públicas locais de otimização do espaço urbano (Planos Diretores, Plano de Saneamento Básico, entre outros).

Agradecimentos

Ao CNPq e à UnB pelo apoio financeiro fornecido para a execução do projeto, e a UFMG na disponibilização do *software* Dinâmica EGO.

Referências Bibliográficas

Almeida, C.M. **Modelagem da Dinâmica Espacial como uma Ferramenta Auxiliar ao Planejamento: Simulação de Mudanças de Uso do Solo em Áreas Urbanas para as Cidades de Bauru e Piracicaba (SP). Brasil.** 2004. 351 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos, 2004.

Almeida, W. S.; Souza, N.M.; De Carvalho, J. C. **Produção de carta geotécnica preliminar e capacidade de infiltração de água no solo em uma área do entorno do reservatório da usina hidrelétrica Corumbá IV (GO).** In: De Carvalho, J. C (Org.). Livro Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos. Brasília, DF. Universidade de Brasília, 2012, v. 4, p. 587-612.

Bonham-Carter, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS.** Ontario: Pergamon, 1994. 305 p.

Hagen, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 17, n. 3, p.235-249, 2003.

Instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE). Censo 2010: População do Brasil. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=8>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

Massa, E. M.; Ross, J. L. S. Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, p. 57-79, 2012.

Ross, J.L.S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**. n. 8, p. 63-73, 1994.

Saaty, T.L. **The Analytic Hierarchy Process.** McGraw Hill International. 1980.

Santos, A. S. **Subsídios à implantação da Gestão Ambiental em Áreas Militares do Exército Brasileiro, tendo como estudo de caso o campo de instrução de Formosa GO.** 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2005.

Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (SIEG). **Download de arquivos de SIG.** Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br/>>. Acesso em: Nov. 2014.

Soares-Filho, B.S.; Cerqueira, G. C.; Araújo, W. L.; Voll, E. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba.** Megadiversidade. Belo Horizonte, v.3,n.1-2,p 1-16, 2007.

Tricart, J. **Ecodinâmica.** Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 91 p., 197.

United States Geological Survey (USGS). **Obtenção imagens de satélites e radares.** Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 10 Set. 2014.