

Geração de cenários de conservação: importância da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo adotado

Maria Socorro Duarte da Silva Couto^{1,2}
Laerte Guimarães Ferreira²
Bryon Richard Hall³
Geci José Pereira da Silva³
Faniel Nogueira Garcia²

¹ Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia de Goiás
IFG – Campus Inhumas - Av. Universitária s/n Vale das Goiabeiras, CEP:75400-000,
Inhumas – GO, Brasil
socorrodc@inhumas.ifg.edu.br

² Universidade Federal de Goiás
Instituto de Estudos Sócio-Ambientais
Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento
UFG - Campus Samambaia, Caixa Postal: 131, CEP:74001-970, Goiânia – GO, Brasil
laerte@iesa.ufg.br
fanuelng@yahoo.com.br

³ Universidade Federal de Goiás
Instituto de Matemática e Estatística
UFG - Campus Samambaia, Caixa Postal: 131, CEP:74001-970, Goiânia – GO, Brasil
{bryon, geci}@mat.ufg.br

Abstract. The efforts to minimize the loss of habitats and threats to conservation of biodiversity are increasingly based on objective criteria, which allow prioritizing areas and species in need of preservation, taking into account the limitations in both natural and economic resources. These criteria are fundamental for the reserve selection and design, mainly in regions severely affected by the intensification of land use. In particular, the use of mathematical modeling, enabling the identification of more efficient alternatives, is an important subsidy to conservation challenge. In this paper, we present a sensitivity analysis regarding the parameters of the non-linear model we developed for the selection of priority areas for conservation, which considers both the quality and ecological feasibility of the remnant vegetation in the Cerrado areas of the State of Goiás, as well as the practical and legal aspects regarding the use of watersheds for territorial management. The variation of the parameters used in such model maintains a direct relation to the social-economical and environmental interests, thus generating distinct solutions and scenarios. Among the possible outcomes, we highlight as an "optimum" solution, the one with a large number remnant vegetation areas within riparian environments, which serves the purpose of strengthening spatial connectivity and natural corridors.

Keywords: Cerrado, Priority Areas, Conservation scenarios, Optimization, Non-Linear Programming.

1. Introdução

O bioma Cerrado, o segundo maior bioma da América do Sul, ocupa uma área de 2.039.387 km², abrange 12 estados (IBGE, 2000) e é reconhecido como sendo um dos 34 hotspots de biodiversidade no mundo (MYERS et al., 2000), tanto por seus aspectos naturais, quanto pela intensa ocupação agropastoril que o transformou na principal fronteira de expansão agrícola brasileira (MIZIARA e FERREIRA, 2008), responsável por uma perda de 39,5% a 55% da cobertura vegetal nativa original (MACHADO et al., 2004; SANO et al., 2008).

Neste contexto, torna-se cada vez mais premente a adoção de critérios objetivos com vistas à priorização coerente de áreas e/ou espécies a serem preservadas (CABEZA, 2003;

MARGULES e PRESSEY, 2000; MARGULES et al., 2002), levando em conta fatores como a limitação de recursos naturais e econômicos (ARPONEN et al., 2005; MARGULES e PRESSEY, 2000).

Esta constatação levou ao desenvolvimento de uma variedade de métodos matemáticos e computacionais para subsidiarem a identificação de áreas prioritárias para conservação. Em particular, destaca-se o uso de métodos de programação não-linear, os quais permitem a incorporação de critérios potencialmente úteis à tomada de decisão (por exemplo, a distância e a conectividade entre os fragmentos de vegetação remanescente), bem como a variação dos parâmetros dos objetos de conservação, de tal forma a encontrar soluções alternativas por meio da geração de vários cenários.

Este artigo tem como objetivo fazer um estudo mais aprofundado da análise de sensibilidade da solução do modelo proposto por Couto (2010), a partir da variação de alguns parâmetros dos objetos de conservação, com vistas à gerar novos cenários voltados à gestão territorial e consolidação da conservação da biodiversidade e de paisagens no Estado de Goiás.

2. Metodologia de Trabalho

Este trabalho tem como área de estudo o Estado de Goiás, com aproximadamente 98% de sua área inserida na região *core* do bioma Cerrado, e com ao menos 45% e 18% da cobertura vegetal nativa já convertida em pastagens cultivadas e áreas agrícolas, respectivamente (SANO et al., 2008).

O conjunto de dados primários (cartográficos, temáticos, censitários, orbitais e biológicos), os procedimentos e os dados derivados (produtos) referentes à este trabalho, são detalhados através do diagrama da Figura 1.

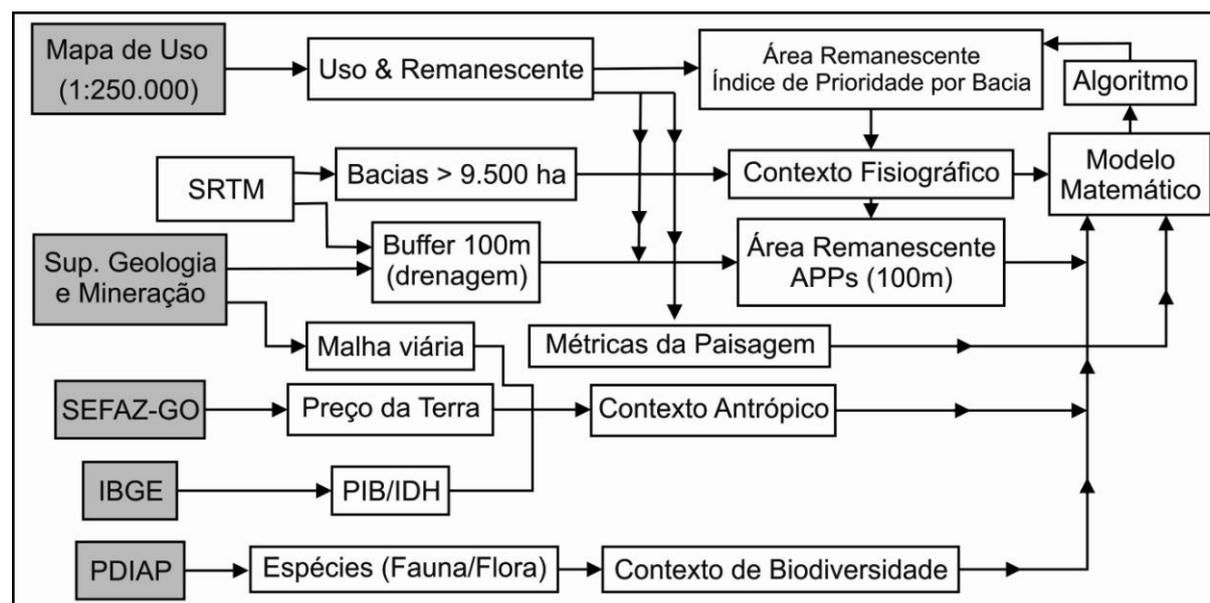


Figura 1. Conjunto de dados primários e procedimentos metodológicos aplicados à área de estudo para identificação de áreas prioritárias.

O modelo de seleção de áreas prioritárias para conservação no Estado de Goiás proposto por Couto (2010) é um modelo de programação não-linear, que tem como unidade de aplicação 1511 bacias hidrográficas com área mínima de 9.500 hectares. Tendo em vista a escala do mapa de cobertura e uso da terra usado neste trabalho (1:250.000), foram considerados nas análises do modelo matemático apenas os fragmentos remanescentes com área mínima de 1.000 ha dentro de cada bacia.

Este modelo, implementado através do *software* Scilab 4.1.2 e da plataforma ArcGis 9, se baseia na Teoria de Grafos para traduzir dados geográficos como posição relativa de pontos e ordenamento espacial da informação (AGNARSSON e GREENLAW, 2007; BANG-JENSEN e GUTIN, 2001), determinando-se assim a conectividade das bacias selecionadas na escolha de áreas prioritárias.

3. Resultados e Discussão

O modelo de seleção de áreas prioritárias para conservação proposto por Couto (2010) é um problema de programação não-linear, onde a função-objetivo consiste em minimizar o número de áreas prioritárias, minimizando a soma das distâncias entre as áreas selecionadas, ao mesmo tempo em que maximiza a qualidade total. O algoritmo computacional heurístico utilizado por este modelo determina soluções com áreas mais aglomeradas, favorecendo a viabilidade ecológica, o custo de conservação e a redução dos atritos entre a conservação da biodiversidade e o desenvolvimento sócio-econômico regional (CABEZA e MOILANEN, 2001).

Este algoritmo seleciona um conjunto de bacias hidrográficas com índice de importância $B(l) \in [0, 1]$, o qual indica a importância de inclusão da bacia l com propósito de preservação, dentre as 1511 bacias hidrográficas maiores ou iguais a 9.500 ha situadas no Estado de Goiás.

A importância de inclusão de uma bacia l depende dos fragmentos e vegetação remanescente (ou simplesmente fragmentos remanescentes) que nela estejam. Desta forma, a inclusão de uma bacia está associada a um parâmetro de qualidade/importância ($\alpha(i) \in [0, 1]$) de inserção de seus fragmentos remanescentes (i) na proposta de conservação.

O modelo de PNL proposto por Couto (2010) é:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum & \left[- \left(\frac{c_1}{P_i} + \frac{c_2}{Q_i} + \frac{c_3}{I_i} \right) \cdot (1 - \alpha(i)) a_i - c_4 (1 - \alpha(i)) b_i + c_5 \cdot \left(\frac{p_i}{a_i} \right) - c_6 \cdot \beta(i) + \right. \\ & \left. c_7 \cdot r_i - c_8 \cdot d_i + \frac{c_9 \alpha_i^T D \alpha_i}{(g^2(i) - g(i))} - c_{10} e_{ij} \right] \quad (1) \\ \text{s.a.} \quad & \sum \alpha(i) \cdot a_i \geq K \end{aligned}$$

onde,

c_i $i=1,2,\dots,10$ são os parâmetros e as variáveis da função objetivo são:

a_i = área do fragmento remanescente i dentro da bacia;

b_i = área do *buffer* do fragmento remanescente i dentro da bacia;

P_i = preço da terra correspondente ao município que contém o fragmento remanescente i ;

Q_i = PIB correspondente ao município que contém o fragmento remanescente i ;

I_i = IDH correspondente ao município que contém o fragmento i ; remanescente;

e_{ij} = vetor de presença ou ausência de espécie j dentro do fragmento remanescente i ;

p_i/a_i = razão entre o perímetro e a área do fragmento remanescente i ;

r_i = nível de influência sofrida (0, 1/2 ou 1) do fragmento remanescente i com a rodovia;

d_i = distância de saída da sub-região hídrica (ou simplesmente, distância hídrica), isto é, o número de fragmentos remanescentes que estão rio abaixo do fragmento i até o ponto final da linha de drenagem, esta distância ajuda identificar o fragmento remanescente que faz parte de uma nascente.

$\alpha(i)$ = variável de qualidade/importância de inclusão do fragmento remanescente i em proposta de conservação. Esta variável tem valor inicial de zero e varia ao longo do algoritmo. A determinação de seu valor é a finalidade do algoritmo;

$\beta(i)$ = variável que reflete a existência de fragmentos remanescentes adjacentes ao fragmento i na proposta de conservação.

A variação dos valores dos parâmetros c_i determina soluções distintas. A discussão sobre a natureza e a sensibilidade destas soluções depende dos valores c_i , que são pesos atribuídos às variáveis ao problema, de acordo com os interesses envolvidos.

Inicialmente, aplicamos o modelo para todo Estado de Goiás, e procedemos ao estudo de cada parcela da função objetivo para obter primeiramente uma solução básica, onde os valores dos parâmetros usados inicialmente no problema dão peso aproximadamente igualitário a cada fator da função-objetivo. Desta forma, por exemplo, na parcela que envolve as variáveis de ação antrópica (Preço da terra, PIB e IDH) foi obtido um valor inicial para cada parâmetro, de forma que se exerça um peso sobre o valor médio de cada uma destas variáveis, tal que a soma do quociente de cada parâmetro com sua variável correspondente seja menor e próximo de um. Já para as outras variáveis, foi determinado o peso do parâmetro de forma que a soma do produto de cada um deles com sua variável correspondente exerça um peso aproximadamente igualitário ao das outras parcelas, tal que quanto maior o peso, maior é a probabilidade, por um lado, de inclusão das áreas de maior viabilidade ecológica, e por outro lado, de exclusão das áreas de maior ação antrópica.

Os valores encontrados para os parâmetros são: $c_1 = 2.000$, $c_2 = 20.000$, $c_3 = 0,2$, $c_4 = 20$, $c_5 = 100.000$, $c_6 = 1.000$, $c_7 = 12.000$, $c_8 = 1.000$, $c_9 = 0,25$ e $K = 0,7$. Com estes parâmetros determinamos uma solução, denominada solução básica.

Para o estudo da variação dos parâmetros, consideramos, neste trabalho, $c_{10} = 0$, devido a pouca representatividade espacial da observação dos dados de biodiversidade (BINI et al., 2006). Em outros estudos, com dados mais expressivos para implementação, a representação de espécies deve ser enfatizada.

A partir da variação dos parâmetros, é possível obter várias soluções, cuja análise de sensibilidade das soluções pode auxiliar os gestores com vistas à elaboração e/ou aperfeiçoamento de políticas públicas para priorização de áreas para conservação.

Tendo em vista que em Couto (2010) foi definido como sendo uma solução ótima, a solução que possui elevado índice de ambientes ripários e de vegetação remanescente ($c_4 = 60$), e que valoriza a vizinhança e a conectividade entre as áreas remanescente ($c_6 = 3.000$), ao mesmo tempo em que minimiza os efeitos das variáveis antrópicas sobre a conservação destas áreas, iremos fazer o estudo da variação dos parâmetros referente aos ambientes ripários (c_4) e referente à vizinhança e conectividade (c_6) do modelo (1) em relação à solução básica.

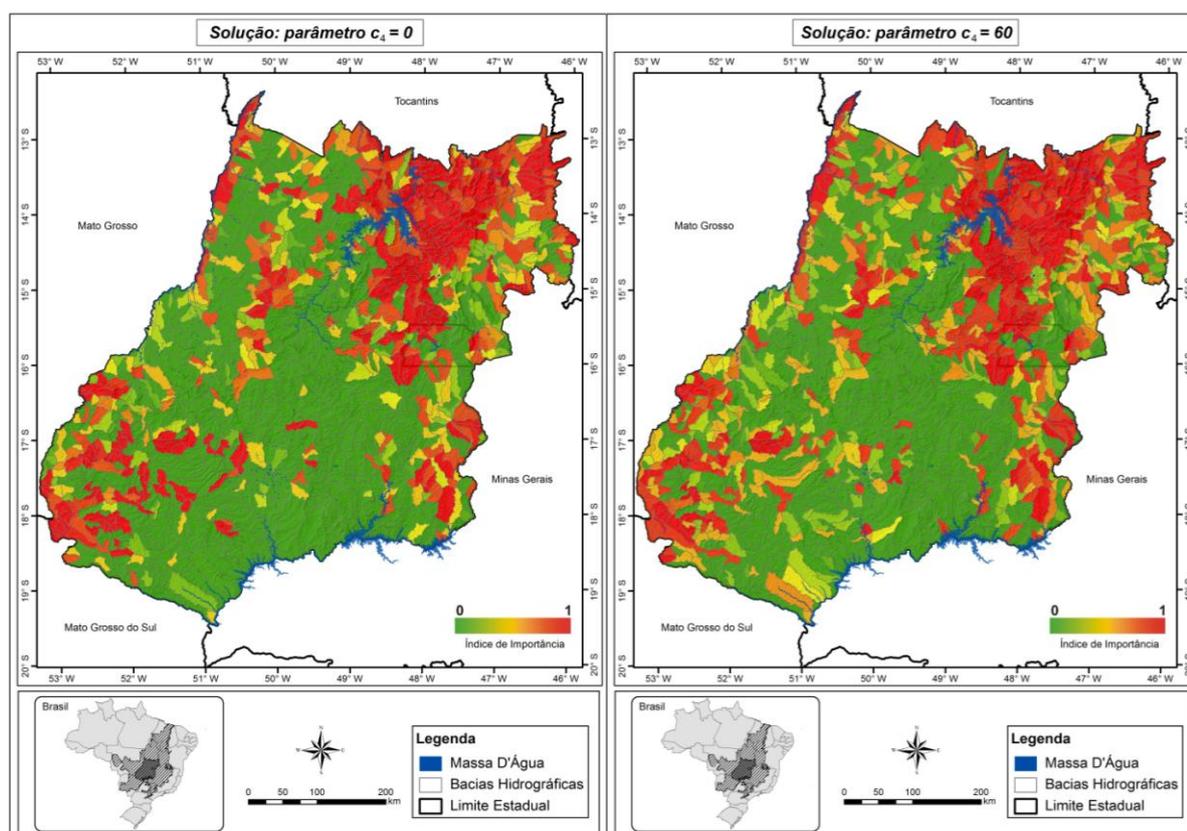
Para ajudar nas análises e medir as possíveis alterações entre a solução gerada pela variação do peso de um único parâmetro c_i e a solução básica acima determinada, definimos a distância X como sendo a raiz quadrada da metade da soma do quadrado da diferença entre o vetor solução do parâmetro variado e o vetor solução básico.

Primeiro variamos somente o peso do parâmetro referente aos ambientes ripários (c_4), com relação à solução básica (Tabela 1) e observamos que quando $c_4 = 0$, isto é, omitimos os ambientes ripários, existe uma maior distância ($X = 6,093$) entre a solução obtida deste parâmetro em relação à solução padrão, do que com os outros pesos atribuídos ao mesmo parâmetro. Isto significa que os ambientes ripários têm grande influência na solução do problema de seleção de áreas prioritárias para conservação, o que se deve ao fato de que estes ambientes estão ficando restritos, diminuindo a possibilidade de inclusão de determinadas bacias hidrográficas na solução, haja vista os desmatamentos em curso. De fato, dos quase 114 mil hectares de desmatamentos detectados no Estado de Goiás para o período de 2003 a 2004, 88% ocorreram em áreas de preservação permanente (FERREIRA et al, 2008).

Tabela 1: Distância entre a solução gerada pela variação do peso de um único parâmetro c_i e a solução básica.

Parâmetro	Distância X	Parâmetro	Distância X
$c_4 = 0$	6,093	$c_6 = 0$	4,355
$c_4 = 20$	0	$c_6 = 0$	0
$c_4 = 40$	4,931	$c_6 = 2000$	4,104
$c_4 = 60$	4,714	$c_6 = 3000$	5,062

Constatamos que com o aumento do peso do parâmetro referente aos ambientes ripários (c_4), em termos de nível de importância das bacias, houve uma diferença significativa das áreas selecionadas da solução, principalmente na Região Sudoeste, uma das regiões do estado de maior degradação ambiental (Figuras 1 e 2). Isto se deve ao fato de que quando priorizamos os ambientes ripários, com o aumento do peso de seu parâmetro c_4 , diminuimos a influência das outras variáveis na solução.

Figura 1. Solução: parâmetro $c_4=0$.Figura 2. Solução: parâmetro $c_4=60$.

Nas soluções em que variamos somente o peso do parâmetro referente à vizinhança e conectividade (c_6) (Tabela 1), observamos que a maior distância ($X = 5,062$) ocorreu para $c_6 = 3000$, o que significa, em termos de nível de importância das bacias, ter havido um maior adensamento de áreas na solução, principalmente, na Região Sudoeste (Figura 3 e 4).

É interessante observar que na região Sudoeste, o adensamento de áreas ocorre na região onde se localiza o Parque Nacional das Emas (Figura 4). De fato, por se tratar de uma unidade de conservação integral, esta induz à conservação de suas áreas circunvizinhas.

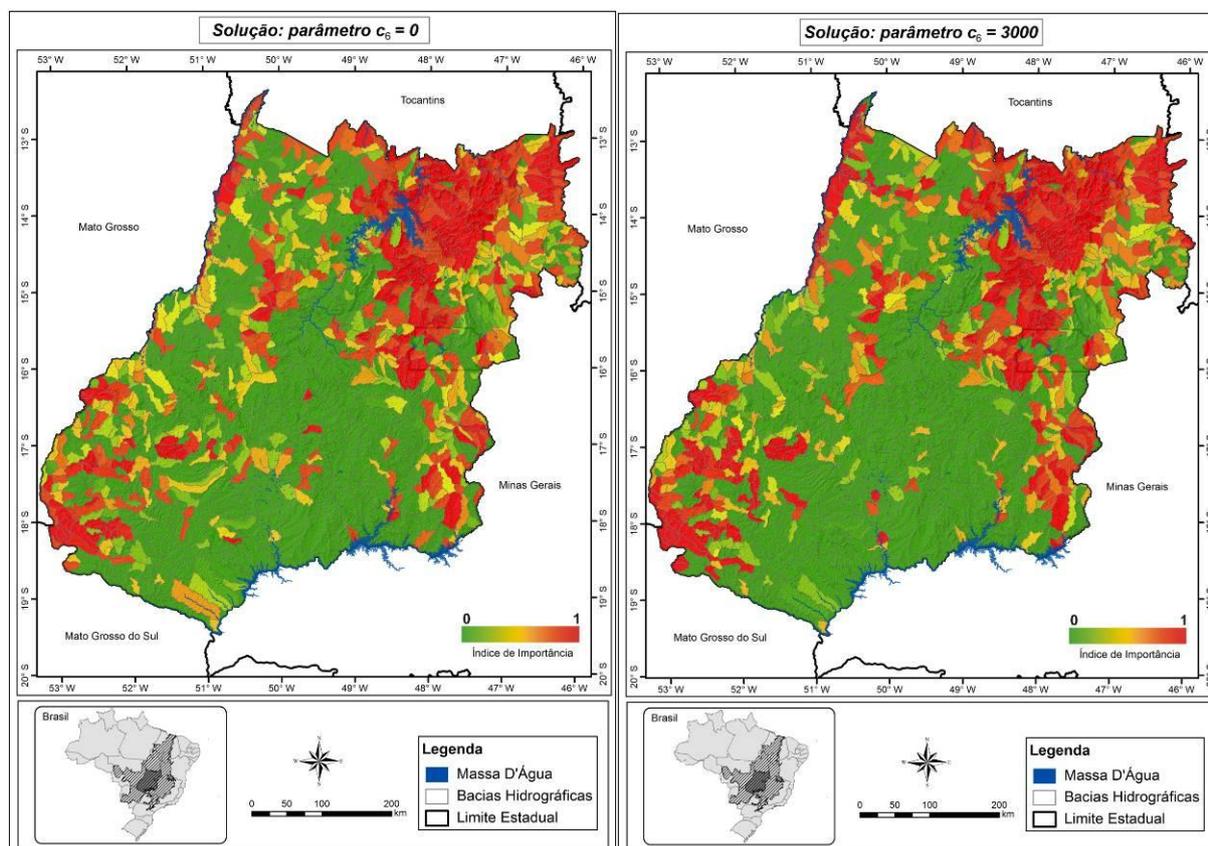


Figura 3. Solução: parâmetro $c_6=0$.

Figura 4. Solução: parâmetro $c_6=3000$.

A partir da solução ótima definida por Couto et al. (2010), fizemos a análise das bacias com maior nível de importância, para saber quais foram as primeiras a serem priorizadas na solução, e por onde elas se propagam nessa priorização.

Para esta análise, atribuímos três pesos diferentes para o parâmetro K (0,42; 0,49; 0,56), obtendo assim três soluções ótimas (1, 2 e 3), respectivamente, que foram comparadas com a solução ótima definida por Couto et al. (2010) (solução ótima 4).

A solução ótima 1 gera um cenário (Figura 5) que mostra as primeiras bacias selecionadas com maior nível de importância (em vermelho). Elas se destacam, principalmente, nas áreas que contém: o Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros (Região Nordeste); o Parque Nacional das Emas e a nascente do Rio Araguaia (Região Sudoeste); o alto do Araguaia (Região Noroeste); De fato, isto ocorre porque as áreas de vegetação remanescente mais preservadas estão concentradas mais no nordeste goiano, ou nas bacias que estão próximas ou contém alguma unidade de conservação.

Na solução ótima 2, existe um aumento gradativo de inclusão de novas bacias com maior nível de importância na vizinhança das que foram obtidas na solução ótima 1.

Na solução ótima 3, o comportamento é bastante semelhante com o da solução ótima 2, mas com tendência maior de formação de corredores, aproximando mais do cenário obtido através da solução ótima 4 (Figura 6).

Comparando as soluções 1, 2 e 3 com a solução 4, observamos que a solução 4 contém as bacias com maior nível de importância da solução 3, que contém as bacias com maior nível de importância da solução 2, que contém as bacias com maior nível de importância da solução 1.

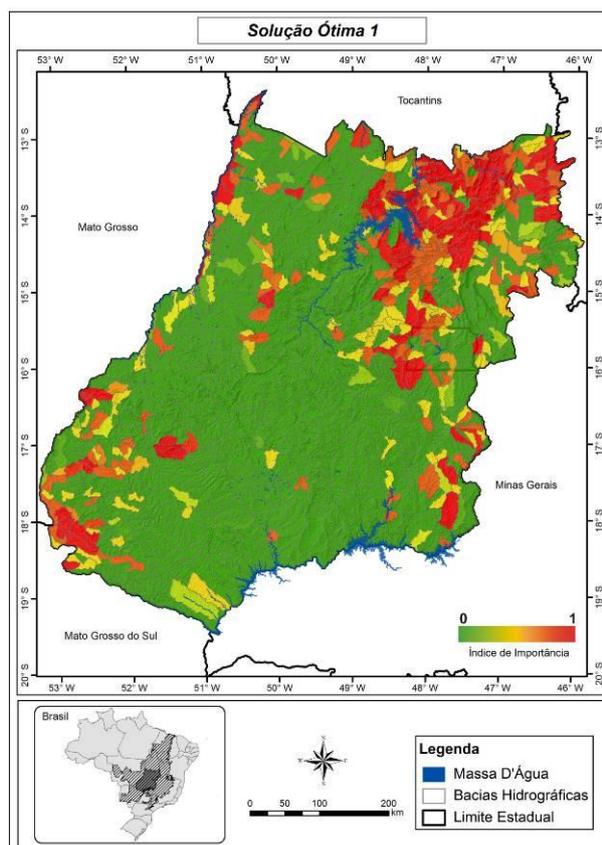


Figura 5. Solução Ótima 1.

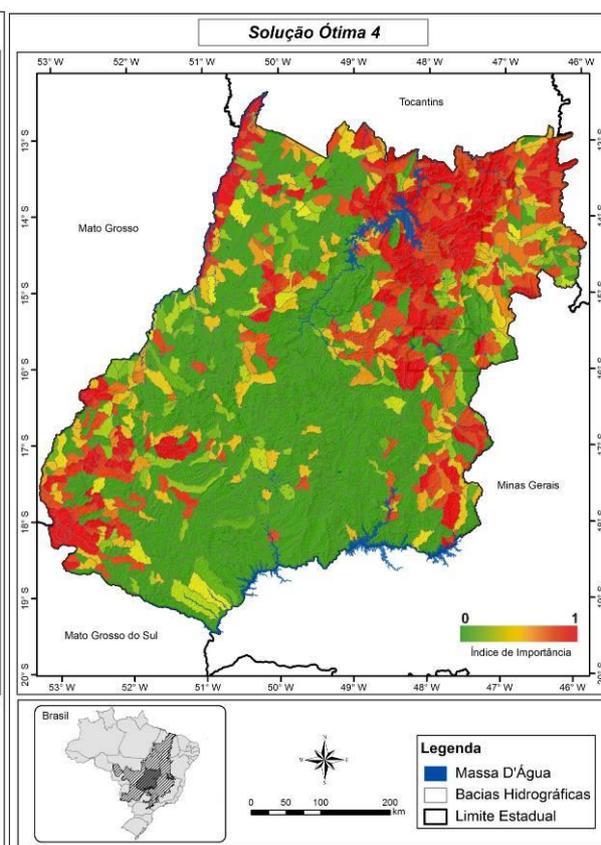


Figura 6. Solução Ótima 4.

A solução ótima 4 (Figura 6) mostra que as bacias com maior nível de importância se concentram na Região Nordeste e no âmbito de grandes corredores naturais, tais como, na Região Nordeste, o corredor Paranã-Pirineus, e na Região Sudoeste, o corredor que contém o Parque Nacional das Emas e as nascentes do Rio Araguaia. Além disso, esta solução favorece o adensamento das unidades de proteção existentes, pois a maioria coincide com as áreas de maior nível de importância desta solução.

4. Conclusões

Com o estudo da variação dos parâmetros referente aos ambientes ripários (c_4) e referente à vizinhança e conectividade (c_6) do modelo (1) em relação à solução básica, observamos o quanto esta solução é sensível à variação destes dois parâmetros, gerando cenários diferentes para análise. Em fato, o estudo da variação de parâmetros é importante para se obter soluções diferentes, as quais resultam em alternativas e maior viabilidade para criação e gestão de novas unidades de conservação e implantação de corredores, tanto no aspecto biológico, econômico.

Em uma próxima etapa, procederemos à análise da variação de todos os parâmetros dos objetos de conservação, com vistas ao aprimoramento do modelo matemático (1) e de seu algoritmo, bem como para obtenção de cenários alternativos que contribuam para a efetiva gestão territorial e ambiental do Estado de Goiás e do Bioma Cerrado como um todo.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Edital Universal 471198/2009-9). O segundo e quinto autores são bolsistas do CNPq, de produtividade em pesquisa (1C) e mestrado, respectivamente.

Referências Bibliográficas

- Agarwal, G.; Greenlaw, R. **Graph Theory: Modeling, Applications, and Algorithms**. Person Prentice Hall. New Jersey, 2007.
- Arponen, A.; Heikkinen, R. K.; Thomas, C. D.; Moilanen, A. The Value of Biodiversity in Reserve Selection: Representation, Species Weighting, and Benefit Functions. **Conservation Biology**. n. 19, p. 2009-2014, 2005.
- Bang-Jensen, J.; Gutin, G. **Digraphs: Theory, Algorithms and Applications**. Springer – Verlag, London, 2001.
- Bini, L. M.; Diniz-Filho, J. A. F.; Rangel, T. F. L. V. B.; Bastos, R. P.; Pinto, M. P. Challenging Wallacean and Linnean shortfalls: knowledge gradients and conservation planning in a biodiversity hotspot. **Diversity and Distributions**, n. 12, p. 475-482, 2006.
- Cabeza, M.; Moilanen, A. Design of reserve network and the persistence of biodiversity. **Trend in Ecology and Evolution** n. 16, p. 242-248, 2001.
- Cabeza, M. Habitat loss and connectivity of reserve networks in probability approaches to reserve to reserve design. **Ecology Letters** n. 6, p. 665-672, 2003.
- Couto, M S D S; Ferreira, L G; Hall, B R; Silva, G J P; Garcia, F N. Identificação de Áreas Prioritárias para Conservação da Biodiversidade e Paisagens no Estado de Goiás: Métodos e Cenários no Contexto da Bacia Hidrográfica. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 62/2, p.125-135, 2010.
- Ferreira, M. E.; Ferreira JR., L. G.; Ferreira, N. C. Cobertura vegetal remanescente em Goiás: distribuição, viabilidade ecológica e monitoramento. In: Ferreira Jr., L. G. (Org.). **A encruzilhada socioambiental: biodiversidade, economia e sustentabilidade no cerrado** (p. 169-185). Goiânia, Editora UFG, 2008.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico, 2000. Disponível em: <<http://www.ibge.br>>. Acesso em: 15/04/2007.
- Machado, R. B.; Neto, M. B. R.; Pereira, P. G.; Caldas E. F.; Gonçalves D. A.; Santos N. S.; Tabor K.; Steininger, M. Estimativas de perda do cerrado brasileiro. Conservação Internacional. Brasília, 2004. Disponível em: <<http://www.conservation.org.br/arquivos/RelatDesmatamCerrado.pdf>>. Acesso em:10/02/2007.
- Margules, C.R.; Pressey, R. L. Systematic conservation planning. **Nature**, n. 405, p. 243-253, 2000.
- Margules, C.R.; Pressey, R. L., Williams, P. H. Representing biodiversity: data and procedures for identifying priority areas for conservation. **J. Bioscience**, n. 27(Suppl. 2), p. 309-326, 2002.
- Miziara, F.; Ferreira, N. C. *Expansão* da fronteira agrícola e evolução da ocupação e uso do espaço no estado de Goiás: subsídios à política ambiental. In: Ferreira, L. G. (Org.). **A encruzilhada socioambiental: biodiversidade, economia e sustentabilidade no cerrado** (p. 107-125). Goiânia, Editora UFG, 223p, 2008.
- Myers, N.; Mittermeier, R. A.; Mittermeier, C. G.; Fonseca, G. A. B.; Kent, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, n. 403, p. 853-858, 2000.
- Sano, E. E.; Rosa, R.; Brito J. L.; Ferreira, L. G. Mapeamento semidetalhado (escala de 1:250.000) da cobertura vegetal antrópica do bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 43 (1), p. 153-156, 2008.