

# IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE E PAISAGENS NO ESTADO DE GOIÁS: MÉTODOS E CENÁRIOS NO CONTEXTO DA BACIA HIDROGRÁFICA

*Identification of Priority Areas for Biodiversity and Landscape Conservation in the State of Goiás: Methods and Scenarios Within the Watershed Context*

**Maria Socorro Duarte da Silva Couto<sup>1,2</sup>**  
**Laerte Guimarães Ferreira<sup>2</sup>**  
**Bryon Richard Hall<sup>3</sup>**  
**Geci José Pereira da Silva<sup>3</sup>**  
**Fanuel Nogueira Garcia<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>**Universidade Federal de Goiás – UFG**  
**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  
fanuel@geografia.grad.ufg.br

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

## RESUMO

Neste artigo, apresentamos uma nova proposta de seleção de áreas prioritárias para conservação, a qual considera tanto a qualidade e viabilidade ecológica das áreas de vegetação remanescente do Cerrado goiano, a partir do uso de dados e critérios ambientais no âmbito da paisagem, quanto a praticidade e a legalidade do uso de bacias hidrográficas para gestão. Esta proposta, baseada em um modelo matemático não-linear, permite variar parâmetros de acordo com os interesses sócio-econômicos e ambientais, gerando distintas soluções e cenários. Entre estas soluções, destacamos, para o conjunto de 1511 bacias hidrográficas maiores que 9.500 ha consideradas neste estudo, uma solução ótima, a qual prioriza as áreas de vegetação remanescente com elevada porcentagem de ambientes ripários, valorizando a vizinhança e a conectividade entre elas. Em particular, esta solução coincide com a existência 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. Da mesma forma, esta solução também corrobora para a implantação de novos corredores, voltados, entre outros, à conexão da região noroeste com a região nordeste. A nossa expectativa é de que este modelo possa contribuir tanto para valorização das áreas de vegetação remanescente em propostas de conservação, quanto para otimizar a restauração de áreas degradadas, auxiliando, entre outros, no desenho de novos arranjos espaciais, ecologicamente mais sustentáveis, das áreas de pastagens e agricultura.

**Palavras-chave:** Áreas Prioritárias, Conservação no Bioma Cerrado, Planejamento Sistemático da Conservação.

## ABSTRACT

In this paper, we present a new approach 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. This proposal, based on a non-linear mathematical model, allows the parameters to vary according to the social-economical and environmental interests, thus generating distinct solutions and scenarios. Among the possible outcomes, we highlight, for a set of 1,511 watersheds larger than 9,500 ha considered in this study, as an “optimum” solution, the one with a large number of remnant vegetation fragments within riparian environments, which serves the purpose of strengthening spatial connectivity and natural corridors. In particular, this solution coincides with large natural corridors, such as, in the Northeastern region, the Paranã-Pirineus, and, in the Southeastern region, the corridor encompassing the Emas National Park and the headwaters of the Araguaia River. Likewise, this solution also corroborates with the implementation of new corridors, targeting, among others, the connection between the Northeastern and Northwestern regions. Our expectation is that the model herein presented can contribute to both the maintenance of remnant vegetation within the scope of conservation proposals, as well as to optimize the restoration of degraded areas, supporting the establishment of new spatial patterns, ecologically more sustainable, of the agricultural areas.

**Keywords:** Priority Areas, Conservation in the Cerrado Biome, Systematic Conservation Planning.

### 1. INTRODUÇÃO

A preocupação com a criação de áreas de conservação é uma temática que remonta à criação do primeiro parque no mundo, em 1872, o Parque Nacional de *Yellowstone*, nos Estados Unidos da América. Este parque foi criado por possuir grande beleza cênica, o que corrobora a utilização de critérios subjetivos para o estabelecimento de áreas de preservação. Em geral, estes critérios valorizam o conceito de belo e a disponibilidade de áreas devolutas ou de baixo valor econômico, com vistas ao entretenimento e fins turísticos. Em menor grau, em função da pressão de grupos de interesse, também são consideradas áreas com potencial científico, proteção de recursos hídricos e a proteção de espécies raras e ameaçadas (FRANKLIN, 1993; GOTMAR e KNILSSON, 1992; HUNTER e YONZON, 1993; POSSINGHAM et al., 2000).

A opção por uma abordagem subjetiva leva à constituição de um sistema de unidades de conservação com baixa eficiência e com pouca representatividade dos padrões e dos processos da biodiversidade regional, pois super-valoriza alguns componentes em detrimento à, por exemplo, espécies, *habitats*, paisagens e processos ecológicos (SCARAMUZZA et al., 2008). Argumenta-se também que a seleção dessas áreas ocorre de maneira oportunista (PRESSEY et al., 1993) e sem a definição prévia de objetivos claros (PRESSEY, 1994).

Assim, torna-se cada vez mais necessário a adoção de critérios objetivos, os quais favoreçam a priorização mais 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). Em busca destes critérios, Margules e Pressey (2000) elaboraram uma abordagem sistemática dividida em seis passos:

1. mensuração e mapeamento da biodiversidade;

2. identificação dos objetivos de conservação da região;
3. revisão das áreas de conservação existentes;
4. seleção de áreas de conservação adicionais;
5. implementação das atividades de conservação;
6. manejo e monitoramentos das reservas.

Esta abordagem é relevante por identificar configurações de áreas complementares de forma explícita, objetiva e geralmente quantitativa (PRESSEY et al., 2007).

Neste sentido, pôde-se definir o problema de seleção de áreas prioritárias para conservação como sendo um problema de otimização, cujo objetivo é proteger todos os alvos de conservação com o menor custo/área possível (medido, na maioria das vezes, como o número mínimo de áreas; LAWLER et al., 2003). Atualmente, a seleção de áreas tem sido feita utilizando-se algoritmos baseados no conceito de complementaridade (ARAÚJO e WILLIAMS, 2000; HOWARD et al., 1998), o qual mede o quanto uma área é diferente de outras em termos de composição de espécies (CSUTI et al., 1997; MARGULES e PRESSEY, 2000), bem como a sua importância para a representação de espécies não consideradas anteriormente (PRESSEY et al., 1993). De fato, esta abordagem sistemática considera não apenas uma área, onde eventualmente seria alocada uma unidade de conservação, mas a combinação entre diversas áreas, visando assegurar um conjunto representativo de reservas (BENSUSAN, 2006). Como exemplos desta abordagem, destacam-se o parque *New South Wales* na Grã-Bretanha, o parque *Papua* na Nova Guiné e o parque *Cape Floristic Region* na África do Sul (MARGULES et al., 2002).

No Brasil, o estabelecimento das primeiras unidades de conservação em seus diferentes biomas, em particular, os parques nacionais, obedeceu a uma abordagem subjetiva. Somente mais tarde, critérios supostamente mais técnicos foram adotados. A criação

do primeiro parque brasileiro, o Parque Nacional de Itatiaia, em 1937, representou a materialização de longos anos de debates e mobilizações que só efetivaram-se após a introdução da figura da unidade de conservação na legislação brasileira pelo antigo Código Florestal (Decreto nº 23.793, 1934). Este código foi posteriormente aperfeiçoado com a criação do novo Código Florestal (Lei nº 4771, 1965) (MEDEIROS, 2003).

Porém, somente a partir da Constituição Federal de 1988, o Brasil concebeu um Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), cujo processo de elaboração e negociação durou mais de 10 anos e gerou uma grande polêmica entre os ambientalistas. A partir do SNUC, que definiu critérios mais objetivos para a criação e gestão de áreas protegidas, ocorreu o reconhecimento de áreas prioritárias em vários momentos e instâncias: na Amazônia, em 1990, na Mata Atlântica do Nordeste, em 1993, e no âmbito do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira (PROBIO) entre 1998 e 2000. Conforme as sugestões do PROBIO, a partir de 2001, o governo federal começa a criar novas unidades de conservação, dentre as quais se destacam a Estação Ecológica da Serra Geral, no Estado do Tocantins e parte da Bahia, com aproximadamente 716 mil hectares, e o Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba, a maior unidade de proteção integral do Cerrado e também a maior área extra-amazônica, com aproximadamente 733 mil hectares distribuídos entre Bahia, Maranhão, Tocantins e Piauí (AGUIAR e CAMARGO, 2004; BENSUSAN, 2006; SANO et al., 2008a).

Apesar destas iniciativas, o número de unidades de conservação no país é ainda muito aquém do necessário, segundo provisões da Convenção sobre Diversidade Biológica, da qual o Brasil é signatário (MMA, 2006; SANO et al., 2008a). No bioma Cerrado, por exemplo, com aproximadamente 47 % de sua área convertidos em pastagens cultivadas e agricultura (SANO et al., 2008b; MIZIARA e FERREIRA, 2008), existem apenas 82 unidades de conservação integral do bioma Cerrado, que equivalem a menos de 3% de sua área total.

Especificamente em relação a Goiás, o único estado brasileiro integralmente inserido na região *core* do bioma Cerrado, o percentual de unidades de conservação é ainda mais reduzido, com aproximadamente 0,9% e 3,5% de sua área destinados às unidades de conservação integral e unidades de uso sustentável, respectivamente.

Com o intuito de aumentar este percentual, foi realizado o Projeto de Identificação de Áreas Prioritárias para Conservação da Biodiversidade (PDIAP) (NOVAES et al., 2003; SCARAMUZZA et al., 2008), pioneiro no Brasil em uso de técnicas de planejamento sistemático e sistemas de suporte à decisão com vistas à proteção de diferentes objetos de conservação (i.e. espécies, habitats, paisagens e processos ecológicos). No âmbito do PDIAP, que teve por base uma malha formada por 3666 hexágonos de

10.000 ha, foi possível a identificação de 40 áreas prioritárias (figura 1), compreendendo uma área total de 82.297 km<sup>2</sup>, das quais aproximadamente 36.296 km<sup>2</sup> são constituídas de vegetação remanescente (LOBO e FERREIRA, 2008; SCARAMUZZA et al., 2008).

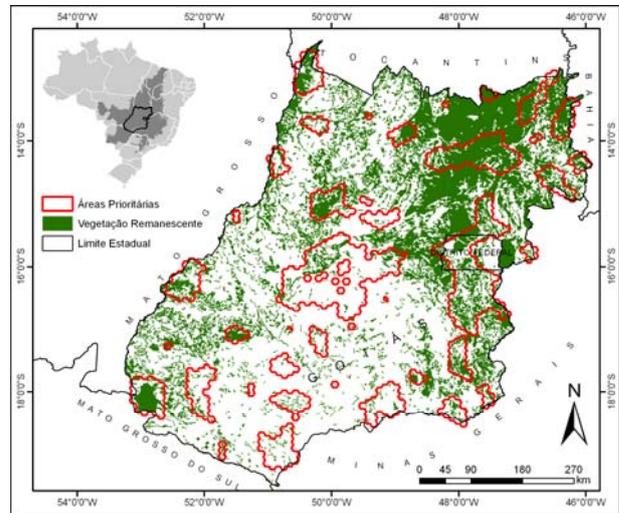


Fig. 1 - Mapa de distribuição da vegetação remanescente e localização das 40 áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade em Goiás.

Fonte: Scaramuzza et al. (2008).

Apesar de seu caráter pioneiro e rigor técnico-científico, o uso de métodos de programação linear não permitiu a incorporação de critérios potencialmente úteis à tomada de decisão como, por exemplo, em relação à distância e a conectividade entre os remanescentes, aos processos ecológicos e à fragmentação do *habitat*, os quais são baseados nos princípios da dinâmica e de outros processos não-lineares (CABEZA, 2003; EISWERH e HANEY, 2001). Outra limitação dos métodos de programação linear diz respeito à definição da função-objetivo do modelo, a qual não permite fazer uma análise de sensibilidade a partir da variação dos parâmetros dos objetos de conservação, de tal forma a encontrar soluções alternativas, por meio da geração de vários cenários. Assim, neste trabalho, apresentamos uma nova proposta para identificação de áreas prioritárias para conservação da biodiversidade, baseada na modelagem de interações não-lineares (i.e. programação não-linear), uso da bacia hidrográfica como unidade de análise e valoração da conectividade entre diferentes áreas prioritárias, com vistas à formação de mosaicos e/ou corredores que maximizem o potencial de conservação.

## 2. DESENHO EXPERIMENTAL: DADOS E METODOLOGIA

Este trabalho tem como área de estudo o Estado de Goiás, marcado por intensa ocupação antrópica. Mapeamento recente, no âmbito do PDIAP indica, de forma bastante precisa, que 26,5% e 10,5% da cobertura vegetal nativa já foram convertidas em

pastagens cultivadas e áreas agrícolas, respectivamente (SANO et al., 2008b).

No âmbito das bacias hidrográficas, o cenário é igualmente preocupante. Em fato, aproximadamente 50% das bacias hidrográficas com área superior a 9.500 hectares apresentam menos que 30% de cobertura vegetal remanescente, i.e. inferior ao estimado por Bonnet et al. (2006) para atender aos requerimentos do Código Florestal. Portanto, um indicador ambiental

importante considerado neste estudo é a porcentagem de vegetação remanescente dentro de cada bacia.

Assim, o modelo de seleção de áreas prioritárias para conservação no Estado de Goiás proposto tem como unidade de aplicação a bacia hidrográfica. Especificamente para este trabalho, utiliza-se 1511 bacias hidrográficas com área mínima de 9.500 hectares (figura 2).

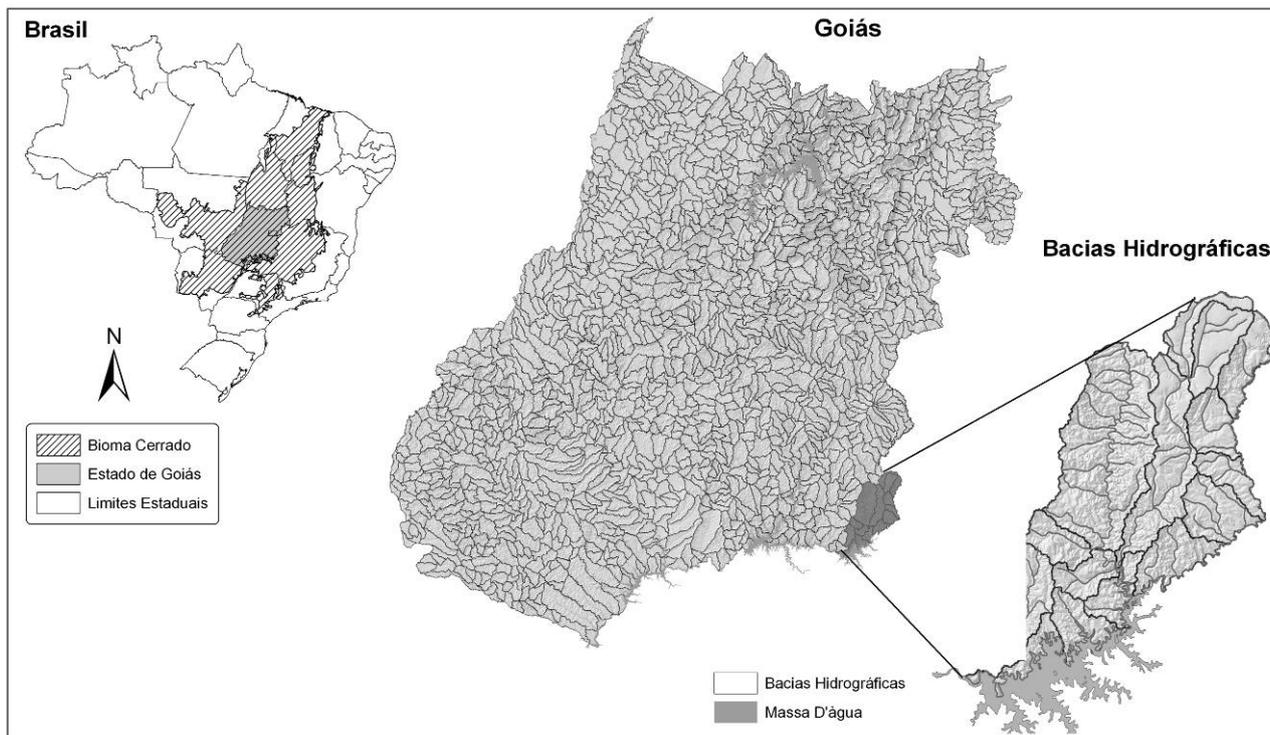


Fig. 2 - Localização do bioma Cerrado e estado de Goiás, o qual foi subdividido em 1511 bacias hidrográficas com área mínima de 9.500 ha.

A área mínima da bacia de 9.500 ha foi escolhida por três motivos. Primeiro, por ser uma área compatível com a área de vida de algumas espécies de mamíferos ameaçados de extinção no Cerrado brasileiro (RODRIGUES, 2002). Segundo, por haver uma grande concentração de bacias entre 9.500 e 10.000 ha. Em terceiro lugar, por ser uma área que oferece facilidades e viabilidades de gerenciamento sob o aspecto governamental (BERTRAND, 2004; BONNET et al., 2008). Quanto as bacias hidrográficas geradas com área menor que 9.500 ha, estas foram acopladas às suas respectivas bacias de nível superior.

A subdivisão do Estado de Goiás (e Distrito Federal) em bacias hidrográficas (figura 2) foi obtida a partir de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), por meio do *download* de 72 imagens geradas em 2000, com *tile* de 1 grau geográfico e resolução espacial de 91,63 m. Através destas imagens foram gerados os limites das bacias hidrográficas e indicados seus cursos d'água componentes, bem como delimitados os ambientes ripários (*buffers* de 100 m em torno das linhas de drenagem) (BONNET, 2006; MEDEIROS, et al., 2008).

O conjunto de dados primários (cartográficos, temáticos, censitários, orbitais e biológicos), os procedimentos e os dados derivados (produtos) envolvidos, neste trabalho, são detalhados através do diagrama da figura 3.

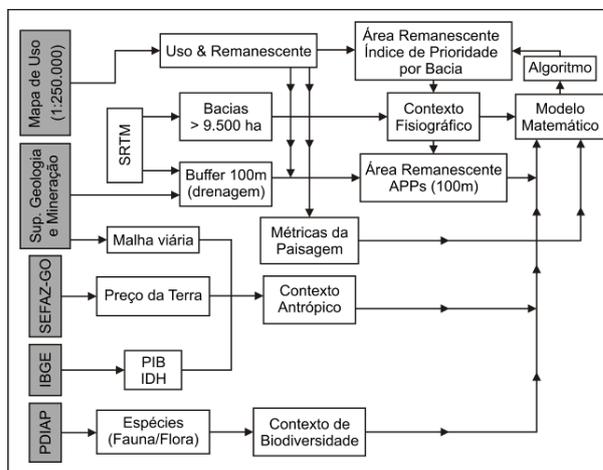


Fig. 3 - Conjunto de dados primários e procedimentos metodológicos aplicados à área de estudo para identificação de áreas prioritárias.

Os dados cartográficos e temáticos incluíram os limites geográficos, o mapa rodoviário e o mapa de cobertura e uso da terra para o Estado de Goiás (SANO et al., 2008b), obtido à escala de 1:250.000, a partir da interpretação de imagens Landsat ETM<sup>+</sup> (2001 e 2002) e levantamentos em campo.

Quanto à variável ambiental “ambientes ripários” (*buffer* de 100 m), esta se constitui em importantes corredores ecológicos, os quais favorecem a fluidez dos fluxos genéticos entre os seres vivos dos *habitats* fragmentados, bem como fonte de alimentos para a fauna aquática e avifauna, propiciando, igualmente, a conservação da biodiversidade. No Estado de Goiás, aproximadamente 24.000 km<sup>2</sup> de ambientes ripários encontram-se desprotegidos, com implicação direta na qualidade dos recursos hídricos (BONNET et al., 2007). Isto ocorre, principalmente, nas bacias onde há o maior número e/ou menor tamanho de fragmentos remanescentes (ex. Micro-região Sudoeste). Tendo em vista a escala do mapa de cobertura e uso da terra usado neste trabalho (i.e. 1:250.000) foram considerados nas análises do modelo matemático, apenas os fragmentos remanescentes com área mínima de 1.000 ha dentro da bacia.

Em relação ao preço da terra, um importante indicador de pressão antrópica (MIZIARA e FERREIRA, 2008; PIRES, 2000), utilizou-se um conjunto de dados dividido em 5 categorias de preços: *Cerrado Agrícola* (198 amostras), *Terra Agrícola de Alta Produtividade de Grãos* – (161 amostras), *Terra Agrícola de Baixa Produtividade de Grãos* (158 amostras), *Pastagem Formada de Alto Suporte* (219 amostras) e *Pastagem Formada de Baixo Suporte* (210 amostras). Estas informações, correspondentes ao ano de 2006, foram cedidas pela Secretaria da Fazenda do Estado de Goiás (SEFAZ) e encontram-se disponíveis em <<http://www.sefaz.go.gov.br>> (FERREIRA, M. et al., 2008).

Especificamente neste estudo, o indicador de pressão antrópica “preço da terra” é definido como sendo a média proporcional do valor do hectare do preço da terra dos municípios envolvidos, no âmbito de cada bacia, conforme a média proporcional do valor do hectare das cinco categorias de preço da terra obtidas, a partir das amostras de cada município ( $p_l$ ) ( $l = 1, 2, \dots, 247$ , i.e. 246 municípios e o Distrito Federal), segundo a fórmula:

$$p_l = CA_l \times R_l + \text{Média}(AA_l, AB_l, PA_l, PB_l) \times (1 - R_l) \quad (1)$$

onde,

$CA_l$  = Cerrado Agrícola;

$R_l$  = Porcentagem de área Remanescente;

$AA_l$  = Terra Agrícola de Alta Produtividade de Grãos;

$AB_l$  = Terra Agrícola de Baixa Produtividade de Grãos;

$PA_l$  = Pastagem Formada de Alto Suporte;

$PB_l$  = Pastagem Formada de Baixo Suporte.

O preço da terra é normalizado pela seguinte

fórmula: 
$$p_N = \frac{p_l - p_m}{p_M - p_m} \quad (2)$$

onde  $p_m$  é o valor mínimo de  $p_l$  e  $p_M$  é o valor máximo de  $p_l$ .

O padrão espacial da distribuição do valor da terra normalizado (ver equações 1 e 2), conforme as 1511 bacias hidrográficas, é mostrado na figura 4.

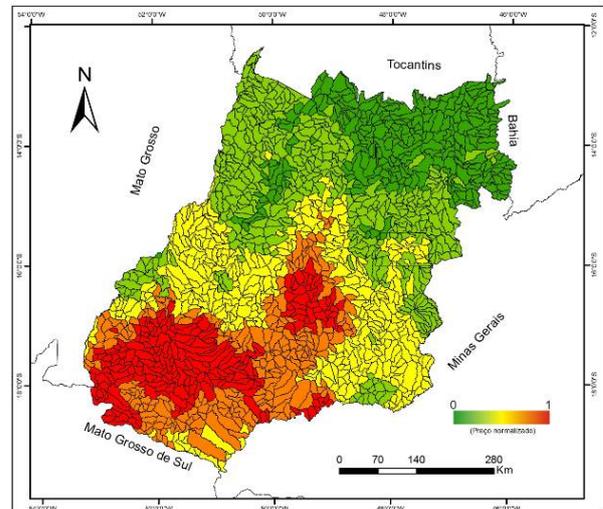


Fig. 4 - Distribuição do preço da terra (valores normalizados) no Estado de Goiás, conforme bacias hidrográficas maiores que 9.500 ha.

As rodovias federais e estaduais constituem outro indicador ambiental de pressão antrópica, haja vista estarem diretamente relacionadas ao grau de antropismo (figura 5). Observa-se, em geral, que as bacias com pouca vegetação remanescente e mais fragmentadas possuem uma malha viária bem mais estruturada para o escoamento da produção agrícola, além de estarem mais próximas dos centros urbanos (BLEYER et al., 2008).

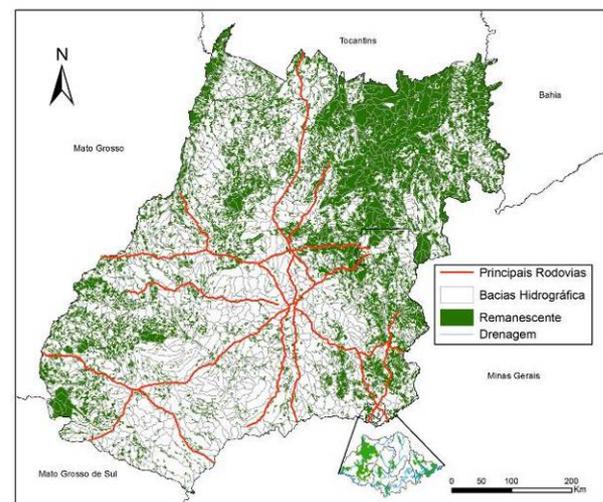


Fig. 5 - Distribuição espacial da vegetação remanescente (conforme bacias hidrográficas maiores que 9.500 ha) e das principais rodovias federais e estaduais.

Quanto aos valores de PIB e IDH dos municípios goianos, também importantes indicadores ambientais de pressão antrópica, foram utilizados aqueles disponibilizados através do Atlas de Desenvolvimento Humano (IBGE, 2000; IPEA, 2007), os quais foram interceptados para as bacias hidrográficas. Nas bacias com mais de um valor para o PIB e IDH, foi calculado um valor médio. No caso de bacias desprovidas destes valores, designou-se um valor médio geral do PIB e do IDH. Neste estudo, o PIB e o IDH apresentam maiores valores nas bacias que possuem intensa produção agropecuária e os maiores centros urbanos, localizadas principalmente no Centro e Sul do Estado de Goiás, onde há um maior déficit de cobertura vegetal nativa, conforme se pode averiguar na figura 5.

Por outro lado, as bacias com maior proporção de remanescentes de Cerrado, onde predominam a pecuária extensiva e atividades extrativistas (i.e. mineração e produção de carvão vegetal), apresentam menores valores de PIB e IDH. Assim, de certa forma, o PIB e o IDH estão diretamente relacionados com as bacias que possuem elevada antropização (BLEYER et al., 2008).

Em relação à biodiversidade, os dados de espécies (fauna e flora) utilizados neste trabalho são dados pontuais, provenientes da compilação e organização de bases de dados sobre biodiversidade realizada no âmbito do PDIAP (FERREIRA, A. et al., 2008), e de registros do banco de dados "Conservation International Species Database" (CISD), referentes à 2004.

Estes dados foram espacializados e cruzados com as áreas nativas remanescentes e as unidades de planejamento (bacias hidrográficas). A partir deste cruzamento, foram gerados seis vetores, cada um representando uma categoria de espécies (Aves, Mamíferos, Anuros/Répteis, Peixes, Insetos e Flora). Assim, para cada categoria, a sua presença na bacia indica que ela se encontra numa área de vegetação remanescente. Por sua vez, a presença destas categorias na bacia resulta em um peso maior de insubstituibilidade, comparativamente às bacias que consideram apenas dados ambientais, aumentando, assim, a probabilidade desta bacia ser necessária na rede de reservas.

Para fins de processamento, a área de estudo (Estado de Goiás e Distrito Federal) foi dividida, primeiramente, em três grandes regiões hídricas, conforme as Ottobacias de Nível Dois da Agência Nacional de Águas (ANA) (ANA, 2006), que fazem parte da Bacia do Araguaia-Tocantins, Bacia do Paraná e Bacia do São Francisco. Por sua vez, estas foram divididas em mais duas, totalizando seis regiões de análise. Esta divisão foi motivada pela necessidade de se obter áreas prioritárias para conservação em várias localidades do Estado, em particular, para aquelas bastante degradadas.

Depois de encontrada a solução para cada uma das seis regiões, tanto ao nível de importância de

remanescente, quanto ao nível de importância de bacia, obteve-se um mapa que representa a solução integrada para todo o Estado, priorizando igualmente todas as regiões de análise.

### 3. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E ALGORITMO

O modelo de programação não-linear (PNL) desenvolvido neste estudo busca um conjunto de bacias hidrográficas com índice de importância  $B(l) \in [0, 1]$ , o qual indica a necessidade 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 prioridade de inclusão de uma bacia  $l$  está associada à qualidade ou importância de inserção de seus fragmentos de vegetação remanescentes (ou simplesmente fragmentos remanescentes) na proposta de conservação. Desta forma, associa-se à cada fragmento de remanescente  $i$  um parâmetro de qualidade/importância  $\alpha(i) \in [0, 1]$ , cujo valor varia de acordo com um conjunto de indicadores/dados ambientais e dados de espécies.

A solução deste problema consiste, a priori, do processo de escolher o nó de dígrafo (BANG-JENSEN e GUTIN, 2001), que corresponde ao centróide de cada fragmento remanescente  $i$  dentro da bacia, e associar a ele um valor  $\alpha(i) \in [0, 1]$ , atribuindo-lhe um valor de importância relativa ao objetivo de conservação.

Cada nó do dígrafo está associado a uma matriz que contém as seguintes informações a respeito do fragmento de remanescente associado:

$nf$  - identificação do fragmento remanescente;

$nb$  - identificação da bacia;

$a_i$  - área do fragmento remanescente  $i$ ;

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

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

$P_i$  - preço da terra correspondente ao município que contém o fragmento  $i$ ;

$Q_i$  - PIB correspondente ao município que contém o fragmento  $i$ ;

$I_i$  - IDH correspondente ao município que contém o fragmento  $i$ ;

$p/a_i$  - razão entre o perímetro e a área do fragmento remanescente  $i$ ;

$r_i$  - índice de interseção (0,  $\frac{1}{2}$  ou 1) do fragmento remanescente  $i$  com a rodovia;

$R$  - sub-região hídrica a qual pertence o fragmento remanescente. Define-se como sendo uma sub-região hídrica um conjunto de bacias que tem em comum uma linha de drenagem principal;

$d_i$  - distância de saída da sub-região hídrica, isto é, o número de fragmentos remanescentes que estão rio abaixo do fragmento  $i$  até o ponto final da linha de drenagem. Esta variável está relacionada com a posição do remanescentes dentro da sub-região que o contém;

$m_i$  - identificação do fragmento remanescente  $i$  mais próximo rio abaixo;

$g(i)$  - conta o número de fragmentos remanescentes dentro da mesma sub-região hídrica.

$M_i$  - identificação do fragmento remanescente  $i$  mais próximo rio acima;

$\alpha(i)$  - 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. Esta variável reflete a importância da vizinhança na solução do problema, o que favorece a conectividade entre os fragmentos remanescentes.

$K$  - indica o valor absoluto do produto entre um peso e a área de vegetação remanescente.

Deseja-se minimizar uma função não-linear de variáveis  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $P_i$ ,  $Q_i$ ,  $I_i$ ,  $p/a_i$ ,  $r_i$ ,  $d_i$ ,  $e_i$ ,  $\alpha(i)$  e  $\beta(i)$  e de parâmetros de peso  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$ ,  $c_5$ ,  $c_6$ ,  $c_7$ ,  $c_8$ ,  $c_9$ , e  $c_{10}$ .

Estes parâmetros poderão ser alterados para atribuir importância maior ou menor aos diversos fatores envolvidos na função-objetivo.

Portanto, propõe-se o seguinte modelo de PNL:

$$\text{Min} \sum \left[ - \left( \frac{c_1}{P_i} + \frac{c_2}{Q_i} + \frac{c_3}{I_i} \right) \cdot (1 - \alpha(i))a_i - c_4(1 - \alpha(i))b_i + i + c_5 \cdot \left( \frac{P_i}{a_i} \right) - c_6 \cdot \beta(i) + c_7 \cdot r_i - c_8 \cdot d_i + \left( \frac{c_9 b_i^T D b_i}{g^2(i) - g(i)} \right) - c_{10} \cdot e_i \right] \quad (3)$$

$$\text{s.a.} \sum \alpha(i) \cdot a_i \geq K$$

A função-objetivo do modelo (3) minimiza as variáveis: preço de terra, PIB, IDH, interseção com rodovia, razão do perímetro/área e a distância entre as áreas a serem preservadas; ao mesmo tempo, maximiza as variáveis: área de *buffer* e de remanescente e a distância de saída da sub-região.

A princípio, o algoritmo determina a solução em termos do índice de importância da inclusão dos fragmentos remanescentes em proposta de conservação. Depois, obtém-se também a solução em termos de bacia. Para isto, basta fazer o quociente entre o produto da soma dos  $\alpha(i)$  com as respectivas áreas de seus fragmentos remanescentes e a soma das áreas de seus fragmentos remanescentes dentro de cada bacia.

A título de demonstração, as figuras 6 e 7 ilustram a aplicação do algoritmo às 12 bacias hidrográficas pertencentes à Região Noroeste do Estado de Goiás. Estas bacias são constituídas por 19 conjuntos conexos de vegetação remanescentes, que são divididos em 35 fragmentos de vegetação remanescente com área maior ou igual a 1.000 ha.

Na figura 7, o índice de importância de inclusão das bacias hidrográficas é um valor contínuo, variando de 0 a 1, o qual pode ser dividido em intervalos iguais, conforme distintos níveis de

importância. Neste exemplo, a solução apresenta três bacias de alta importância na proposta de conservação, que são as bacias de número 758, 767 e 796.

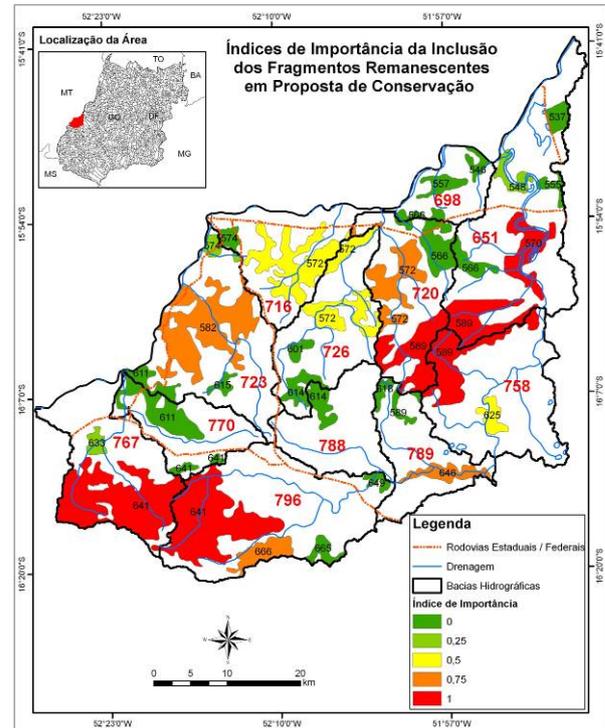


Fig. 6 - Mapa dos índices de importância da inclusão dos fragmentos remanescentes em proposta de conservação.

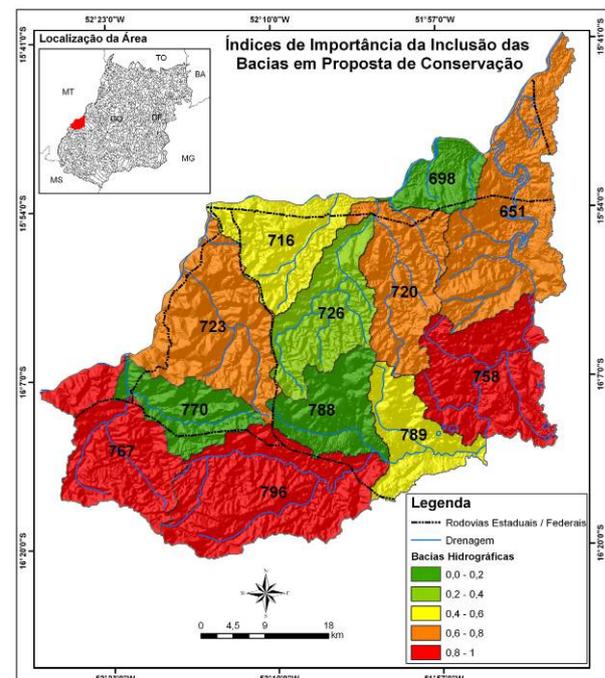


Fig. 7 - Mapa dos índices de importância da inclusão das bacias hidrográficas em proposta de conservação.

#### 4. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

O uso de métodos e técnicas de planejamento sistemático para a seleção de áreas prioritárias para conservação é bastante recente e ainda bastante restrito ao uso de modelos matemáticos de programação linear, definição de objeto de conservação (ex. paisagem e espécies), forte enfoque na distribuição potencial da biodiversidade e unidades de aplicação imaginárias (ex. células hexagonais).

Buscando contribuir com a ecologia da conservação, bem como com a efetiva gestão territorial e ambiental do Estado de Goiás, este trabalho se desenvolve em torno de novas abordagens, conceituais e de dados, entre as quais destacamos:

1. Uso de um modelo de Programação Não-Linear e Teoria de Grafos;

2. Uso de uma abordagem não-determinística;
3. Uso de uma unidade de análise natural, coerente com os aspectos fisiográficos da paisagem;
4. Valorização dos ambientes ripários;
5. Hierarquização de remanescentes e bacias hidrográficas.

Entre as várias soluções encontradas, definimos como sendo uma solução ótima aquela com elevado índice de ambientes ripários e de vegetação remanescente, e que valoriza a vizinhança e a conectividade entre as áreas remanescente, ao mesmo tempo que minimiza os efeitos das variáveis antrópicas sobre a conservação destas áreas. Em termos da equação 3, esta solução corresponde à atribuição de valores 60 e 3000 para os parâmetros  $c_4$  e  $c_6$ , respectivamente (figura 8).

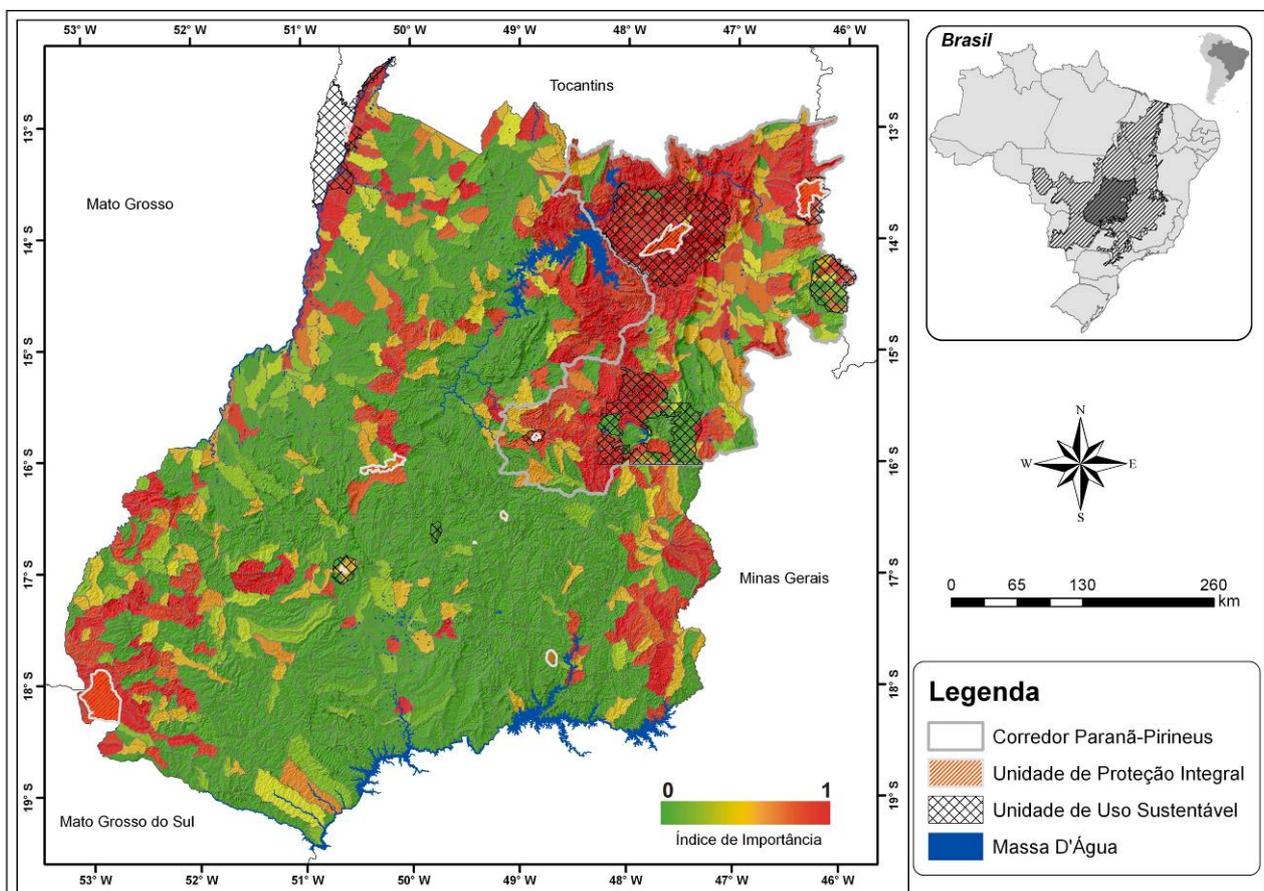


Fig. 8 - Solução Ótima e respectivos níveis de importância das bacias com dados de biodiversidade.

Esta solução coincide com a existência 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. Da mesma forma, esta solução sugere a implantação de novos corredores, voltados, entre outros, à conexão da região noroeste com a região nordeste, e ao adensamento das unidades de proteção existentes, uma vez que a maioria destas unidades, tanto de conservação integral, quanto de uso

sustentável, correspondem às áreas de maior nível de importância identificadas (figura 8).

É interessante destacar que nesta solução, a maioria das bacias com alto nível de importância, em geral localizadas fora de unidades de conservação, coincide com as áreas prioritárias definidas por Scaramuzza et al. (2008), haja vista a prevalência de grandes áreas de vegetação remanescente e pouco fragmentadas no nordeste Goiano. Por outro lado, as bacias com menores índices de importâncias estão localizadas nas regiões central e sudoeste do Estado,

onde o elevado preço da terra e malha viária mais bem estruturada contribuem de forma decisiva na solução.

Ao anexar a não-linearidade na estrutura do problema, foi possível obter um modelo matemático de seleção de áreas prioritárias para o Estado de Goiás capaz de determinar, através da variação dos parâmetros, diferentes tipos de cenários, ou seja, soluções mais viáveis dentro dos critérios ecológicos, econômicos e políticos envolvidos.

Em fato, o modelo matemático proposto pode contribuir tanto para valorização das áreas de vegetação remanescente, quanto para otimizar a restauração de áreas degradadas, principalmente ao longo de ambientes ripários. Ressalta-se que, além dos aspectos legais (ex. reserva legal de 20%), o potencial de conservação de pequenos fragmentos, em particular em áreas altamente antropizadas e fragmentadas, a exemplo da Região Sudeste do Estado, não pode ser desprezado (Carvalho et al., 2009). Os dois enfoques de aplicação do modelo matemático não são mutuamente excludentes. Pelo contrário, podem ser complementares. Assim, a nossa expectativa é de que este modelo, com os ajustes e aprimoramentos necessários, possa auxiliar no desenho de novos arranjos espaciais, ecologicamente mais sustentáveis, das áreas de pastagens e agricultura, bem como definir prioridades quanto à restauração de áreas degradadas no Estado de Goiás.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho, desenvolvido no âmbito do Programa Multidisciplinar de Doutorado em Ciências Ambientais da Universidade Federal de Goiás (CIAMB / UFG), se insere entre as várias iniciativas do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG / UFG) voltadas ao monitoramento sistemático e gestão territorial do bioma Cerrado. O segundo autor é bolsista de Produtividade em Pesquisa (1C) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, L. M. S.; CAMARGO, A. J. A. (Orgs.) **Cerrado: ecologia e caracterização**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.

ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil). **Topologia hídrica: método de construção e modelagem da base hidrográfica para suporte à gestão de recursos hídricos**. Versão 1.11. / Agência Nacional de Águas, Superintendência de Gestão da Informação. Brasília, 2006.

ARAÚJO, M. B.; WILLIAMS, P. H. **Selecting areas for species persistence using occurrence data**. *Biological Conservation* 96: 331-345, 2000.

ARPONEN, A.; HEIKKINEN, R. K.; THOMAS, C. D.; MOILANEM, A. **The Value of Biodiversity in Reserve Selection: Representation, Species Weighting, and Benefit Functions**. *Conservation Biology* 19: 2009-2014, 2005.

BANG-JENSEN, J.; GUTIN, G. **Digraphs: Theory, Algorithms and Applications**. Springer – Verlag, London, 2001.

BENSUSAN, N. **Conservação da biodiversidade em áreas protegidas**. Reimpressão – Rio de Janeiro: Editora FGV, 2006.

BERTRAND, G. **Paisagem e geografia física global: Esboço metodológico**. (Trad.: Olga Cruz). Trabalho publicado, originalmente, na “Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest”, Toulouse, v. 39 n. 3 (249-272), 1968, sob título: Paysage et géographie physique globale. *Revista RA'E GA - O espaço geográfico em análise*, n. 8 (141-152), 2004.

BLEYER, N.; FERREIRA, L. G.; FERREIRA, N. C. **Arranjo Espacial de Indicadores Socioeconômicos e Dados Ambientais para os Municípios do Cerrado**. *Estudos Geográficos - Revista Eletrônica*, 2008. (Submetido).

BONNET, B. R. P.; FERREIRA JR., L. G.; LOBO, F. C. **Sistema de Reserva Legal Extra-Propriedade no Bioma Cerrado: uma análise preliminar no Contexto da bacia hidrográfica**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 58, n.2. p.129-137 (edição eletrônica), 2006.

BONNET, B. R. P.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA JR., L. G. **Ampliação de ambientes ripários como alternativa às Reservas Legais: conciliando política florestal e conservação dos recursos hídricos no bioma Cerrado**. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 27, n.1, p.83-96. Edição Especial, 2007.

BONNET, B. R. P., FERREIRA, L. G., LOBO, F. C. **Relações entre qualidade da água e uso do solo em Goiás: uma análise à escala da bacia hidrográfica**. *Árvore*, v. 32, n. 2 (311-322), 2008.

CABEZA, M. **Habitat loss and connectivity of reserve networks in probability approaches to reserve to reserve design**. *Ecology Letters* 6: 665-672, 2003.

CARVALHO, F.M.V.; DE MARCO, P.; FERREIRA Jr. L. G. **The Cerrado into-pieces: Habitat fragmentation as a function of landscape use in the savannas of central Brazil**. *Biological Conservation*, 142: 1392-1403, 2009.

CSUTI, B.; POLASKY, S.; WILLIAMS, P. H.; PRESSEY, R. L.; CAMM, J. D.; KERSHAW, M.; KIESTER, A. R.; DOWNS, B.; HAMILTON, R.;

- HUSO, M.; SAHR, K. **A comparison of reserve selection algorithms using data on terrestrial vertebrates in Oregon.** *Biological Conservation* 80: 83-97, 1997.
- EISWERTH, M. E.; HANEY, J. C. **Analysis – Maximizing conserved biodiversity:** Why ecosystem indicators and thresholds matter. *Ecological Economics* 38: 259-274, 2001.
- FERREIRA, M. E.; MIZIARA, F.; FERREIRA, L. G.; RIBEIRO, F. L.; FERREIRA, N. C. **Ativos Ambientais do Bioma Cerrado:** Uma Análise da Cobertura Vegetal Nativa e sua Relação com o Preço da Terra no Estado de Goiás. *Revista Brasileira de Cartografia*, 2008a.
- FERREIRA, A. A.; BASTOS, R. P.; FERREIRA, M. E. Estado-da-Arte sobre a Biodiversidade de Vertebrados em Goiás. In: FERREIRA Jr., L. G. (Org.). **A encruzilhada socioambiental:** biodiversidade, economia e sustentabilidade no cerrado (p. 67-89). Goiânia, Editora UFG, 2008b.
- FRANKLIN, J. F. **Preserving biodiversity:** species, ecosystems, or landscapes? *Ecological Applications* 3(2): 202-205, 1993.
- GOTMARK, F.; NILSSON, C. **Criteria used for protection of natural areas in Sweden 1909-1986.** *Conservation Biology* 6(2): 220-231, 1992.
- HOWARD, P. C.; VISKANIC, P.; DAVENPORT, T. R. B.; KIGENYI, F. W.; BALTZER, M.; DICKINSON, C. J.; LWANGA, J. S.; MATTHEWS, R. A.; BALMFORD, A. **Complementarity and the use of indicator groups for reserve selection in Uganda.** *Nature* 394: 472-475, 1998.
- HUNTER, M. L. Jr.; YONZON, P. **Altitudinal distributions of birds, mammals, people, forests, and parks in Nepal.** *Conservation Biology* 7(2): 420-423, 1993.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico, 2000.** Disponível: <<http://www.ibge.br>>. Acesso: 15/04/2007.
- IPEA. Instituto de Pesquisa Estatística Aplicada. IPEA – DATA. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/ipeaweb.dll/ipeadata>>. Acesso: 15/04/2007.
- LAWLER, J. J.; WHITE, D.; MASTER, L. L. **Integrating representation and vulnerability:** two approaches for prioritizing areas for conservation. *Ecological Applications*, 13: 1762-1772, 2003.
- LOBO, F.; FERREIRA, L. G. **Vegetação Remanescente nas Áreas Prioritárias para Conservação da Biodiversidade em Goiás:** Padrões de Distribuição e Características. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 28: 89-104, 2008.
- MARGULES, C.R.; PRESSEY, R. L. **Systematic conservation planning.** *Nature* 405: 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* 27(Suppl. 2): 309-326, 2002.
- MEDEIROS, R. **A Proteção da Natureza:** das Estratégias Internacionais e Nacionais às demandas Locais. Tese (Doutorado em Geografia). Rio de Janeiro: UFRJ/PPG, 2003.
- MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. **Avaliação de Modelos Digitais de Elevação para Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas.** *Revista Brasileira de Cartografia*, v.61:137-151, 2009.
- 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.
- MMA, Ministério do Meio Ambiente. **Programa Nacional de Conservação e Uso Sustentável do Bioma Cerrado:** Programa Cerrado Sustentável – 2006. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf/arquivos/programa\\_bioma\\_cerrado.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sbf/arquivos/programa_bioma_cerrado.pdf)>. Acesso: 05/11/2008.
- NOVAES, P.C., FERREIRA, L.G.; DIAS, R. **Identificação de áreas prioritárias para conservação da bio-geodiversidade no Estado de Goiás.** *Boletim Goiano de Geografia* 23 (1): 41-54, 2003.
- PIRES, M. O. **Programas agrícolas na ocupação do Cerrado.** *Sociedade e Cultura*, v. 3, n. 1-2 :111-131, 2000.
- POSSINGHAM, H.; BALL, I.; ANDELMAN, S. Mathematical methods for identifying representative reserve networks. In: FERSON, S., BURGMAN, M (Orgs.). **Quantitative methods for conservation biology.** Springer-Verlag, New York, p.291-306, 2000.
- PRESSEY, R. L. **Ad hoc reservations:** Forward or backward steps in developing representative reserves systems? *Conservation Biology* 8: 662-668, 1994.
- PRESSEY, R. L.; HUMPHRIES, C. J.; MARGULES, C. R.; VANE-WRIGHT, R. I.; WILLIAMS, P. H. **Beyond opportunism:** key principles for systematic reserve selection. *Trends in Ecology and Evolution*, 8: 124-128, 1993.

PRESSEY, R. L.; CABEZA, M.; WATTS, M. E.; COWLING, R. M.; WILSON, K. A. **Conservation planning in a changing world**. *Ecology and Evolution* 22 (11): 583– 592, 2007.

RODRIGUES, F. H. G. **Biologia e conservação do lobo-guará na Estação Ecológica de Águas Emendadas**. (Tese de Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (editores técnicos). **Cerrado: ecologia e flora**. Embrapa Cerrados. Brasília, DF. Embrapa Informação Tecnológica, v. 1, 2008a.

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*, 43 (1): 153-156, 2008b.

SCARAMUZZA, C. A. de M.; MACHADO, R. B.; RODRIGUES, S. T.; RAMOS NETO, M. B.; PINAGÉ, E. R.; DINIZ-FILHO, J. A. F. Áreas prioritárias para conservação da biodiversidade em Goiás. In: FERREIRA Jr., L. G. (Org.). **A encruzilhada socioambiental: biodiversidade, economia e sustentabilidade no cerrado** (p. 13-66). Goiânia, Editora UFG, 2008.