

CAPÍTULO 1

Fundamentação Teórica Matemática

A Programação Linear (PL) está relacionada à solução de um problema que representa a maximização ou minimização de uma função-objetivo sujeita a restrições, na qual todas as relações entre as variáveis são lineares, tanto nas restrições, como na função-objetivo (CHVÁTAL, 1983; HADLEY, 1982). O modelo matemático que descreve um problema geral de PL é dado como:

$$\begin{aligned} \text{O} \quad & z = \sum_{j=1}^N c_j l_j \quad \text{é a função-objetivo} \\ \text{S} \quad & \sum_{j=1}^N a_{ij} l_j \begin{cases} \geq, =, \leq \end{cases} r_i \quad l_j \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, M; \quad j = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (1.1)$$

Neste modelo temos que:

- a) l_j é a j -ésima variável;
- b) $A = \{a_{ij}\}$ é uma matriz de M restrições por N variáveis, onde a_{ij} é o coeficiente da j -ésima variável na i -ésima restrição;
- c) c_j é o coeficiente de margem de contribuição para a j -ésima variável;
- d) r_i é a limitação da i -ésima restrição;
- e) para cada restrição, um e somente um dos sinais $\{\geq, =, \leq\}$ ocorre. Contudo, este pode variar de uma restrição para outra.

As restrições lineares descrevem um polítopo linear (se ilimitado) ou poliedro (se limitado), que é sempre convexo.

Resolver um problema de PL (1.1) consiste em determinar uma solução possível e ótima. Teoricamente, o número de iterações poderia ser extremamente grande, pelo algoritmo ser de complexidade exponencial, requerendo um grande esforço computacional. Porém, isso pode ser evitado com o auxílio do método Simplex, um dos métodos mais utilizados para resolver problemas de PL, e que consiste, a partir de uma solução inicial (básica), gerar uma sequência de pontos cada vez mais próximos à solução ótima, normalmente obtida em um número relativamente pequeno de iterações (CHVÁTAL, 1983).

Atualmente, outros métodos de resolução, usando pontos interiores, têm sido bastante utilizados, os quais, por serem de complexidade polinomial, mostram-se mais eficientes que o Simplex para problemas de grande porte (KARMARKAR, 1984).

Um problema de PL, no qual se exige que uma ou mais variáveis de decisão assumam um valor inteiro na solução final é denominado Problema de Programação Linear Inteira (PLI). Isso significa que o conjunto de soluções possíveis para um problema de PLI é um subconjunto das soluções identificadas para o problema de PL correspondente.

Um caso particular de PLI refere-se ao problema que consiste em minimizar o número de áreas necessárias para representar, pelo menos, uma espécie de interesse, denominado problema de área mínima (CABEZA & MOILANEN, 2001; PRESSEY & TAFFS, 2001; WILLIAMS et al., 2004). Tem-se $l_j \in \{0,1\}$; isto significa que se for $l_j = 1$, indica que a área j está no sistema de reservas e $l_j = 0$, caso contrário. E o modelo matemático que descreve este problema é dado pela seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } Z &= \sum_{j=1}^N l_j \\ \text{Sujeito a : } \sum_{j=1}^N l_j &\geq 1; \quad l_j \in \{0,1\}; \quad i = \dots, 1, 2, \dots, M; \quad j = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \tag{1.2}$$

Para determinar a solução de problema PLI (1.2), foram desenvolvidas várias técnicas, dentre elas, o método de *Branch-and-Bound* (ou método Simplex com limites sobre as variáveis), que consiste na idéia de desenvolver uma enumeração inteligente dos pontos candidatos à solução ótima inteira de um problema, dividindo o conjunto de soluções viáveis em subconjuntos sem interseções entre si, calculando os limites superiores e inferiores para cada subconjunto e eliminando certos subconjuntos de acordo com regras preestabelecidas.

Apesar do algoritmo de *Branch-and-Bound* ser um método de PLI exato, que garante encontrar a melhor solução, ele requer um número de interações exponencialmente crescente, igual a 2^n (n número de restrições), em função do número de variáveis. Assim, sua aplicação em problemas com grande número de variáveis torna-se inviável.

Esta inviabilidade levou biólogos e ecólogos da conservação a usarem métodos heurísticos para a seleção de áreas prioritárias, os quais utilizam algoritmos que aplicam regras explícitas para identificar conjuntos de áreas (MARGULES & PRESSEY, 2000). O uso dessas ferramentas (e.g. algoritmos *greedy* e *simulated annealing*), baseadas no conceito de complementaridade (PRESSEY et al., 1993), está presente em vários trabalhos sobre seleção de áreas prioritárias (CABEZA & MOILANEN, 2001; WILLIAMS et al., 2004). Esses métodos podem ser aplicados a conjuntos de dados sobre espécies ou a qualquer outro nível de organização escolhido, como tipo de uso da terra e de disponibilidade de *habitat*.

Uma ilustração do uso da PLI para identificação de áreas prioritárias foi proposta por Scaramuzza et al. (2008), cuja idéia básica consistiu em adotar métodos quantitativos de modelagem multi-objetivo para gerar um sistema dinâmico de informações, capaz de criar diferentes cenários espaço-temporais de uso de terras, integrando dados de diferentes naturezas (biológicas, ambientais, sócio-econômicas), facilitando, desta forma, a assimilação da agenda de conservação da biodiversidade e de seus serviços ambientais por diferentes setores da sociedade (PIERCE et al., 2005).

O modelo de PLI usado para a identificação das 40 áreas prioritárias em Goiás possui a seguinte formulação matemática:

$$F_{objetivo} = \sum_{UP} C + PCB \sum_{UP} CB + \sum_{OC} (POC * PEN) + PLC \quad (1.3)$$

$$\text{s. a. } \sum_{i=1}^m a_{ij} x_i \geq 1 \quad \text{para } j = 1, \dots, n,$$

onde:

m = número de unidades de conservação (UP); $x_i \in \{0,1\}$

n = número de objetos de conservação (OC);

A – matriz $(m \times n)$, cujos elementos são definidos por $a_{ij} \in \{0,1\}$

onde 1 representa a ocorrência do OC_j na UP_i e 0 a sua ausência;

C = custo de cada UP definida pela seguinte expressão:

$$C = \log[(5 * U) + (4 * A) + (3 * E) + (2 * P) - (3 * UPI) - (3 * RE) - (1 * UUS) - (1 * TI)]$$

onde: E = área de estradas; U = áreas urbanas; A = áreas agrícolas;

P = áreas de pastagem; RE = áreas de remanescentes;

TI = áreas de Terras Indígenas;

UPI = áreas de Unidades de Conservação de Proteção Integral;

UUS = áreas de Unidades de Conservação de Uso Sustentável;

PCB = peso atribuído ao comprimento de borda;

CB = comprimento de borda da i -ésima UP;

POC = peso atribuído ao j -ésimo objeto de conservação;

PEN = penalidade pela não representação do j -ésimo objeto de conservação;

PLC = penalidade por exceder um custo mínimo pretendido (não foi utilizada esta parcela, pois ela está associada ao uso do preço da terra como variável de custo).

A identificação das 40 áreas prioritárias foi obtida por meio de um algoritmo de minimização aproximativo, o método *têmpera simulada*, que tem como base o algoritmo *simulated annealing* (KIRKPATRICK et al., 1983). Foram consideradas as soluções do PLI (1.3) encontradas pelo programa Marxan em 2.500 execuções deste algoritmo (SCARAMUZZA et al., 2008). A Figura 4 da introdução deste trabalho mostra a melhor solução espacial entre todas estas execuções.

A maioria dos modelos que tratam de problemas reais apresenta algum grau de não-linearidade. Entretanto, devido ao grande nível de dificuldades para entendimento e/ou de cálculos, na maioria das vezes a não-linearidade é desprezada (EISWERTH & HANEY, 2001). Além disso, a não-linearidade exclui o uso de métodos básicos de programação linear, que são tipicamente usados para resolver problemas de programação linear inteira. Isso justifica o fato de, geralmente, os problemas de representação serem formulados como modelos de programação linear inteira.

Segundo Cabeza (2003), para adotar critérios mais precisos de planos de conservação, é necessário considerar a viabilidade de proteger populações, bem como padrões espaciais, tais como fragmentação do *habitat*, conectividade e distribuição geográfica de todas as espécies envolvidas, o que implica na necessidade de considerar os princípios da dinâmica e de outros processos não-lineares na estrutura do sistema e da função que modela os atributos ecológicos mais realísticos do ecossistema (EISWERTH & HANEY, 2001).

Neste contexto, vê-se a necessidade de estudar alguns conceitos referentes à Programação Não-Linear e também de outros métodos de modelagem matemática, como a Teoria dos Grafos, para lidar com informações geo-espaciais.

Problemas de Programação Não-Linear são problemas de otimização em que a função-objetivo e/ou pelo menos uma das restrições envolvidas, não são funções lineares das variáveis de decisão.

Um problema de Programação Não-Linear (PNL) pode ser genericamente representado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Otimizar} & \quad z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{Sujeito a} & \quad \left. \begin{aligned} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) & \leq b_1 \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) & = b_2 \\ & \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) & \geq b_m \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (1.4)$$

onde, f e g_i são funções de n variáveis e b_i é a limitação da i -ésima restrição, $i=1,2,\dots,m$.

Para encontrar a solução ótima de problemas de PNL (1.4), existem métodos exatos para problemas de complexidade não excessiva. Contudo, os métodos heurísticos podem ser uma opção devido à complexidade dos problemas envolvidos, cuja solução exata é analiticamente inviável (WILLIAMS, 2004).

Existem vários algoritmos heurísticos desenvolvidos para solucionar os problemas de programação não-linear. Todavia, nenhum é considerado ideal, devido às suas limitações. A principal delas ocorre quando a não-convexidade das restrições ou função-objetivo implica em soluções múltiplas, ou seja, quando a “área” de soluções possíveis apresenta vários pontos de máximo ou de mínimo locais, não garantindo soluções ótimas globais.

A solução ótima, no caso quadrático, não é difícil de ser encontrada, pois é única e o conjunto de restrições é formado apenas por funções lineares. Já não se pode dizer a mesma coisa quando se trata de um problema de Programação Quadrática Inteira, pois o grau de dificuldade aumenta muito (EISWERTH & HANEY, 2001), devido, principalmente, à necessidade do uso de algoritmos mais complexos.

Um exemplo de programação não-linear inteira quadrática, o problema de seleção de áreas prioritárias para conservação, cuja função-objetivo consiste, ao mesmo tempo, em obter

um conjunto mínimo de áreas a preservar e simultaneamente reduzir a soma das distâncias entre as áreas escolhidas, as quais devem ter qualidade total maximizada. Em linguagem matemática:

$$\begin{cases} \text{minimizar} & F(x) = \frac{1}{2} x^T D x + \alpha Q^T x \\ \text{sujeito a} & P x \geq T \\ & x_j \in \{0, 1\}, \quad j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (1.5)$$

onde: x é o vetor de m componentes x_j ($x_j = 1$ significa que decidimos preservar a área j e $x_j = 0$ significa que optamos pela não-conservação da área j); $D = (d_{kl})$ é a matriz $m \times m$ das distâncias entre as áreas, $Q = 1 - q_j$ é o vetor de qualidades, $P = (p_{ij})$ é a matriz $n \times m$ das observações, $T = (t_j)$ é o vetor das exigências mínimas enquanto número de áreas para cada espécie e α é um parâmetro de peso para o fator de qualidade. Assim, conforme o valor do parâmetro α escolhido, toda uma gama de soluções é obtida, atribuindo maior ou menor importância à proximidade e adjacência das áreas escolhidas em relação ao valor da qualidade do terreno.

A forma de calcular a distância entre duas áreas, ou seja, o número d_{kl} , pode variar de um caso para outro. Considerando a distância como sendo a distância medida em graus de latitude e longitude entre os centros geométricos das unidades amostrais menos um, foi desenvolvido um algoritmo exato, no qual a função-objetivo, além de minimizar o número de áreas a serem preservadas, determina uma solução em que as áreas sejam mais aglomeradas e de melhor qualidade.

O algoritmo consiste de alguns passos. Inicialmente, é tomado o ponto de partida $x^0 = (1, 1, \dots, 1)$, calculado o gradiente $\nabla F(x^0)$ e feito uma busca ao longo da reta

parametrizada $x^0 - \beta \nabla F(x^0)$ a procura do maior valor de β para o qual as restrições $Px \geq T$, $0 \leq x_i \leq 1$ não são violadas. Isso leva a um novo ponto, designado x^1 , na qual uma ou mais das n restrições $P_j x \geq T_j$ é satisfeita, com $P_j x = T_j$, ou uma ou mais das restrições $0 \leq x_i \leq 1$ é satisfeita, com $x_j = 0$ ou $x_j = 1$. Na próxima iteração, o cumprimento da restrição satisfeita é mantido mediante projeção do gradiente no ou nos hiperplanos em questão ($P_j x = T_j$, $x_j = 0$ ou $x_j = 1$) e, novamente, é procurado ao longo da reta $x^k - \beta \nabla F(x^k)$ o maior valor possível de β até nova restrição $P_j x \geq T_j$, $0 \leq x_i \leq 1$ ser violada. Repete-se este processo, gerando uma seqüência de pontos $x^0, x^1, x^2, \dots, x^k, \dots$, até ocorrer convergência do algoritmo num ponto x^k , onde cada componente será ou igual a 0 ou a 1. Esta é a solução do problema de minimização de $F(x)$ sujeita às restrições consideradas (1.5). O número de iterações deste algoritmo é menor ou igual a $n + m$.

Para melhor entendimento do algoritmo, apresenta-se, abaixo, um exemplo ilustrativo e, em seguida, a utilização deste algoritmo para uma proposta de conservação no bioma Cerrado.

Dado as matrizes P , T , Q , D , o vetor X^0 e o valor do parâmetro α , tais como:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.5 \\ 0.7 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 0.8 \\ 0.8 & 2 & 0 \end{bmatrix}, \quad X^0(1, 1, 1), \quad \alpha = 1$$

Logo, temos a seguinte problema de minimização:

$$\text{minimizar } F = \frac{1}{2} [x_1, x_2, x_3] \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 0.8 \\ 0.8 & 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + [0.3 \quad 0.5 \quad 0.7] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

$$\text{s.a} \quad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \text{minimizar } F = x_1x_2 + 2x_1x_3 + 0.8x_2x_3 + 0.3x_1 + 0.5x_2 + 0.7x_3$$

$$\text{s.a} \begin{cases} x_1 + x_2 \geq 1 \\ x_2 + x_3 \geq 1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \nabla F = (x_2 + 2x_3 + 0.3, x_1 + 0.8x_3 + 0.5, 2x_1 + 0.8x_2 + 0.7)$$

Para encontrar a solução do problema, o algoritmo apresenta as seguintes interações:

1ª Iteração :

$$-\nabla F_{X^0} = (-3.3, -2.3, -3.5)$$

$$\Rightarrow \text{Reta Parametrizada : } X^0 - \beta \nabla F_{X^0} = (1, 1, 1) - \beta(3.3, 2.3, 3.5)$$

$$\text{Como } x_1 + x_2 \geq 1 \text{ e } x_2 + x_3 \geq 1 \Rightarrow \beta = 0.17241 \text{ e o valor de } X^1 = (0.43103, 0.60346, 0.39657)$$

2ª Iteração :

$$-\nabla F_{X^1} = (-1.6966, -1.24829, -2.04483)$$

$$-\nabla F_{X^1}|_P = -\nabla F_{X^1} + \alpha(0, 1, 1) \Rightarrow -\nabla F_{X^1}|_P = (-1.6966, 0.39827, -0.39827)$$

Reta Parametrizada :

$$X^1 - \beta \nabla F_{X^1}|_P = (0.43103, 0.60343, 0.39657) - \beta(1.6966, -0.39827, 0.39827)$$

$$\text{Como } x_1 + x_2 \geq 1 \Rightarrow \beta = 0.02656 \text{ e o valor de } X^2 = (0.38597, 0.61404, 0.38597)$$

3ª Iteração :

$$-\nabla F_{X^2} = (-1.38598, -1.19475, -1.96317) \Rightarrow -\nabla F_{X^2}|_P = -\nabla F_{X^2} + \alpha(1, 1, 0) + \beta(0, 1, 1)$$

$$\Rightarrow -\nabla F_{X^2}|_P = -(-1.38598, -1.19475, -1.96317) + \alpha(1, 1, 0) + \beta(0, 1, 1)$$

$$\Rightarrow -\nabla F_{X^2}|_P = (-0.71814, 0.71814, -0.71814)$$

Reta Parametrizada :

$$X^2 - \beta \nabla F_{X^2}|_P = (0.38597, 0.61404, 0.38597) - \beta(0.71814, -0.71814, 0.71814)$$

$$\text{Como } x_1 \geq 0 \Rightarrow X^3 = (0, 1, 0).$$

Portanto, a solução deste problema é o vetor $X^3 = (0, 1, 0)$.

Veja a representação geométrica deste exemplo na Figura 5.

A seta azul que sai do ponto $(1, 1, 1)$ representa a direção da reta parametrizada da 1ª iteração, que intercepta o plano $x_2 + x_3 = 1$ no ponto X^1 .

A seta preta representa a direção da reta parametrizada da 2ª iteração, que intercepta o plano $x_1 + x_2 = 1$ no ponto X^2 .

A seta vermelha representa a direção da reta parametrizada da 3ª iteração, que foi gerada pela interseção do plano $x_2 + x_3 = 1$ com o plano $x_1 + x_2 = 1$, e vai para o ponto X^3 , o qual é a solução ótima do problema.

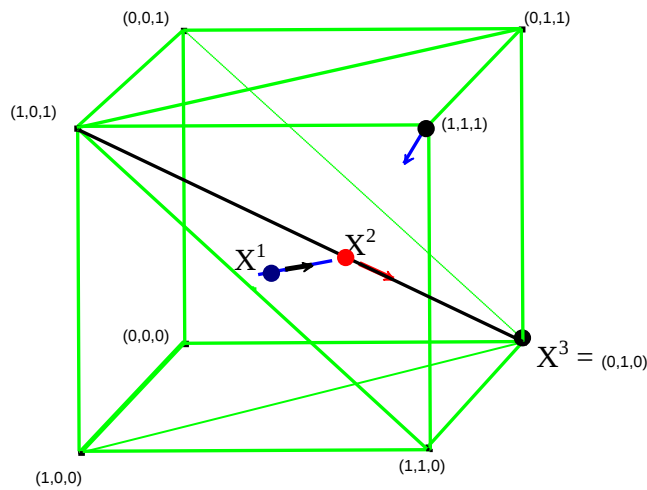


Figura 5 – Representação geométrica das iterações do algoritmo proposto e aplicado ao exemplo acima.

Agora, considere a área de estudo sendo o Bioma Cerrado, definido em 181 células de 1° de latitude por 1° de longitude (DINIZ-FILHO et al., 2004a,b), logo $m = 181$ (Figura 6). Também considere que a função de ocorrência $p_{ik} \in \{0,1\}$, e que a distância entre os centros das células i e j , é dada por $d_{kl} = \|z_k - z_l\| - 1$, onde z_k e z_l são os centros das células k e l respectivamente. Assim, neste caso, a distância entre as células 1 e 10 é $d_{1,10} = \sqrt{17} - 1$, a

distância entre as células 59 e 76 é $d_{59,76} = \sqrt{2} - 1$ e a distância entre as células 101 e 102 é $d_{101,102} = 0$. Observe que, segundo a nossa definição, a distância entre células vizinhas pode ser zero, se elas forem adjacentes e $\sqrt{2} - 1$ se tivessem apenas um ponto em comum. Observe que todas as células têm áreas quase idênticas, e que neste caso a minimização do número de células corresponde à minimização da área a ser protegida.

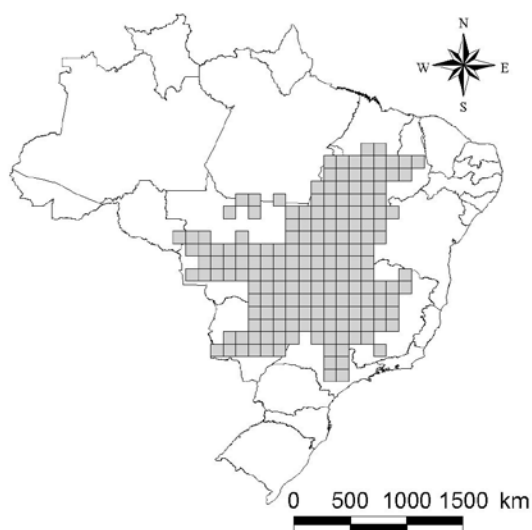


Figura 6- Mapa do Brasil, destacando a região do bioma Cerrado, dividida em 181 células de 1° latitude por 1° de longitude.

Neste exemplo, o vetor Q é o parâmetro de ocupação humana, que foi determinado por 23 variáveis sócio-econômicas que indicam os conflitos entre os interesses sócio-econômicos e de conservação da biodiversidade. Estas variáveis socioeconômicas foram obtidas através de um banco de dados, consistindo de 1.056 sedes municipais dentro dos limites do Cerrado brasileiro, compilados pelo IBGE². Este banco de dados gerou uma matriz de dados de 23 variáveis sócio-econômicas para as 181 células, que foi utilizada para determinar o parâmetro de ocupação humana (q_i) (RANGEL et al., 2006).

2. Censo agropecuário de 1995-1996 e censo demográfico de 2000. Disponível em: www.ibge.gov.br.

Assim, para maximizar a conservação de células com alto índice q_i define-se o vetor $Q = (1 - q_i)$ e formula-se a função $F(x)$ a ser minimizada como:

$$F(x) = \frac{1}{2} x^T D x + \alpha Q^T x. \quad (1.6)$$

Na avaliação deste algoritmo, foram executados testes para a conservação de 131 espécies de anuros. Encontraram-se cinco soluções distintas, com no máximo 172 iterações e sete pesos diferentes ao fator de qualidade (α). Estas soluções são apresentadas na Tabela 1 juntamente com a solução proposta por Diniz-Filho et al. (2004a,b) usando o *Simulated Annealing Algorithm*.

Tabela 1. Resultado do algoritmo para sete valores de α e a solução via *Simulated Annealing Algorithm* (SAA).

	$\frac{1}{2} x^T D x$	$Q^T x$	Número de Iterações
$\alpha = 1$	893.3047	6.639	170
$\alpha = 3$	893.3047	6.639	172
$\alpha = 10$	893.3047	6.639	172
$\alpha = 30$	903.0103	6.272	170
$\alpha = 100$	916.0767	6.136	172
$\alpha = 300$	936.9568	5.971	169
$\alpha = 1000$	961.4318	5.874	169
SAA	950.2009	6.392	

Verifica-se que a solução obtida por este modelo não-linear ($\alpha = 1.000$) com a obtida pelo modelo linear de Diniz-Filho et al. (2006), a qual usa o algoritmo *Simulated Annealing*, ambas apresentam dezessete células, com pequenas diferenças que estão circuladas em vermelho e verde nas Figuras 7 e 8. Contudo, nestas circuladas a solução não-linear ($\alpha = 1.000$) encontrada neste estudo apresentou melhor qualidade de preservação.

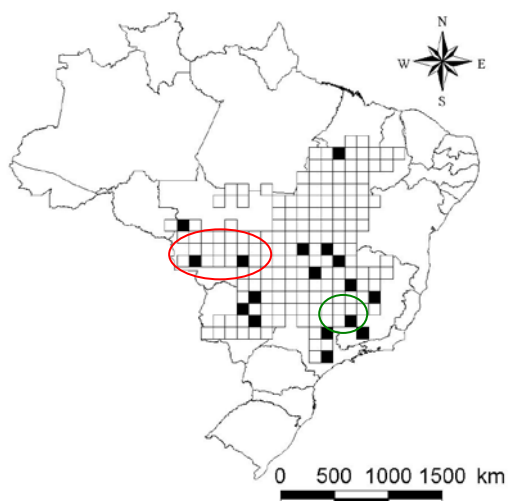


Figura 7. Solução do modelo não-linear proposto com $\alpha = 1000$.

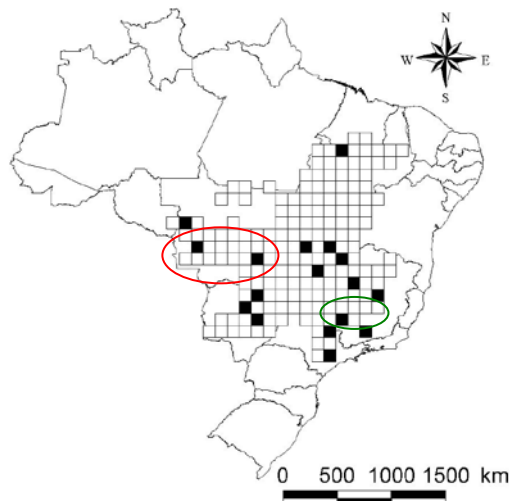


Figura 8. Solução do modelo linear proposto por Diniz-Filho et al. (2006) via *Simulated Annealing Algorithm*.

Com este exemplo, verifica-se que o algoritmo desenvolvido, para o problema de conservação não-linear de tamanho considerável, converge em um espaço de tempo bastante curto. Observe que o valor do parâmetro α mostra uma influência considerável na determinação da solução (Tabela 1). Assim, para valores grandes de α , as células são menos aglomeradas, mas de melhor qualidade. Neste caso, como se trata de células grandes, a aglutinação tem efeito reduzido na obtenção de uma solução. Ou seja, o método baseado na linearização rende solução quase idêntica à obtida por minimização da função $F(x)$ (1.6) exposta acima. Na prática, neste modelo não-linear, os dados mais refinados (i.e. em células menores) e detalhados (i.e. mais que a simples presença ou não de cada espécie) visam aumentar o grau de aglutinação de áreas para conservação.

Geralmente, a solução de um problema de seleção de áreas para conservação da biodiversidade resulta tipicamente na identificação de redes de locais altamente espalhados (por exemplo, DINIZ-FILHO et al, 2006; SCARAMUZZA et al., 2008). Embora, o problema fosse reconhecido há muito tempo, foi dada pouca atenção às áreas não selecionadas, que explicitamente fazem parte dos caminhos de conectividade.

De fato, inúmeros modelos de conservação ignoram a conectividade, principalmente no contexto de cobertura de espécies (CERDEIRA et al., 2005). Isto ocorre porque o processo de identificação de um conjunto de áreas prioritárias fica muito mais complexo e, as soluções para a estruturação espacial das redes de áreas protegidas não são óbvias (EISWERTH & HANEY, 2001), devido ao aumento do uso de outras ferramentas matemáticas, como a programação não-linear e a Teoria de Grafos.

A Teoria de Grafos é usada para traduzir dados geográficos como posição relativa de pontos e ordenamento espacial da informação (AGNARSSON & GREENLAW, 2007; BANG-JENSEN & GUTIN, 2001). Um grafo consiste de um conjunto de n nós ou vértices vinculados entre si por um total de m arestas.

Os nós normalmente representam locais distintos e as arestas a existência de conexões entre os locais ou adjacência dos mesmos. Cada nó e cada aresta podem ser associados a um conjunto de dados numéricos ou nominais e todas as informações geográficas contidas numa região se representam, assim, por meio de um grafo. Veja na Figura 9, um exemplo de grafo, onde os nós representam os centróides da vegetação remanescente dentro das bacias e as arestas as linhas de drenagem.

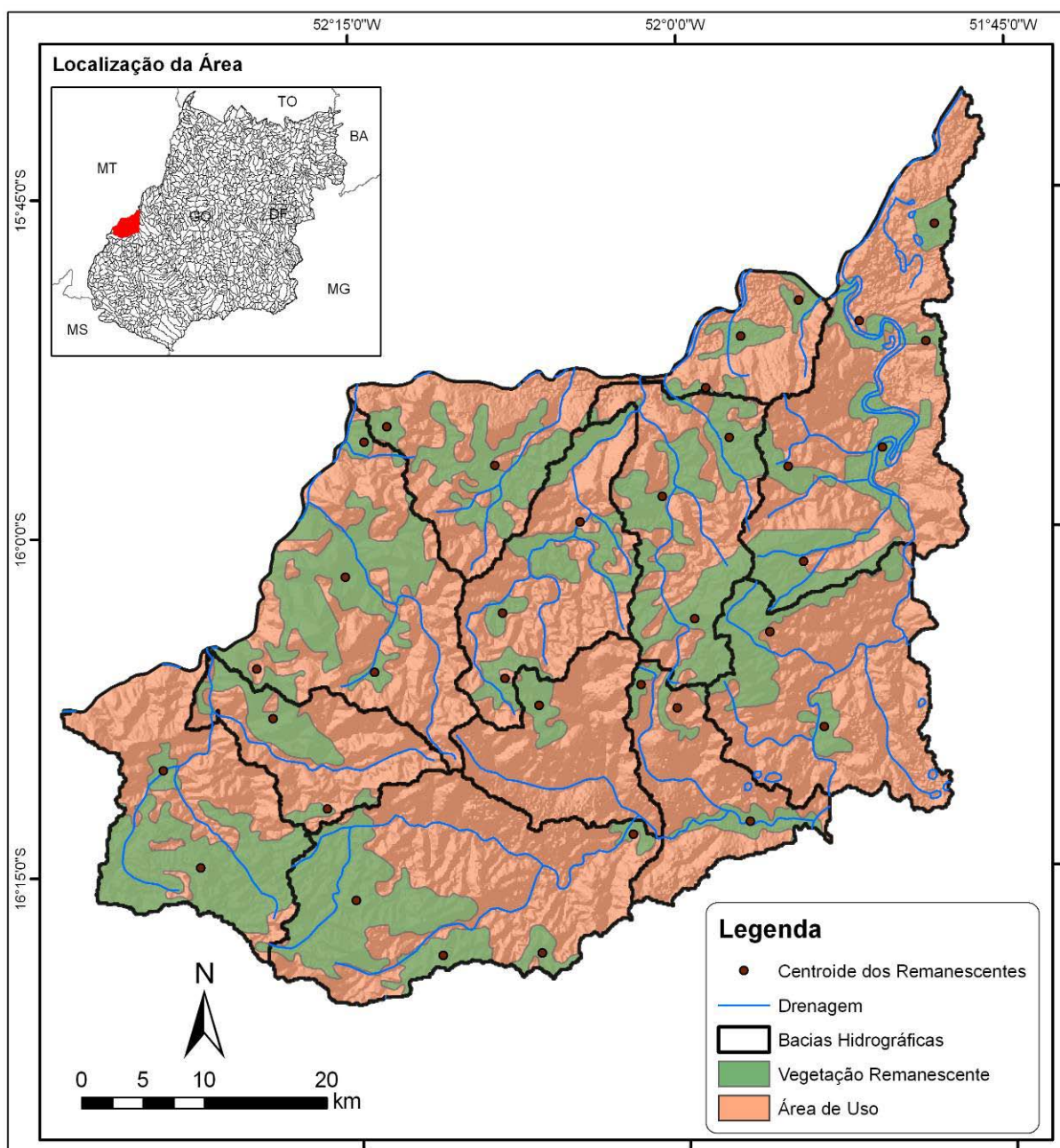


Figura 9 – Aplicação de grafo em um conjunto de bacias hidrográficas.

Um grafo é dito direcional, ou digrafo, quando é necessário ser estabelecido um sentido (orientação) para as arestas. O sentido da aresta é indicado através de uma seta. Nesta situação, a aresta passa a ser denominada de arco.

Um motivo simples de usar um digrafo, como neste trabalho, é o fato das arestas representarem ligações hídricas entre regiões, com a direção correspondendo à direção do fluxo de água, as quais são importantes para a formação de corredores ecológicos (Figura 10).

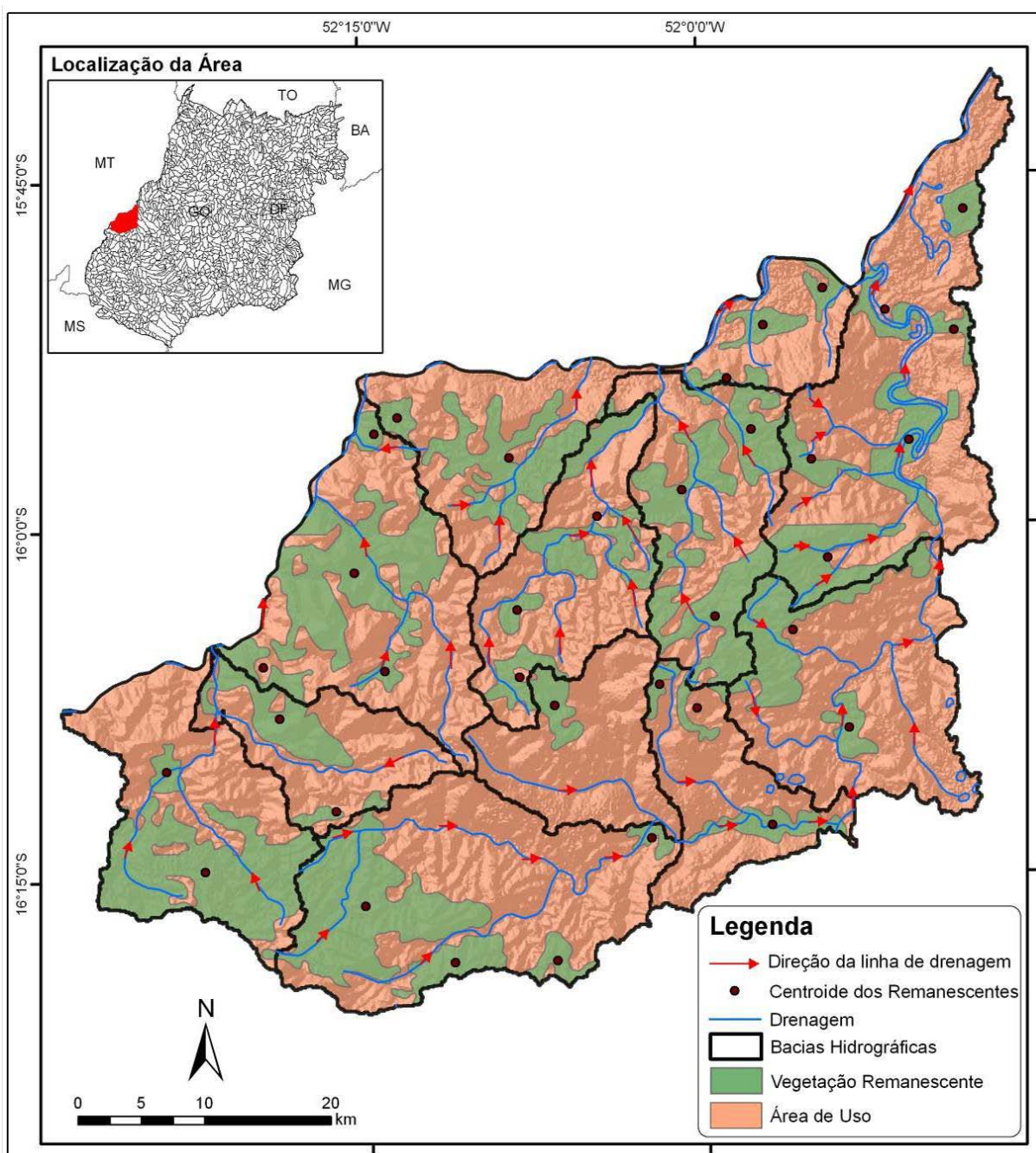


Figura 10. Aplicação de digrafo em um conjunto de bacias hidrográficas.

O problema de seleção de áreas prioritárias para conservação que trata este trabalho é bastante complexo por dois motivos. Primeiro, o número de variáveis é muito grande, tanto em número de espécies para proteção, quanto em número de áreas candidatas à conservação. Segundo, os dados não são de precisão exata, pois resultam de estimativas de inúmeros valores e muitas variáveis são temporais e se alteram ao longo do ano e de um ano para outro.

Por isso, o problema de conservação gera uma família de soluções com um espectro de prováveis valores. Neste caso, uma análise de sensibilidade, na qual os parâmetros envolvidos no modelo são avaliados segundo diferentes valores, é imprescindível para se entender o conjunto e a importância das soluções geradas, de tal forma que uma solução ótima, conforme um determinado contexto, possa ser definida.

CAPÍTULO 2

Desenho Experimental: Dados e Metodologia

Este trabalho tem como área de estudo o Estado de Goiás, marcado por esta intensa ocupação antrópica. Mapeamento recente, no âmbito do PDIAP indica, de forma bastante precisa, que 45% e 18% da cobertura vegetal nativa já foram convertidas em pastagens cultivadas e áreas agrícolas, respectivamente (Figura 11) (SANO et al., 2008b)

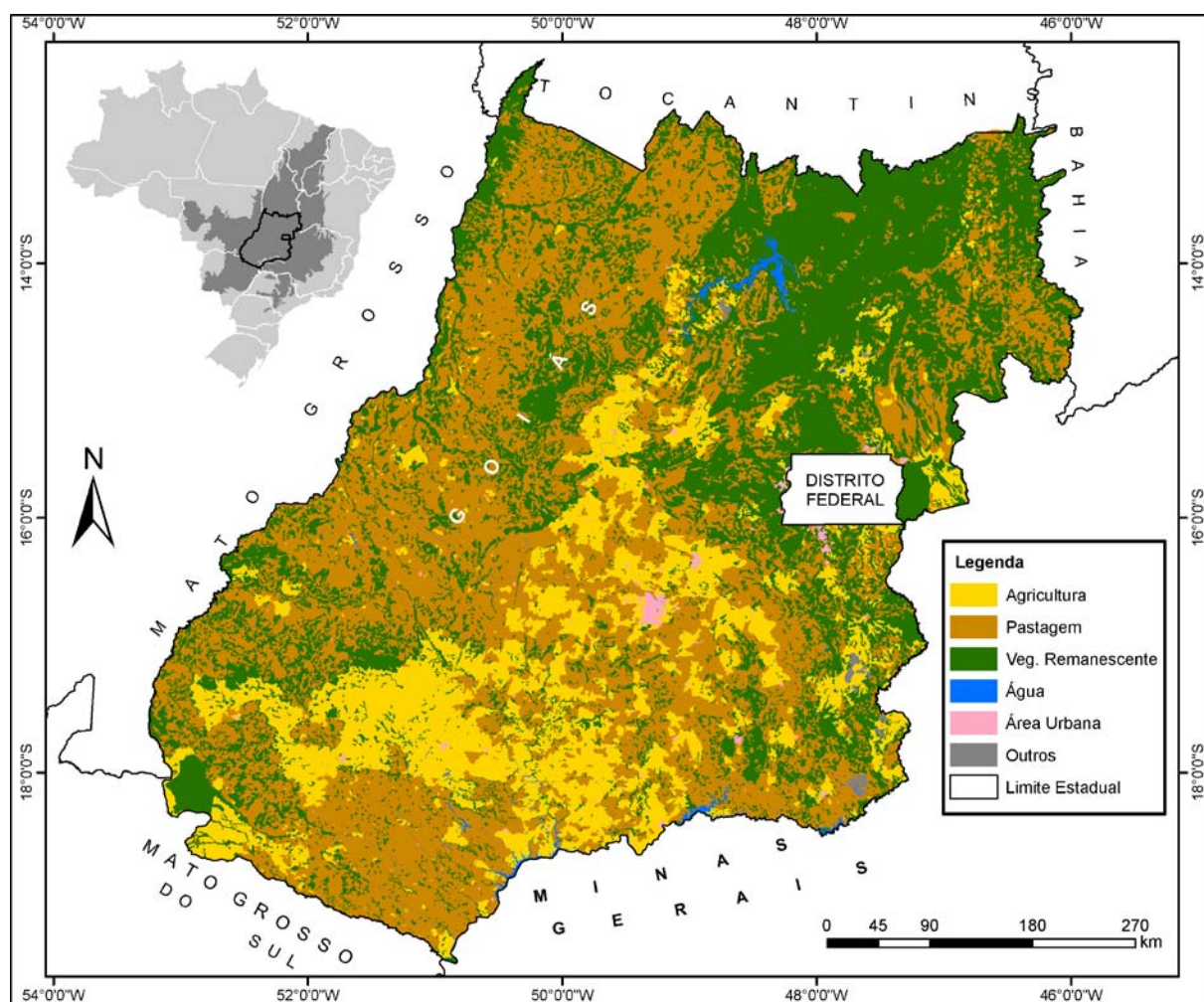


Figura 11. Localização e distribuição das classes de cobertura e uso da terra para o Estado de Goiás.

Fonte: PDIAP (2004).

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 por Bonnet et al. (2006) para atender aos requerimentos do Código Florestal (Figura 12). Portanto, um indicador ambiental biofísico importante que deve ser considerado neste estudo, é a porcentagem de vegetação remanescente dentro de cada bacia.

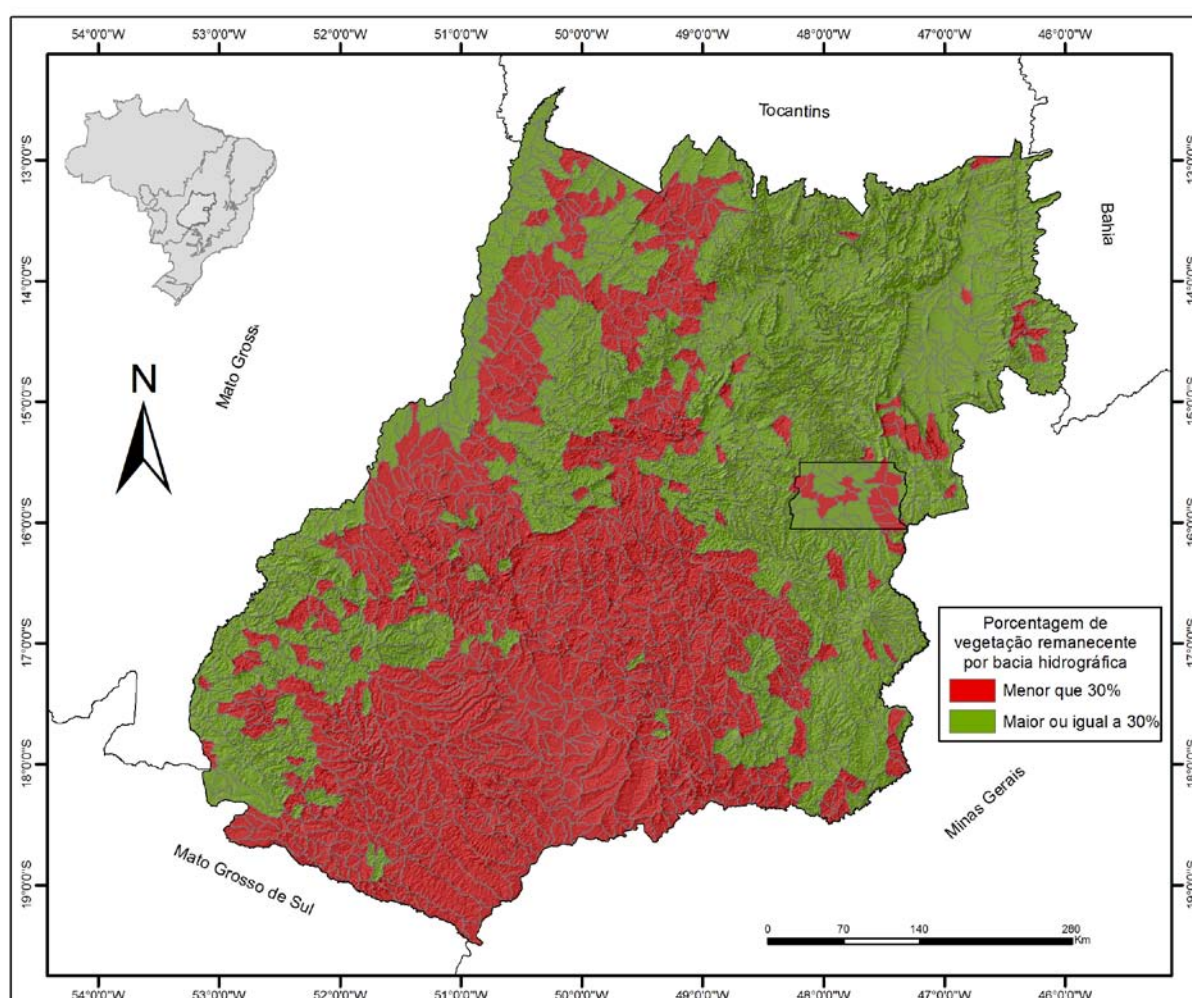


Figura 12 – Mapa de distribuição de vegetação remanescente do Estado de Goiás para as bacias hidrográficas segundo o Código Florestal Brasileiro.

O elevado antropismo no Estado é favorecido, entre outros, pelo preço da terra, pela proximidade de mercados consumidores e pelos incentivos governamentais (MIZIARA &

FERREIRA, 2008; PIRES, 2000), além da topografia relativamente plana, ideal para grandes monoculturas (FERREIRA, M. et al., 2007).

Por outro lado, a expectativa é de que os desmatamentos no Cerrado goiano, que continuam ocorrendo a taxas que variam de 0,21% a 0,86% ao ano (SILVA et al., 2008), sejam ainda mais intensificados, principalmente em função da crescente demanda por biocombustíveis (FERREIRA, L. et al., 2008; ROCHA et al., 2008), alcançando regiões do Estado ainda relativamente preservadas, como, por exemplo, o nordeste goiano (Figura 13).

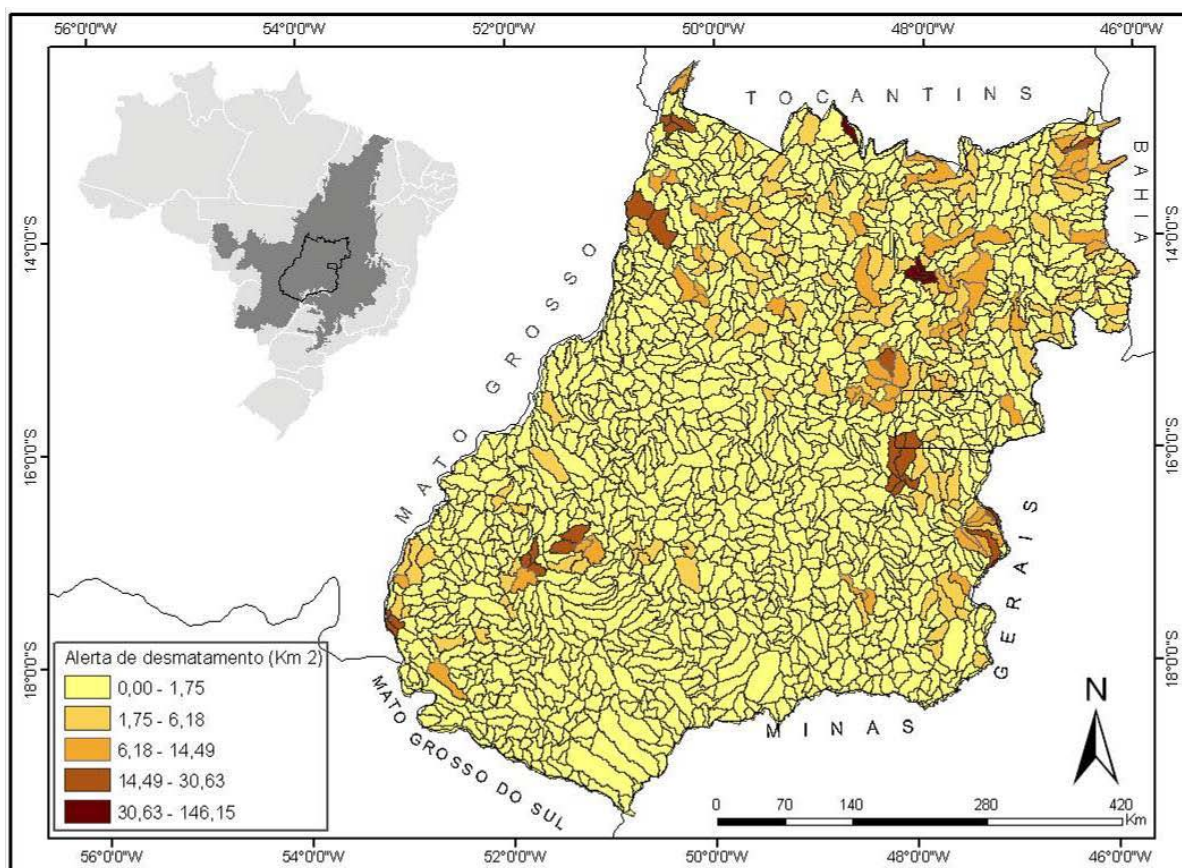


Figura 13: Distribuição dos desmatamentos no Estado de Goiás ocorridos no período de 2003 a 2007, conforme as bacias hidrográficas com área mínima 9500 ha.

Em fato, dos quase 114 mil hectares de alertas de desmatamentos detectados no Estado de Goiás para o período de 2003 a 2004, 88% ocorreram em áreas de preservação permanente (FERREIRA, M. et al., 2008a). Por isso, a preservação deste bioma demanda ações eficientes e urgentes para assegurar, em longo prazo, a conservação da biodiversidade e de

seus serviços ambientais, dentre eles, a proteção e a recuperação dos mananciais de água (BONNET et al., 2008).

O modelo de seleção de áreas prioritárias para conservação no Estado de Goiás, proposto nesta tese, tem como unidade de aplicação a bacia hidrográfica. O motivo desta escolha se dá tanto pelo aparato legal (Lei 9433, 1997), quanto pelo fato da bacia hidrográfica agregar sistemicamente um conjunto ambiental de elementos físicos, bióticos e socioeconômicos inter-relacionados, bem como ser uma unidade territorial hierarquizável pelo número de nascentes e cursos d'água (SANTOS, 2004).

Especificamente para este trabalho, utiliza-se 1511 bacias hidrográficas com área mínima de 9.500 hectares (Figura 14).

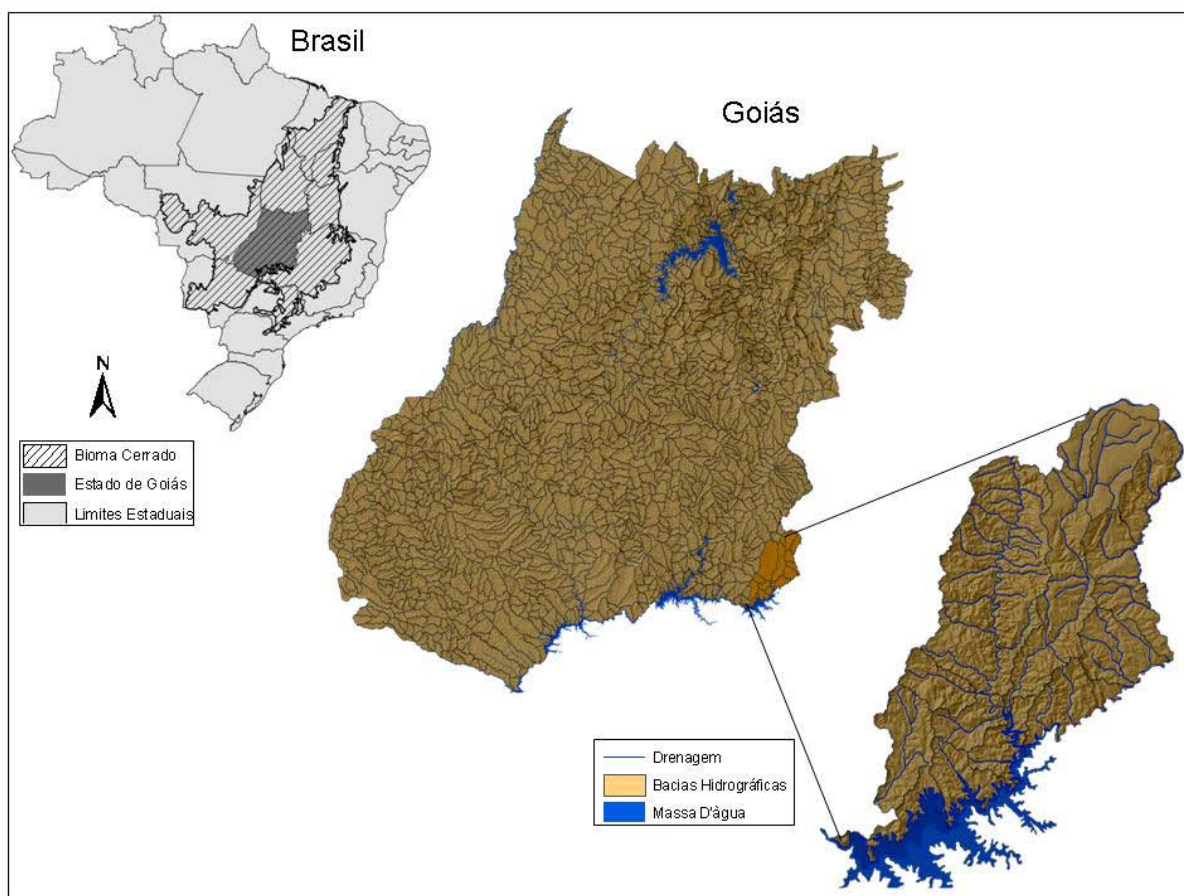


Figura 14: Localização do bioma Cerrado e estado de Goiás, o qual foi subdividido em 1511 bacias hidrográficas com área mínima de 9.500 ha.

A área mínima da bacia de 9.500 ha foi escolhida por três motivos. O primeiro, por ser uma área compatível com a área de vida de algumas espécies de mamíferos ameaçados de extinção no Cerrado brasileiro (RODRIGUES, 2002). O segundo, por haver uma grande concentração de bacias entre 9.500 e 10.000 ha. O terceiro, por ser uma área que oferece facilidades e viabilidades de gerenciamento sob o aspecto governamental (BERTRAND, 2004; BONNET et al., 2008). Ressalta-se que uma das dificuldades encontradas em trabalhar com este tipo de unidade é que esta não é constante, i.e. cada bacia possui uma forma e um tamanho diferente.

A subdivisão do Estado de Goiás (e Distrito Federal) em bacias hidrográficas (Figura 14) 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 e delimitadas os ambientes ripários (*buffers* de 100 m em torno das linhas de drenagem) (BONNET, 2006; MEDEIROS, L. et al., 2008). Neste caso, usando o *software* ArcGis 9.3, as bacias hidrográficas geradas com área menor que 9.500 ha foram acopladas a outras bacias que fazem parte de uma mesma bacia de nível superior.

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 15.

Os dados cartográficos e temáticos incluíram 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 de interpretação, de imagens de Landsat ETM⁺ dos anos de 2001 e 2002 e de 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.

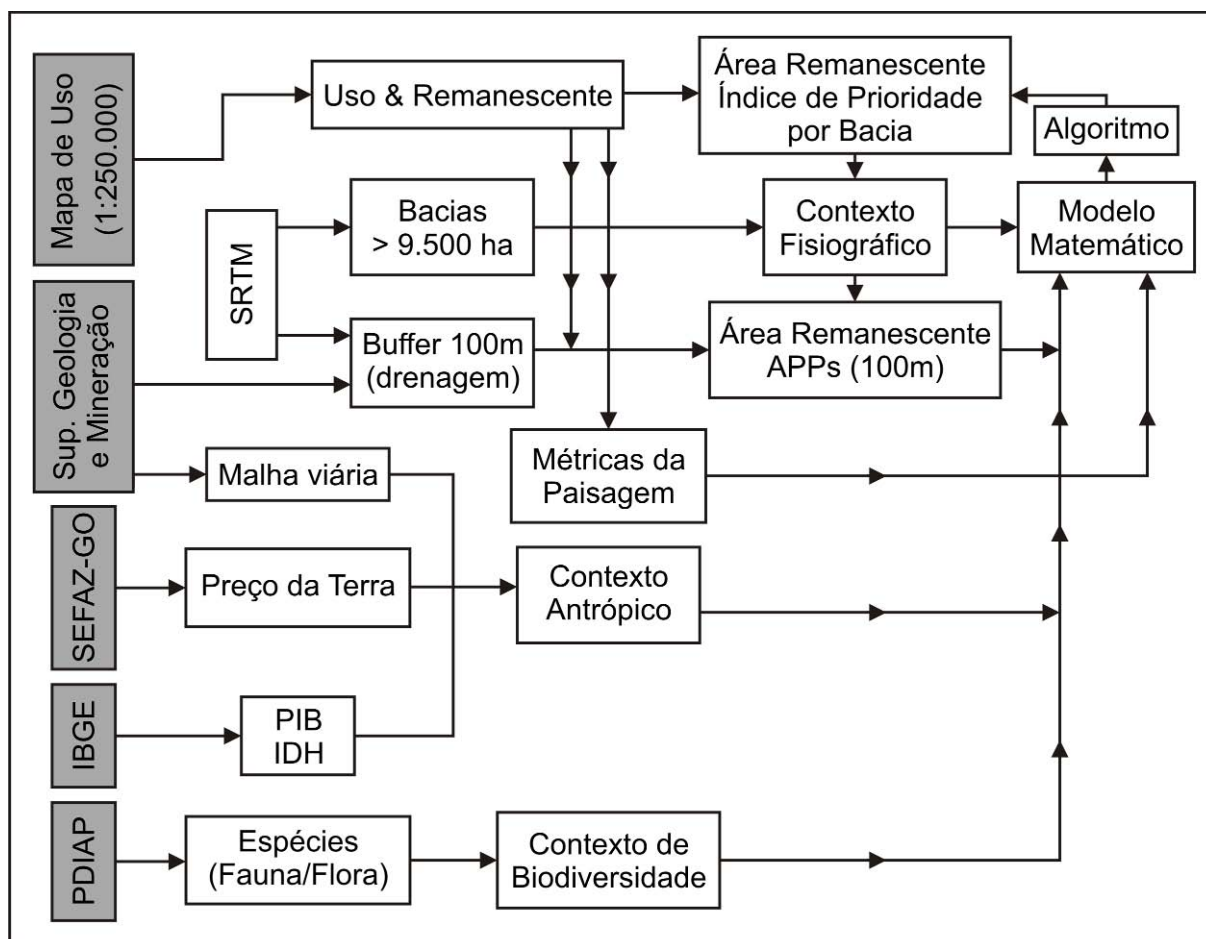


Figura 15. Conjunto de dados primários e procedimentos metodológicos aplicados à área de estudo para identificação de áreas prioritárias.

No Estado de Goiás, aproximadamente 24.000 km² 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 (e.g. Micro-região Sudoeste)³.

3. 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 & 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)⁴.

O *Cerrado Agrícola* refere-se às áreas ainda cobertas por remanescentes de Cerrado (segundo a percepção do mercado), cujo valor se dá em função do uso que a mesma propiciará (e.g. área de pastagem). A categoria *Terra Agrícola* (alta ou baixa produtividade) se refere às regiões com maior potencial agrícola, o qual varia em função da cultura agrícola e de fatores como fertilidade do solo, irrigação e topografia. A categoria *Pastagem Formada* (alto ou baixo suporte) são áreas de pastagens cultivadas, com uma capacidade de suporte que varia de acordo com a taxa de lotação (número de animais por unidade de área). A distribuição destes preços, entre os municípios goianos, para todas as categorias analisadas, segue um padrão espacial consistente, baseado na proximidade de mercados consumidores/produtores, na topografia relativamente plana e na infra-estrutura rodoviária (FERREIRA, M. et al., 2008b).

Assim, 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:

4. Disponível em: <<http://www.sefaz.go.gov.br>>

$$p_l = CA_l \times R_l + Média(AA_l, AB_l, PA_l, PB_l) \times (1 - R_l) \quad (2.1)$$

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 valor do hectare das áreas remanescentes para os municípios que não tinham informações sobre nenhuma categoria de preço, foi obtido por uma média proporcional do valor do hectare das áreas remanescentes dos municípios envolvidos no domínio de cada microrregião.

Apesar do preço da terra ser obtido por meio de levantamentos mercadológicos *in loco*, é divulgado sem a respectiva referência geográfica (latitude e longitude). Neste caso, a opção foi referenciá-lo aos municípios (e respectivas bacias), o que ocasiona, em parte, uma perda de precisão quanto aos aspectos locacionais (e respectivos aspectos físicos da área). Entretanto, este conjunto de informações continua representativo e válido para o estudo em questão, principalmente, por seu levantamento homogêneo em relação ao Estado de Goiás. O padrão espacial da distribuição do valor da terra normalizado⁵ nas bacias hidrográficas, conforme a fórmula (2.1) é mostrada na Figura 16.

5. Preço da terra normalizado é obtido pela fórmula: $p_N = \frac{p_l - p_m}{p_M - p_m}$,

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

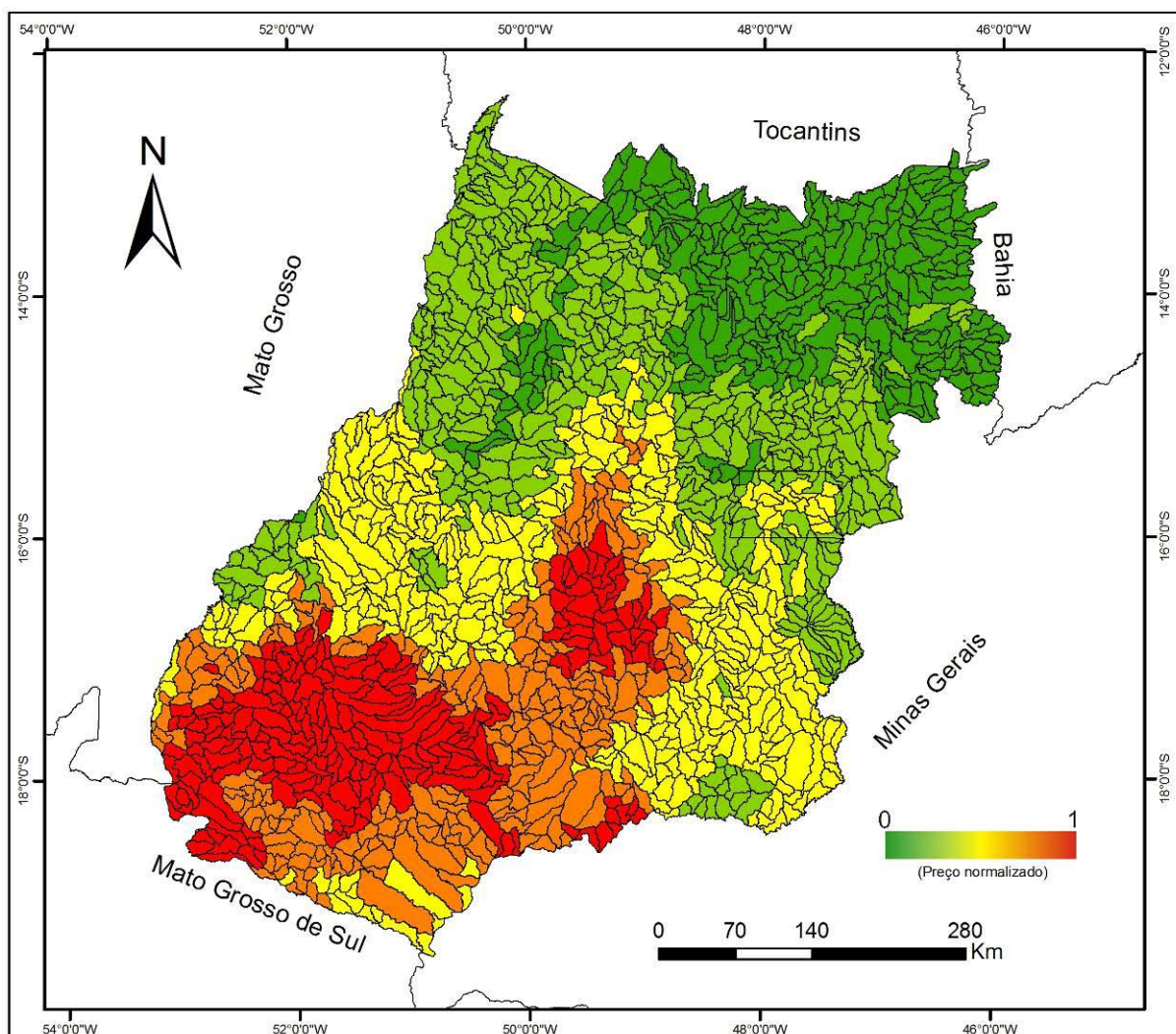


Figura 16. Distribuição do preço da terra normalizado no Estado de Goiás conforme bacias hidrográficas maiores que 9.500 ha.

As rodovias federais e estaduais constituem outro indicador ambiental de pressão antrópica, haja vista estarem diretamente relacionados ao grau de antropismo (Figura 17).

Observa-se que as bacias que possuem menores áreas de vegetação remanescentes e maiores fragmentações, em geral, 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).

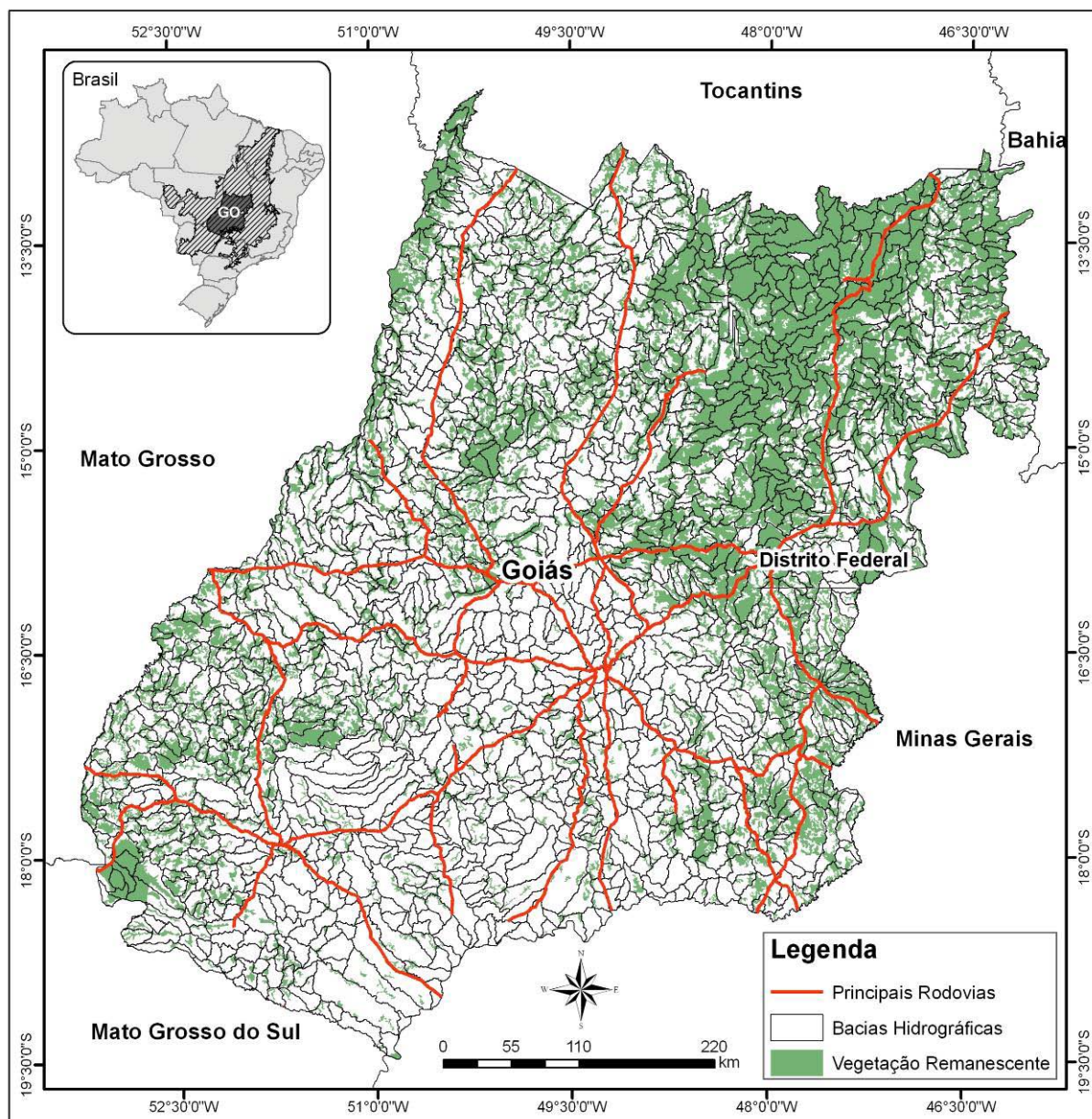


Figura 17. Distribuição espacial da vegetação remanescente e das principais rodovias federais e estaduais em bacias hidrográficas maiores que 9.500 ha.

Os indicadores ambientais de pressão antrópica, PIB⁶ e IDH⁷ dos municípios goianos são aqueles disponibilizados através do Atlas de Desenvolvimento Humano (IBGE, 2002), os

6. Índice de Desenvolvimento Humano: É dado pela média aritmética simples de três sub-índices, longevidade (IDH longevidade), educação (IDH educação) e renda (IDH renda). Essas três dimensões têm a mesma importância no índice, que varia de zero a um; quanto mais próximo de 1, maior o IDH (PNUD, 2007; IPEA, 2007).

7. Produto Interno Bruto: Considerado um dos principais indicadores da economia de um país, corresponde ao valor final total de todos os bens e serviços produzidos internamente numa economia ao longo de um determinado período de tempo. A fonte original dos dados (1999-2001) é o Antigo Sistema de Contas Regionais. O PIB Total é dado pela soma dos setores agropecuária, indústria e serviços (IPEA, 2007).

quais foram interceptados para as bacias hidrográficas. Nas bacias que apresentaram mais de um valor para o PIB e IDH, foi calculado um valor médio destes valores. Nas bacias que não apresentassem nenhum valor foram designadas 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 uma maior deficiência de cobertura vegetal nativa, conforme se pode averiguar na Figura 17.

Observa-se que 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) e maior valor do preço da terra, levando a concluir que em Goiás as variáveis PIB, IDH e preço da terra, em geral, são altamente correlacionadas.

Em relação à biodiversidade, os dados pontuais de espécies (fauna e flora) utilizados neste trabalho foram provenientes de um sub-projeto de compilação e organização de bases de dados sobre biodiversidade do PDIAP, conduzido pela Dra Anamaria Achtschin Ferreira, e de registros do banco de dados “*Conservation International Species Database*” (CISD) relativos ao Estado de Goiás em 2004 (Anexo A).

Estes dados foram espacializados e cruzados com as áreas nativas remanescentes e as unidades de planejamento (bacias hidrográficas) (Figura 8).

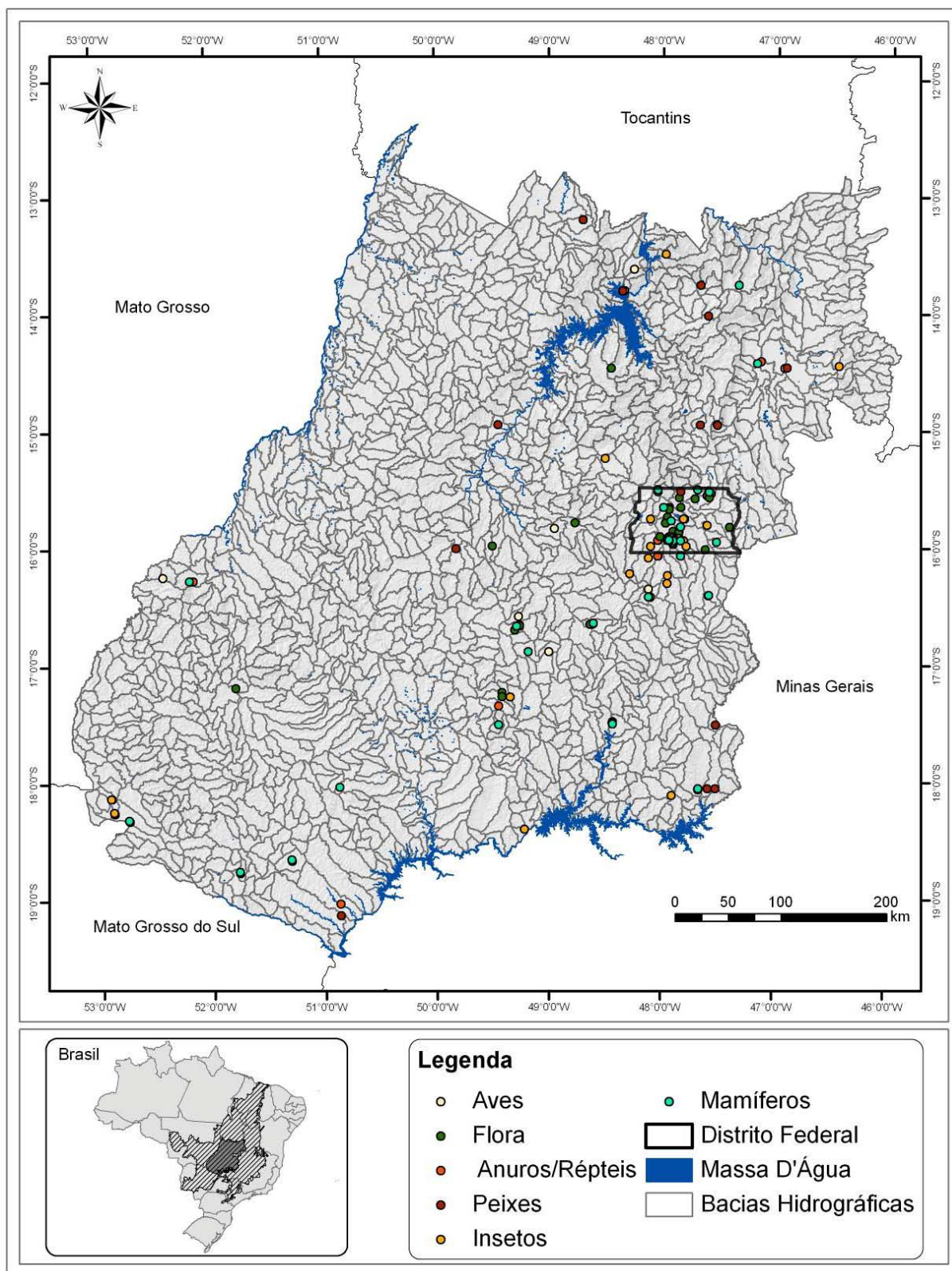


Figura 18. Mapa indicativo de biodiversidade no Estado de Goiás.

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 indicaria que ela estaria numa área de vegetação remanescente. Por sua vez, a presença destas categorias na bacia atribui um peso maior de insubstituibilidade do que em 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) foi dividida, primeiramente, em três grandes regiões hídricas, conforme as Ottobacias de Nível Dois da Agência Nacional de Águas (ANA) (ANA, 2006) (Figura 19), as quais estão inseridas no conjunto de Ottobacias Nível Um (Araguaia-Tocantins, Paraná e São Francisco). Por sua vez, estas foram divididas em mais duas, totalizando seis regiões de análise (Figura 20).

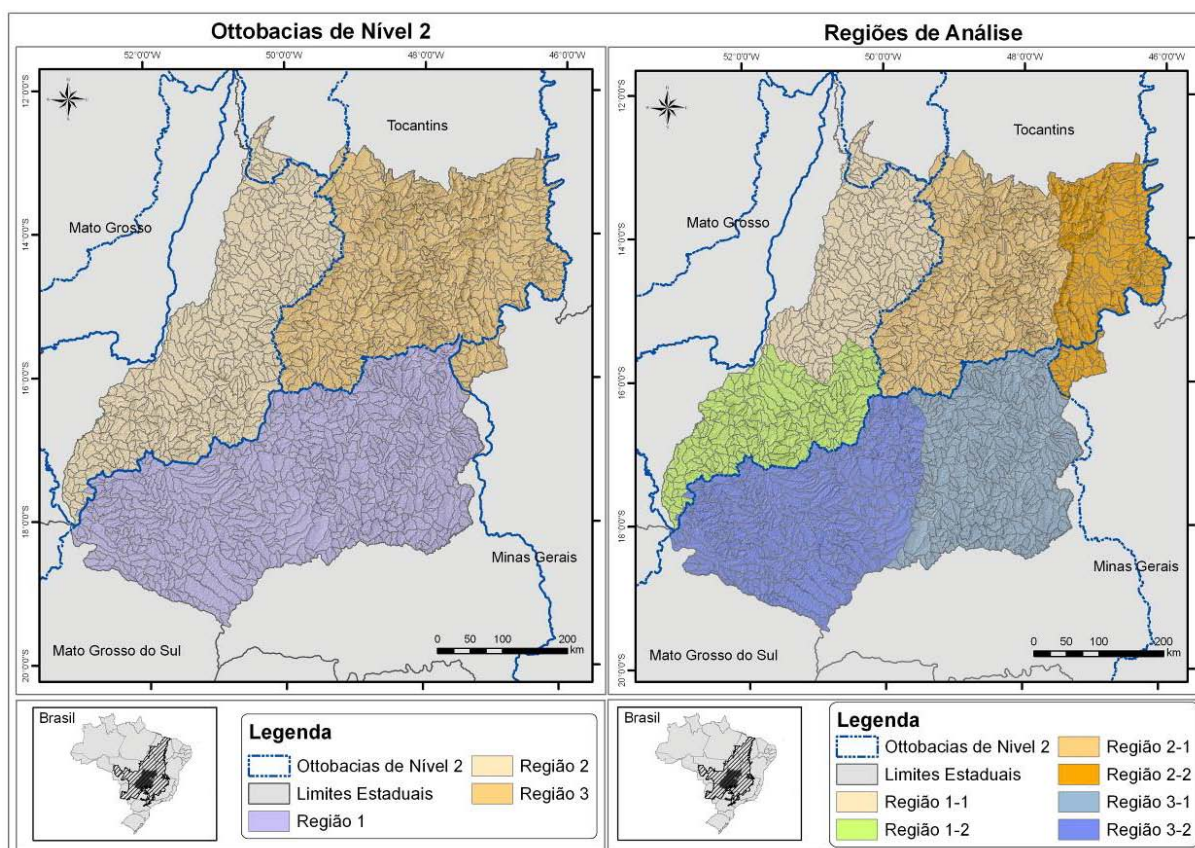


Figura 19. Três regiões hídricas do Estado de Goiás, conforme as Ottobacias de Nível Dois (ANA).

Figura 20. Mapa do Estado de Goiás dividido em 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, como por exemplo, a Região 3-2 (Figura 20).

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.

CAPÍTULO 3

Formulação do Problema e Algoritmo

Neste capítulo, formulou-se um modelo de programação não-linear (PNL), que 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 remanescentes que nela estejam. Ou seja, a inclusão de uma bacia 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 a cada fragmento de remanescente i um parâmetro de qualidade/importância $\alpha(i) \in [0, 1]$. O valor de $\alpha(i)$ varia de acordo com os seguintes indicadores/dados ambientais e dados de espécies:

1. áreas grandes de remanescentes próximas às nascentes dos rios;
2. maior número de remanescentes em ambientes ripários (*buffer* de 100m ao longo da linha de drenagem);
3. compactidade dos remanescentes (mínimo de perímetro externo/área);
4. preço da terra, valor do PIB e do IDH (associados ao fragmento remanescente dentro da bacia);
5. conectividade e adjacência das áreas dos remanescentes i ;
6. áreas remanescentes sem interseção de rodovia;
7. afastamento do fragmento do ponto final da sub-região hídrica;
8. observação de espécies (presença ou ausência).

Consideramos como sendo sub-região hídrica o conjunto de bacias que tem em comum uma linha de drenagem principal. Na Figura 21 foram definidas quatro sub-regiões hídricas, onde os números de vermelho identificam as bacias e os de preto os fragmentos de vegetação remanescente.

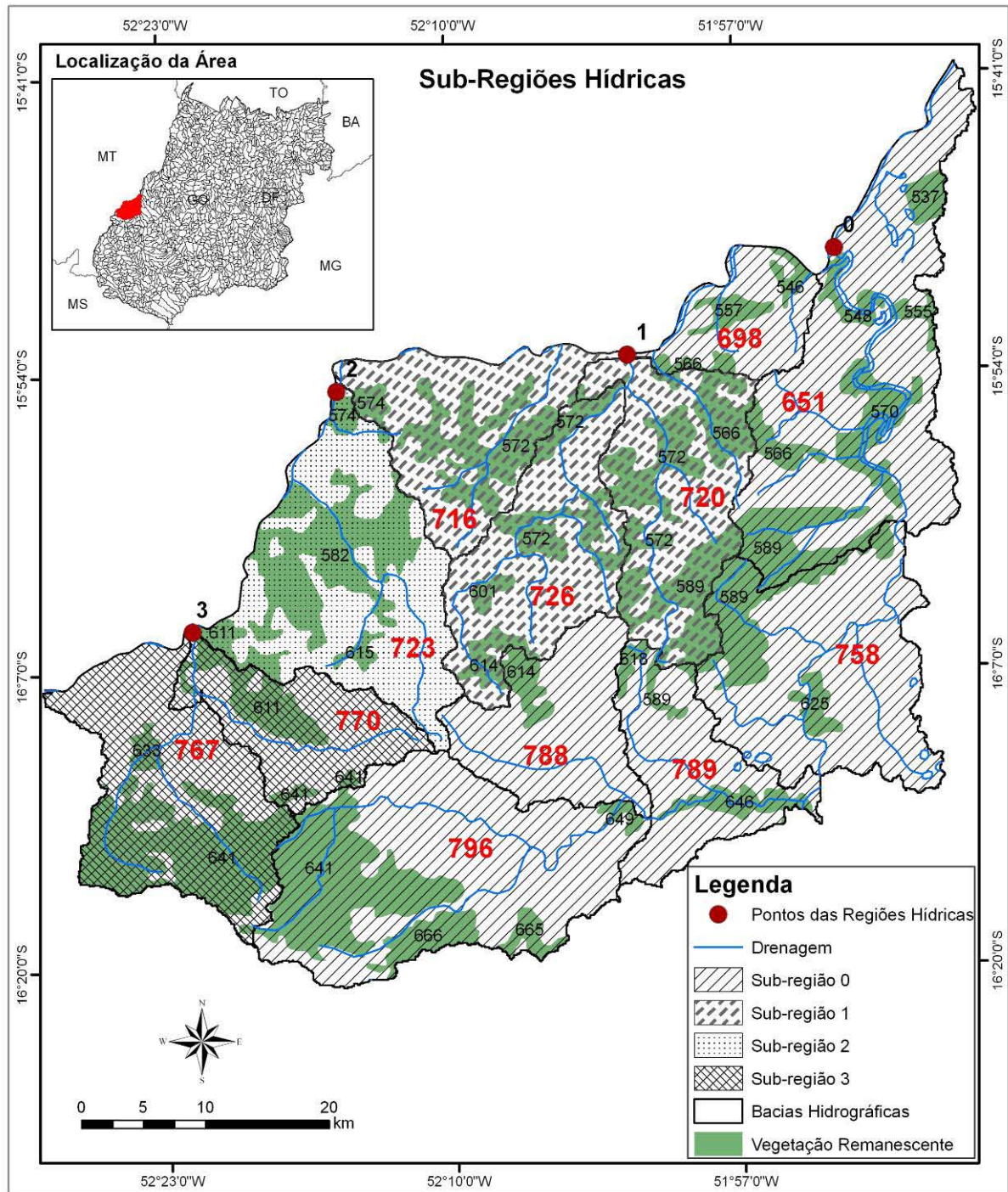


Figura 21. Exemplo de quatro sub-regiões hídricas.

A seleção de áreas prioritárias para conservação consiste, em princípio, do processo de escolher o nó de digrafo, 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 digrafo 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_i/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;

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 dos remanescentes dentro da sub-região que o contém;

m_i = identificação do fragmento remanescente i mais próximo rio abaixo;

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, que favorece a conectividade entre os fragmentos remanescentes.

Deseja-se minimizar uma função não-linear de variáveis $a_i, b_i, P_i, Q_i, I_i, p_i/a_i, r_i, d_i, e_i, \alpha(i)$ 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:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum & \left[- \left(\frac{c_1}{P_i} + \frac{c_2}{Q_i} + \frac{c_3}{I_i} \right) \cdot (1 - \alpha(i)) a_i - c_4 (1 - \alpha(i)) b_i + c_5 \cdot \left(\frac{p_i}{a_i} \right) - c_6 \cdot \beta(i) + \right. \\ & \left. c_7 \cdot r_i - c_8 \cdot d_i + \frac{c_9 b_i^T D b_i}{(g^2(i) - g(i))} - c_{10} \cdot e_i \right] \end{aligned} \quad (3.1)$$

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

A função-objetivo do modelo (3.1) 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 distância minimizada se refere aos fragmentos remanescentes da mesma sub-região. A função $g(i)$ conta o número de fragmentos de vegetação remanescente em cada região que foi incluído na solução. A minimização de distância entre remanescentes ocorre somente quando há pelo menos dois remanescentes na

sub-região, i.e. quando $g(i) > 1$. O parâmetro K indica o valor absoluto de áreas remanescentes de um conjunto de regiões que se pretende preservar. D é a matriz de distância entre os centróides dos fragmentos remanescentes em um conjunto de regiões, tal que se os centróides forem de regiões distintas, a distância entre eles é igual a zero. Os parâmetros c_i são determinados pelo peso de diversos fatores (ex. presença de rodovia, de *buffer*, etc.), com sinal conforme interesse em minimizar ou maximizar.

A variação dos valores de c_i determina soluções distintas. A discussão sobre a natureza e a sensibilidade destas soluções depende dos valores dos c_i atribuídos ao problema. Os valores usados inicialmente no problema dão peso aproximadamente igualitário a cada fator da função-objetivo, os quais são obtidos por meio do estudo de cada parcela desta função. 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.

Deseja-se um conjunto de nós, associado a um parâmetro, de digrafo que minimiza a função-objetivo. Note que se certo remanescente faz parte da solução, isto afeta a probabilidade de outro remanescente fazer parte também. Por este motivo o algoritmo não é a simples minimização de uma função (não-linear), mas da construção gradativa de uma solução final do problema (3.1).

Inicia-se o algoritmo com $\alpha(i) = 0$ e $\beta(i)=0$ para qualquer fragmento remanescente i . Enquanto o somatório $\sum \alpha(i)a_i$ for menor que K , o algoritmo é executado. O valor inicial deste somatório é zero, visto que nenhum fragmento remanescente foi incluído na solução.

A função-objetivo é avaliada em cada fragmento remanescente i e é escolhido um nó do digrafo em que o fragmento remanescente i minimiza a função-objetivo, o qual é o mais apto à inclusão numa proposta de solução. Neste momento, o fragmento remanescente i , isto é, o nó escolhido, tem valor de $\alpha(i) > 0$ e os demais tem $\alpha(i) = 0$.

Se $\alpha(i) = 0$, a inclusão põe $\alpha(i) = 0,25$. Se $\alpha(i) = 0,25$, a inclusão põe $\alpha(i) = 0,5$. Se $\alpha(i) = 0,5$, a inclusão põe $\alpha(i) = 0,75$. Se $\alpha(i) = 0,75$, a inclusão põe $\alpha(i) = 1$.

Estes valores de α foram atribuídos de forma que, a princípio, 0 corresponda à não inclusão do fragmento remanescente, 0,25 à inclusão de um fragmento remanescente para conservação reduzida, 0,5 à inclusão de um fragmento remanescente para conservação maior, 0,75 à inclusão de um fragmento remanescente para conservação ainda maior e 1 para a inclusão de um fragmento remanescente para conservação total.

A inclusão do fragmento remanescente i na solução faz com que $\beta(k)$ assumo valor maior que zero, ao longo do algoritmo, o que reflete a vantagem relativa de existência de fragmentos adjacentes em proposta de conservação. Ou seja, $\alpha(i)$ incrementado faz com que os valores de $\beta(k)$ em nós adjacentes sejam aumentados em cada iteração por um valor fixo pré-definido, no momento do aumento de $\alpha(i)$. Define-se este valor como sendo o mesmo do valor acrescido $\alpha(i)$, de 0,25.

Cada vez que um fragmento de mesma região é incluído na solução, g aumenta uma unidade para todo fragmento remanescente da sub-região x .

Em seguida, repete-se o processo de escolha do nó do digrafo e associa-se a ele um valor $\alpha(i) \in [0, 1]$, com intuito de satisfazer as condições iniciais para todo fragmento

remanescente i . Logo, temos um subconjunto de fragmentos remanescentes de valores $\alpha(i) > 0$.

Os valores dos fragmentos sobre cada bacia permitem o cálculo de um parâmetro para a bacia entre 0 e 1, que será calculado por meio da seguinte fórmula:

$$B(l) = \frac{\sum \alpha(i) \cdot a(i)}{\sum a(i)} \quad (3.2)$$

Os valores de $B(l)$ dado por (3.2) correspondem à prioridade de preservação das bacias l em relação à paisagem como um todo. O valor específico de $B(l)$ pode dizer algo quanto à forma de se efetivar a conservação naquela bacia.

Tome como exemplo ilustrativo do algoritmo, 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 (Figura 22).

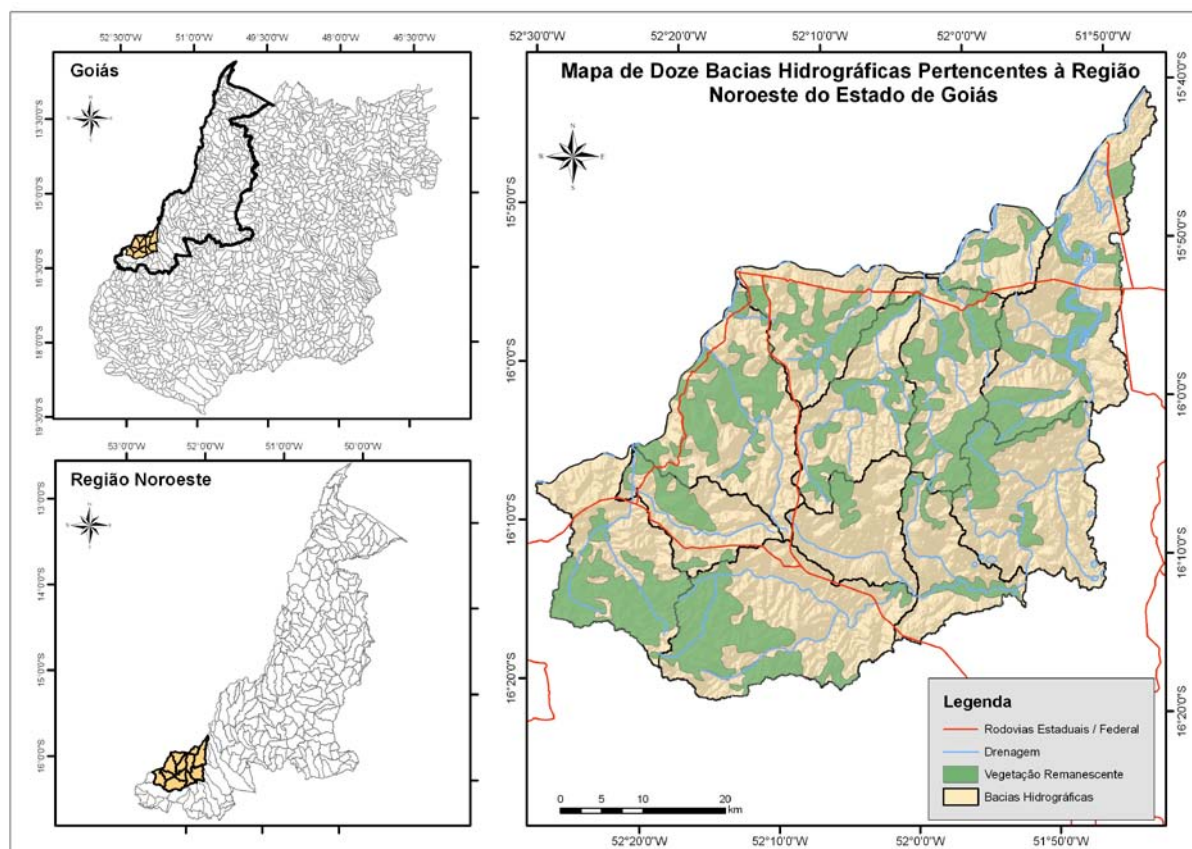


Figura 22. Mapa de 12 bacias pertencentes à Região Noroeste do Estado de Goiás.

Para efeito de simplificação, o banco de dados deste exemplo (Tabela 2), inclui identificação da bacia (nb), identificação do fragmento remanescente (nf), área do fragmento remanescente dentro da bacia (a_i), área do *buffer* dentro da bacia (b_i), razão entre o perímetro e a área do fragmento remanescente (p_i/a_i), preço da terra (P_i), índice de interseção do fragmento remanescente com rodovia (r_i), distância de saída da sub-região (d_i), sub-região hídrica a qual pertence o fragmento remanescente (R), identificação do fragmento remanescente mais próximo rio abaixo (m_i) e identificação do fragmento remanescente mais próximo rio acima (M_i).

Neste caso, como não foram incluídas as variáveis PIB, IDH e espécies, o valor dos parâmetros c_2 , c_3 e c_{10} são nulos.

Tabela 2. Banco de dados para Região Noroeste do Estado de Goiás.

<i>nb</i>	<i>nf</i>	<i>P_i</i>	<i>a_i</i>	<i>b_i</i>	<i>r_i</i>	<i>d_i</i>	<i>R</i>	<i>m_i</i>	<i>M1_i</i>	<i>M2_i</i>	<i>M3_i</i>	<i>p_i/a_i</i>
651	537	2728	1062	0	0.5	-1	0	0	0	0	0	0.013983
651	548	1946	1145	225	0.0	0	0	546	555	0	0	0.021417
651	555	1946	652	37	0.5	1	0	548	570	0	0	0.032257
651	566	1570	1274	54	0.0	3	0	570	0	0	0	0.019079
651	570	1956	3492	783	0.0	2	0	555	566	589	625	0.012572
651	589	1976	4068	285	0.0	3	0	570	0	0	0	0.013922
698	546	1164	694	43	0.0	0	0	0	564	0	0	0.028336
698	557	1164	1107	54	0.0	1	0	546	0	0	0	0.018972
698	566	1164	667	29	0.0	1	0	546	0	0	0	0.032054
716	572	1164	6002	190	0.5	0	1	0	582	0	0	0.016951
716	574	1164	726	1	1.0	-1	1	0	0	0	0	0.020272
720	566	1570	2769	153	1.0	0	1	0	0	0	0	0.016673
720	572	1570	4241	195	0.0	0	1	0	589	0	0	0.018066
720	589	1976	4619	93	0.0	1	1	572	618	0	0	0.015250
723	574	1164	740	105	0.0	0	2	0	582	0	0	0.022940
723	582	1570	9728	228	0.5	1	2	574	615	0	0	0.012711
723	611	1330	1228	7	1.0	2	2	582	0	0	0	0.025867
723	615	1570	582	70	0.0	2	2	582	0	0	0	0.025530
726	572	1570	4236	333	0.5	0	1	0	601	589	0	0.020291
726	601	1976	632	21	0.0	1	1	572	0	0	0	0.018510
726	614	1976	1352	56	0.0	2	1	601	0	0	0	0.022584
758	589	1976	4937	206	0.0	3	0	570	0	0	0	0.016052
758	625	2306	1140	70	0.0	4	0	570	646	0	0	0.018095
767	633	1495	724	86	0.0	1	3	611	641	0	0	0.017787
767	641	1736	11328	335	0.0	2	3	633	0	0	0	0.010139
770	611	1545	3303	32	0.5	0	3	0	0	0	0	0.015374
770	641	1736	559	0	0.5	-1	3	0	0	0	0	0.033796
788	614	1976	1416	0	0.0	-1	0	0	0	0	0	0.017282
789	589	1976	657	16	0.0	3	0	570	0	0	0	0.037852
789	618	1976	553	35	0.0	6	0	646	0	0	0	0.026777
789	646	2143	1800	307	0.0	5	0	625	649	0	0	0.020392
796	641	1736	10490	452	0.0	7	0	666	0	0	0	0.007345
796	649	1976	554	47	0.0	6	0	646	666	641	0	0.028756
796	665	1976	946	0	0.0	-1	0	0	0	0	0	0.022544
796	666	1736	2092	53	0.0	7	0	649	641	0	0	0.016322

Atribuindo valores aos parâmetros de peso $c_1 = 2000$, $c_4 = 60$, $c_5 = 40000$, $c_6 = 5000$, $c_7 = 16000$, $c_8 = 1000$, e $c_9 = 5$ que foram obtidos por meio de estudos sobre a função-objetivo, de forma que cada fator desta função tenha peso de acordo com a seguinte meta de conservação, i.e. priorização dos ambientes ripários, dos maiores remanescentes e da maior conectividade entre as áreas. Temos o seguinte problema de PNL:

$$\begin{aligned} \text{Min} \sum & \left[- \left(\frac{2000}{P_i} \right) \cdot (1 - \alpha(i)) a_i - 60 \cdot (1 - \alpha(i)) b_i + 100000 \cdot \left(\frac{P_i}{a_i} \right) - 3000 \cdot \beta(i) + \right. \\ & \left. 12000 \cdot r_i - 1000 \cdot d_i + \frac{0.25 b_i^T D b_i}{(g^2(i) - g(i))} \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\text{s.a. } \sum \alpha(i) \cdot a_i \geq 58600$$

Denote o nó do digrafo referente ao fragmento de vegetação remanescente i da bacia l pelo par ordenado (nf, nb) .

Inicialmente $\alpha(i) = 0$ e $\beta(i) = 0$ para qualquer fragmento remanescente i . O valor inicial do somatório $\sum \alpha(i) a_i$ é zero.

Na primeira iteração, depois de avaliar a função-objetivo de (3.3) em cada fragmento remanescente i , entra na solução o fragmento remanescente (570, 651) com índice de importância igual a 0,25, cuja função-objetivo possui o valor mínimo. Assim, $\alpha(570, 651) = 0,25$ e $\beta(555, 651) = \beta(566, 651) = \beta(589, 651) = \beta(566, 698) = \beta(566, 720) = \beta(589, 720) = \beta(589, 758) = \beta(625, 758) = \beta(589, 789) = 0,25$ (Figura 23). Como foi incluído um fragmento remanescente da sub-região hídrica 0 na solução, então $g(x) = 1$ para todos os fragmentos desta sub-região. Com $\alpha(570, 651) = 0,25$, o somatório $\sum \alpha(i) a_i$, ou seja a área selecionada para a solução é igual a 873 ha.

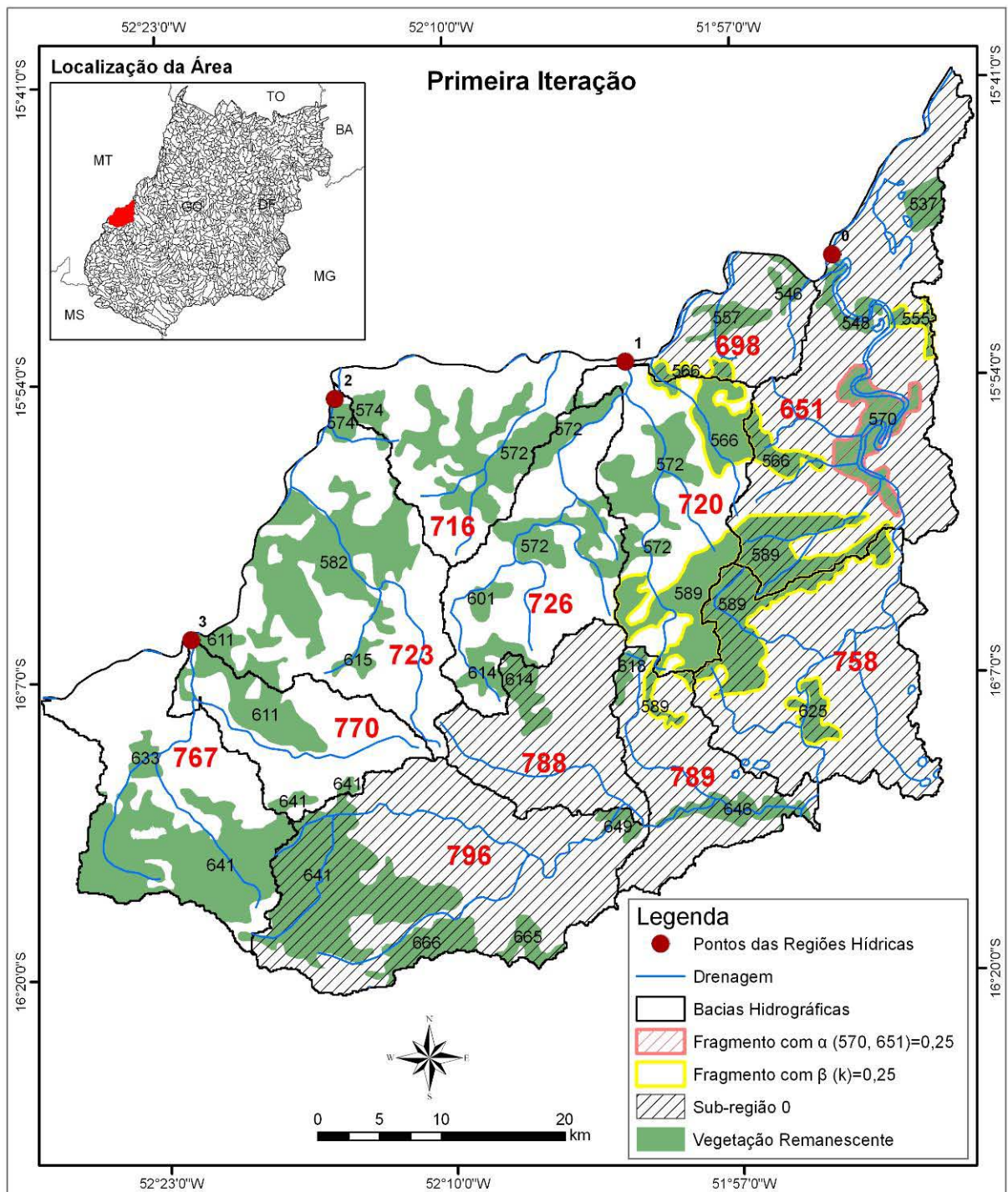


Figura 23. Primeira Iteração: Mapa do fragmento remanescente incluído na solução e de seus adjacentes correspondentes.

Na segunda iteração é incluído o fragmento (641,796) na solução. Logo, o valor de $\alpha(570, 651) = \alpha(641, 796) = 0,25$ e de $\beta(555, 651) = \beta(566, 651) = \beta(589, 651) = \beta(566, 698) = \beta(566, 720) = \beta(589, 720) = \beta(589, 758) = \beta(625, 758) = \beta(589, 789) = \beta(666, 796) = 0,25$ (Figura 24). Como os fragmentos (570, 651) e (641,796) pertencem à mesma sub-região

hídrica, então $g(x)$ passa ser 2 para todo fragmento da sub-região hídrica 0. Agora com (570, 651) = $\alpha(570, 651) = 0,25$, o valor do somatório $\sum \alpha(i)a_i$ é 3.495,5 ha.

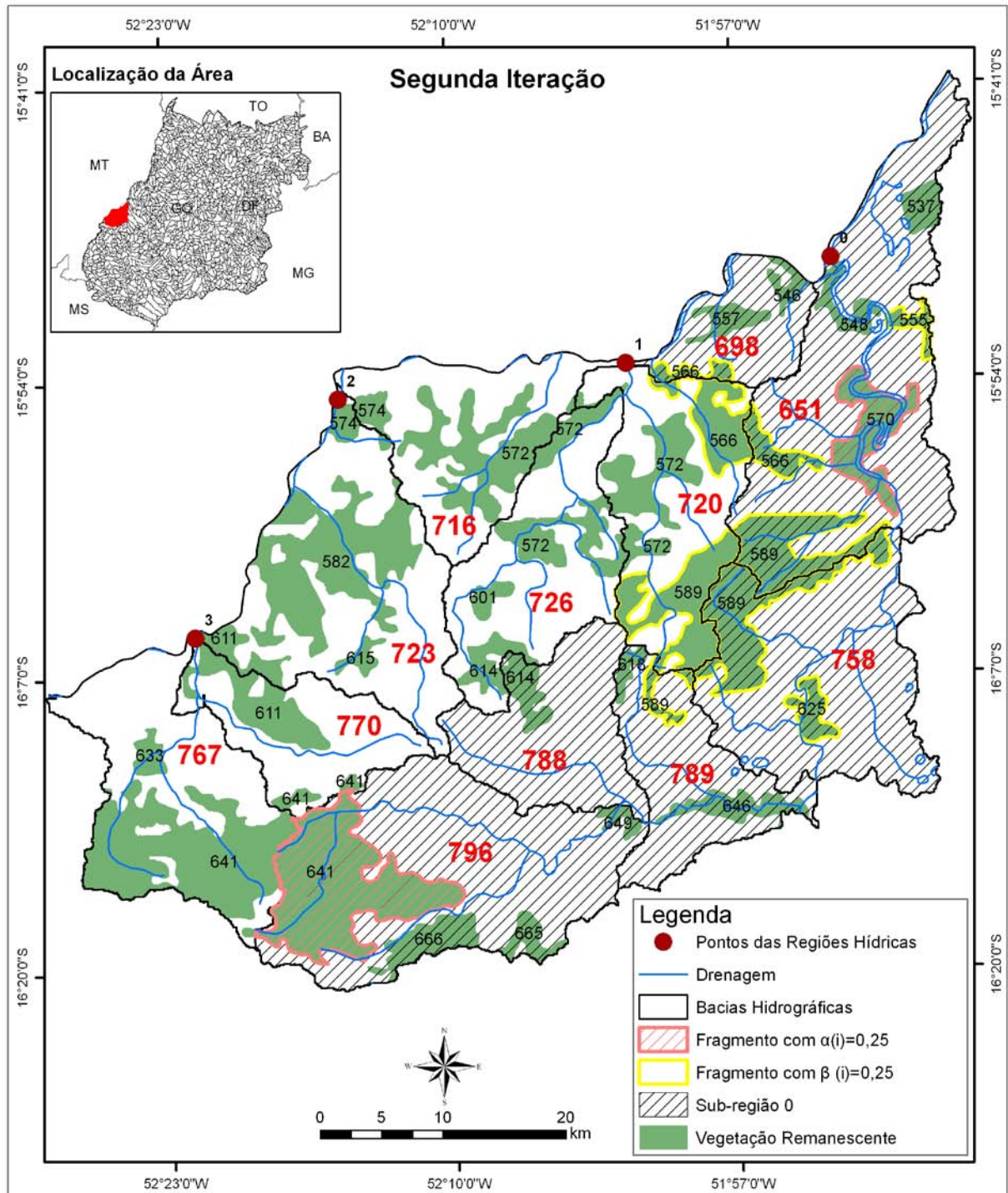


Figura 24. Segunda Iteração: Mapa do fragmento remanescente incluso na solução e de seus adjacentes correspondentes.

Na terceira iteração não há inclusão de outro fragmento na solução, mas o valor de $\alpha(570, 651)$ passa ser 0,5 e conseqüentemente $\beta(555, 651) = \beta(566, 651) = \beta(589, 651) = \beta(566, 698) = \beta(566, 720) = \beta(589, 720) = \beta(589, 758) = \beta(625, 758) = \beta(589, 789)$ passam ser 0,5 e $\alpha(641, 796)$ permanece sendo 0,25, o que implica $\beta(666, 796)$ também permanecendo 0,25 (Figura 25).

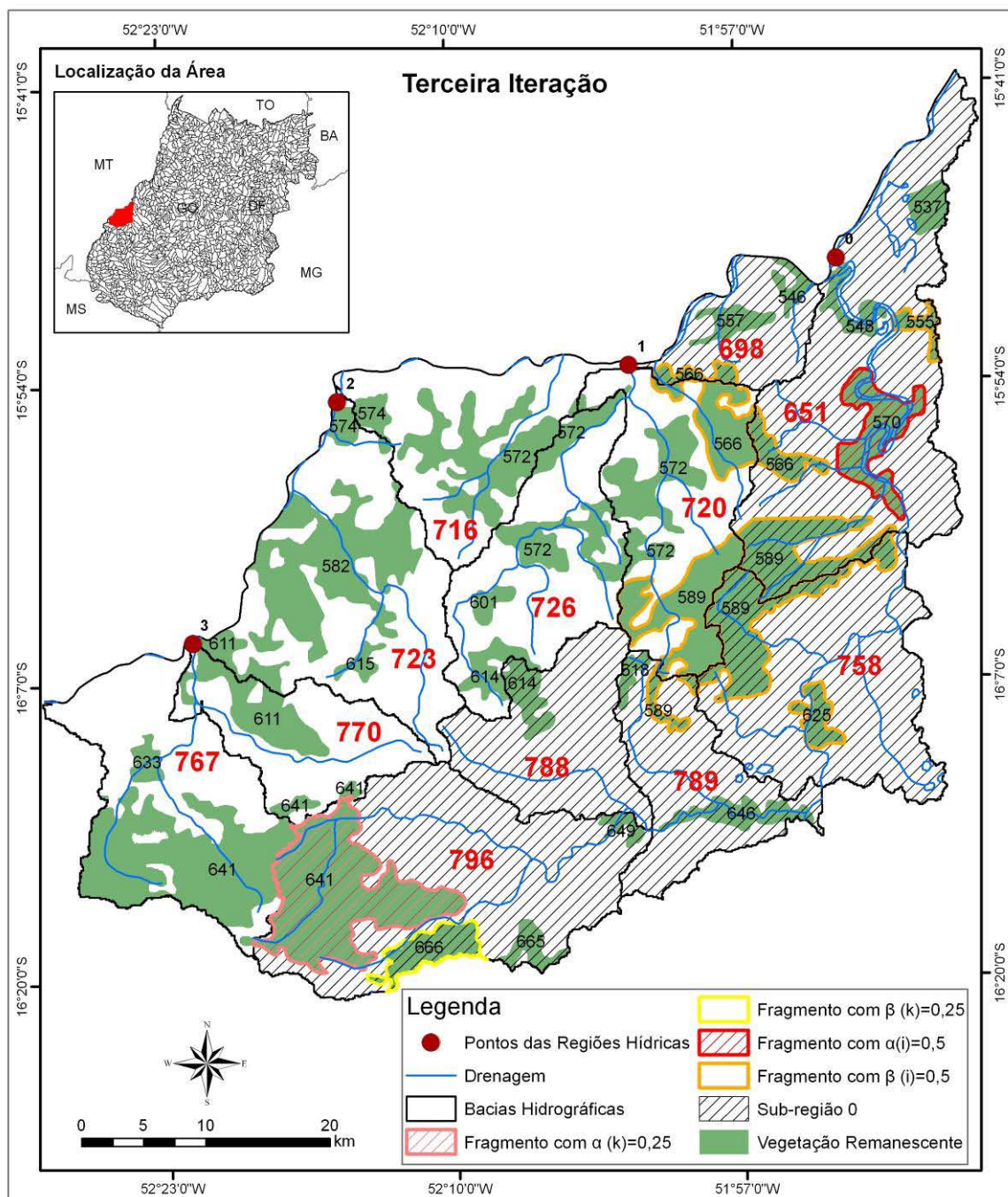


Figura 25. Terceira Iteração: Mapa dos fragmentos remanescentes inclusos na solução e de seus adjacentes correspondentes.

Nesta iteração, como não foi incluso nenhum outro fragmento remanescente na sub-região 0, $g(x)$ permanece sendo 2. No final desta iteração, com $\alpha(641, 796)=0,25$ e $\alpha(570, 651)= 0,5$, o valor do somatório $\sum \alpha(i)a_i$ aumentou para 4.368,5 ha.

A quarta iteração incluiu outro fragmento de vegetação remanescente (641, 767) na solução (Figura 26). Logo, tem-se $\alpha(570, 651) = 0,5$, $\alpha(641, 767) = \alpha(641, 796) = 0,25$, $\beta(555, 651) = \beta(566, 651) = \beta(589, 651) = \beta(566, 698) = \beta(566, 720) = \beta(589, 720) = \beta(589, 758) = \beta(625, 758) = \beta(589, 789) = 0,5$ e $\beta(666, 796)=\beta(633, 767)=0,25$.

Observe que nesta iteração o índice de importância dos fragmentos remanescentes (641, 767) e (641, 796) são iguais, e que $g(x)$ é igual a 2 para todos os fragmentos da sub-região 0 e 1 para todos os fragmentos da sub-região 3. Logo, o valor do somatório $\sum \alpha(i)a_i$ passa ser 7.200,5 ha.

$651) = \alpha(589, 651) = \alpha(589, 720) = \alpha(589, 758) = \alpha(641, 767) = \alpha(641, 796) = 1$. Note que os fragmentos remanescentes cujo α é igual a 1 possuem o maior índice de importância para inclusão em proposta de conservação e estão destacados na Figura 27 na cor vermelha.

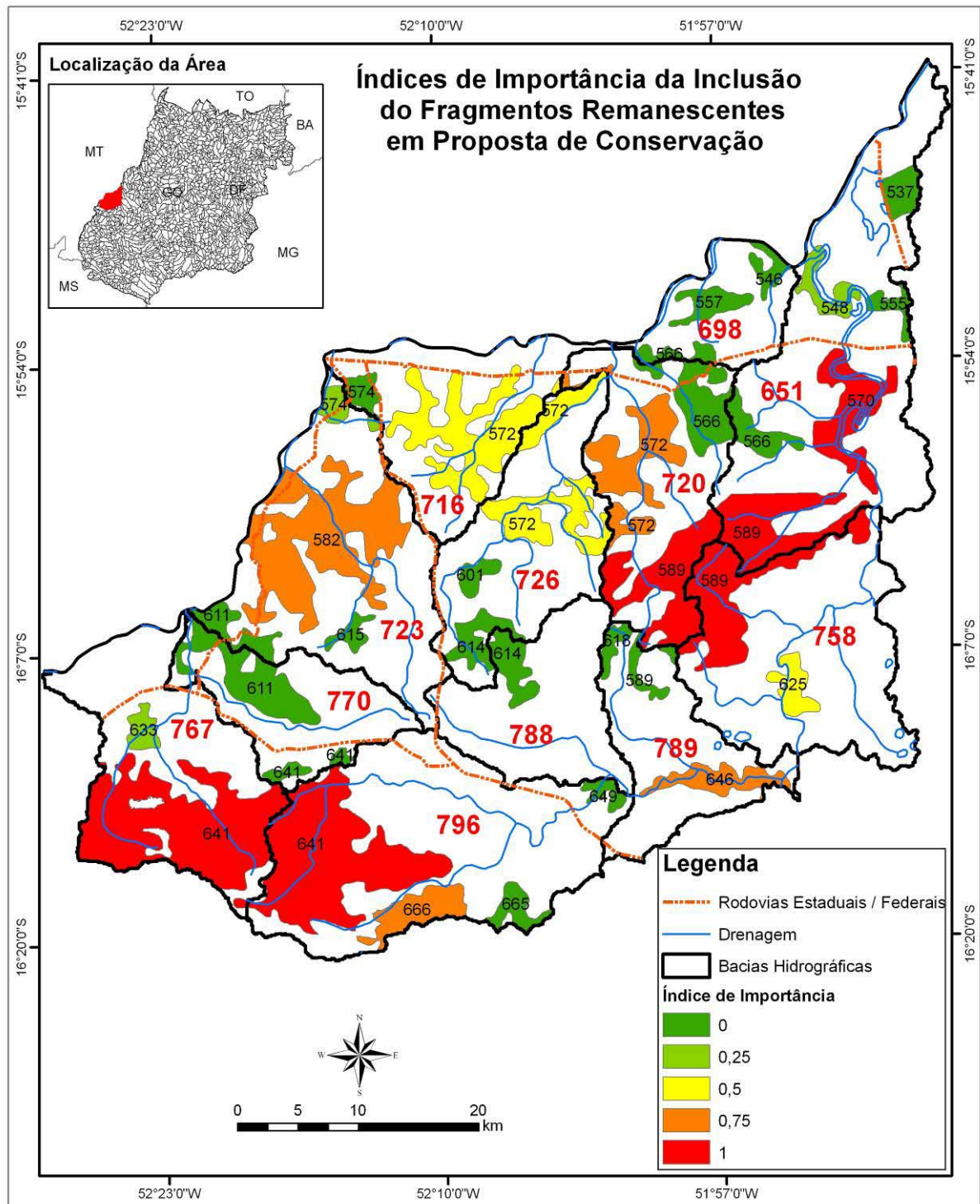


Figura 27. Mapa dos índices de importância da inclusão dos fragmentos remanescentes em proposta de conservação.

Através da solução encontrada para os fragmentos remanescentes, obtém-se também a solução em termos de bacia (Figura 28). 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.

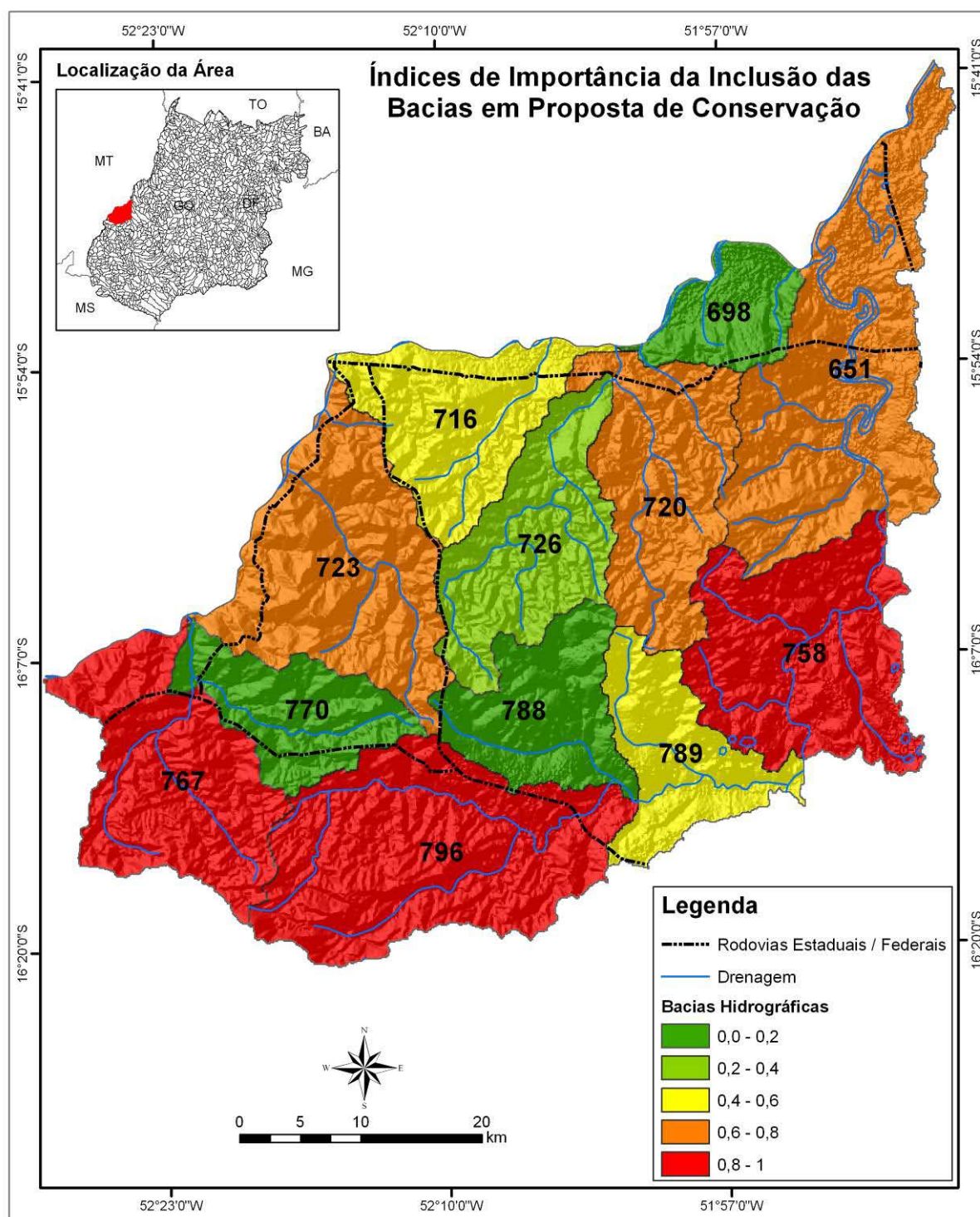


Figura 28. Mapa dos índices de importância da inclusão das bacias hidrográficas em proposta de conservação.

Logo, temos um índice que indica a importância de inclusão de cada bacia na solução com os seguintes valores: $B(651) = 0,67$; $B(716) = 0,45$; $B(720) = 0,67$; $B(723) = 0,61$; $B(726) = 0,34$; $B(758) = 0,91$; $B(767) = 0,96$; $B(789) = 0,45$; $B(796) = 0,86$.

Observe na Figura 28 que o índice de importância de inclusão das bacias hidrográficas é um valor contínuo que varia de 0 a 1 que, neste exemplo, foi dividido em cinco intervalos iguais para gerar um mapa com cinco cores, onde cada cor representa um intervalo de importância. Neste exemplo, a solução apresenta quatro bacias de alta importância na proposta de conservação, que são as bacias de número 758, 767 e 796.

Para a implementação deste algoritmo foi utilizado o *software* Scilab 4.1.2. por ser um software gratuito, possuir uma boa referência, ser usado internacionalmente em linguagem de programação matemática e de fácil implementação. Quanto ao tratamento e análise cartográfica dos dados, utilizou-se a plataforma ArcGis 9.3. É importante ressaltar que o tempo de execução deste algoritmo para a seleção de áreas prioritárias para conservação em Goiás e no Distrito Federal foi em média de trinta minutos.

CAPÍTULO 4

Resultados e Conclusões

Considerando a acentuada dinâmica espaço-temporal do uso e ocupação da terra no Cerrado goiano, o modelo matemático de seleção de áreas prioritárias para conservação apresentado no Capítulo 3, é de utilidade maior do que outros que aparecem na literatura (veja Capítulo 1), fornece informações mais rápidas, simplificadas e melhor aplicadas, possibilitando, da forma mais automatizada quanto possível, a mudança de cenários, conforme a análise dos dados de conservação em relação às variáveis sociais, econômicas e biológicas envolvidas.

Aplicando o modelo para todo estado de Goiás, apresentamos três soluções com e sem dados de biodiversidade, onde avaliamos a sensibilidade da solução quanto à variação dos seus parâmetros, o que poderá auxiliar os gestores com vistas à elaboração e/ou aperfeiçoamento de políticas públicas para priorização de áreas para conservação.

Para a primeira solução (Solução 1) temos como parâmetros básicos: $c_1 = 2.000$, $c_2 = 20.000$, $c_3 = 0,2$, $c_4 = 20$, $c_5 = 100.000$, $c_6 = 1.000$, $c_7 = 12.000$, $c_8 = 1.000$ e $c_9 = 0,25$, onde consideramos dois enfoques: um sem dados de biodiversidade ($c_{10} = 0$) e outro com dados de biodiversidade ($c_{10} = 2000$).

Atribuímos um valor absoluto para o parâmetro K correspondente ao produto de um peso de valor aproximado a 0,7 e a área das regiões mais conservadas, e de outro peso de valor aproximado 0,5 e a área das menos conservadas, estabelecendo assim, uma meta de priorização das áreas. Averiguamos que para uma meta de priorização baixa, ou seja, para valores pequenos de K, a solução do problema sofre maior influência na variação dos outros

parâmetros, do que para uma meta de priorização alta, i.e. para valores de K grande. Além disso, observamos que para valores grandes de K o tempo de execução do algoritmo proposto para encontrar a solução foi maior.

Nesta solução, em que pouco peso foi dado aos parâmetros referentes aos ambientes ripários e a conectividade (vizinhança) entre os remanescentes não se observam, no que diz respeito à importância dos fragmentos remanescentes na proposta de conservação, diferenças significativas, quanto a inclusão ou não da biodiversidade, o que pode ser atribuído principalmente, a pouca representatividade espacial dos dados de biodiversidade (BINI et al., 2006) e à elevada proporção de vegetação remanescente nas áreas de coleta. A observação da Solução 1 sem e com biodiversidade (Figuras 29 e 30 e Apêndices A e B). A Figura 31 corrobora a diferença mínima entre estas soluções.

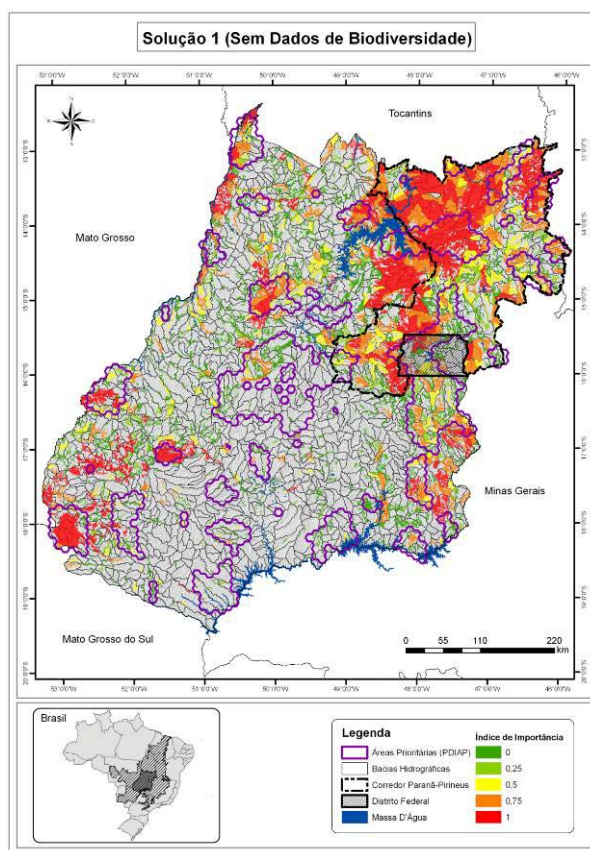


Figura 29. Solução 1 - nível de importância dos fragmentos de vegetação remanescente sem dados de biodiversidade.

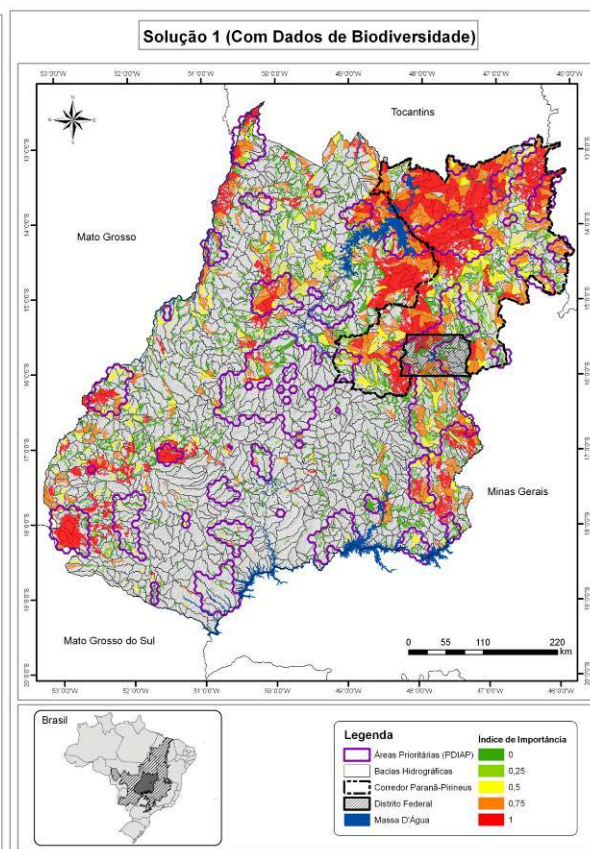


Figura 30. Solução 1 - nível de importância dos fragmentos de vegetação remanescente com dados de biodiversidade.

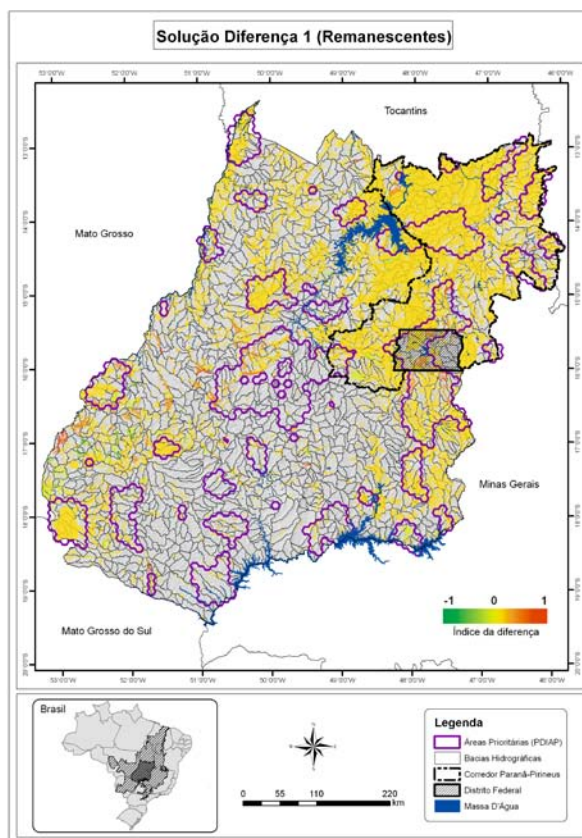


Figura 31. Solução Diferença 1 - nível de importância dos fragmentos de vegetação remanescentes.

Ao considerarmos a Solução 1, referente ao nível de importância das bacias na proposta de conservação, sem e com dados de biodiversidade (Figuras 32 e 33, respectivamente), podemos concluir que a solução diferença (Figura 34) se dá devido a existência de espécies em vegetação remanescentes em áreas mais degradadas, o que influencia diretamente na solução em termos de bacias. Portanto, esta diferença é mais significativa em termos de bacia (Figura 34) do que a solução diferença em termos de vegetação remanescente (Figura 31).

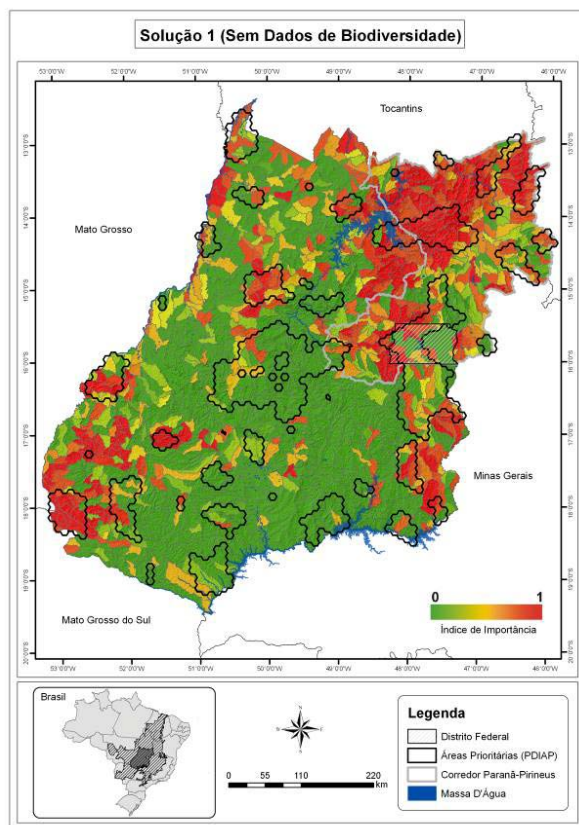


Figura 32. Solução 1 - nível de importância das bacias sem dados de biodiversidade.

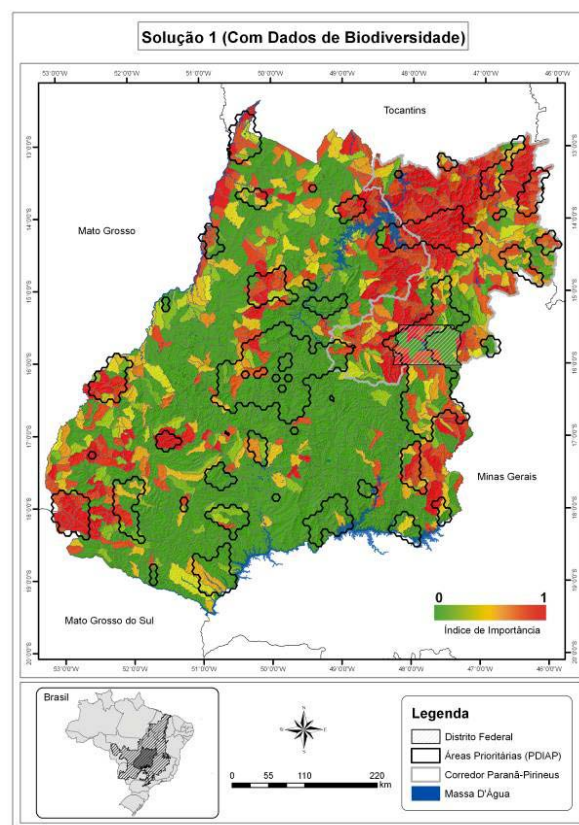


Figura 33. Solução 1 - nível de importância das bacias com dados de biodiversidade.

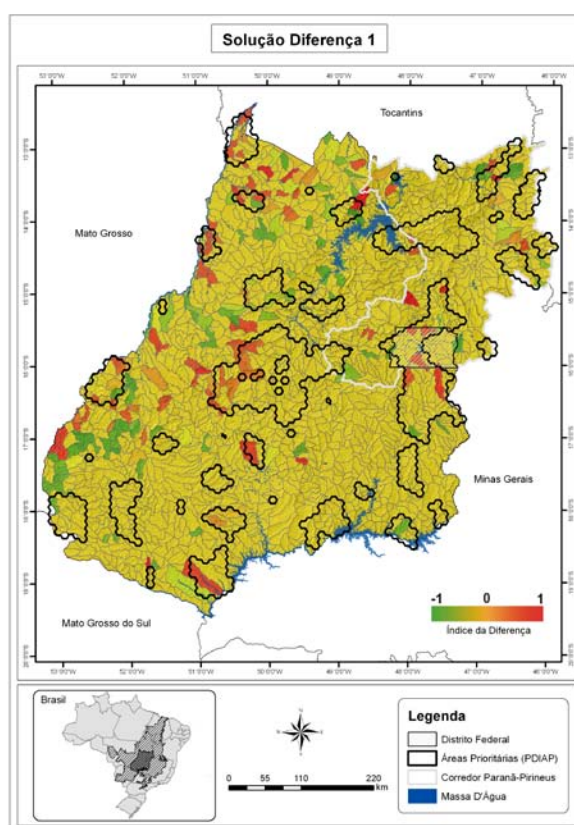


Figura 34. Solução Diferença 1 - nível de importância das bacias.

Quanto à variação dos parâmetros, verificamos que as soluções encontradas apresentam maior sensibilidade quando variamos principalmente os parâmetros que multiplicam as variáveis: b_i (*buffer*) e o $\beta(i)$ (vizinhança e conectividade).

As Figuras 35 e 36 representam a solução com e sem dados de biodiversidade, respectivamente (Solução 2), nas quais é variado o parâmetro do *buffer* ($c_4 = 60$). Neste caso, o aumento deste parâmetro resulta em mudanças na solução, tanto para o nível de importância dos remanescentes, quanto para o nível de importância das bacias, priorizando os ambientes ripários mais intactos.

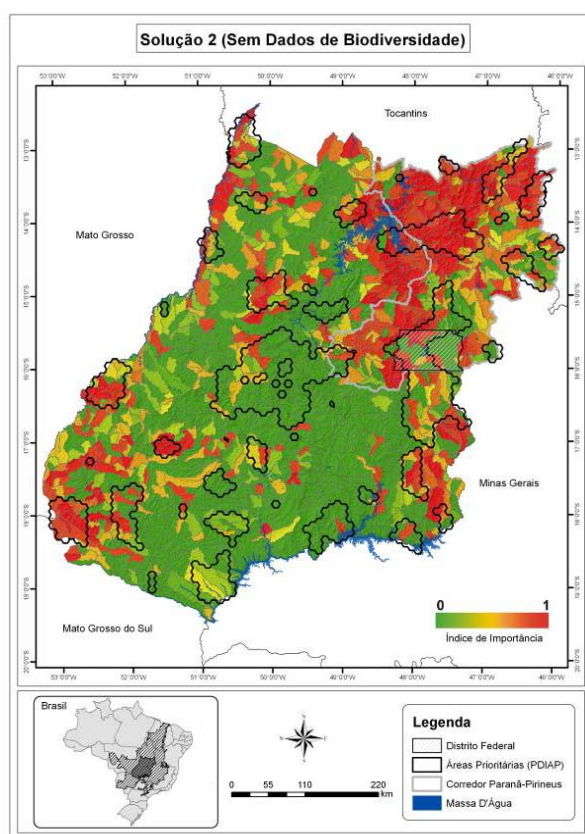


Figura 35. Solução 2 - nível de importância das bacias sem dados de biodiversidade.

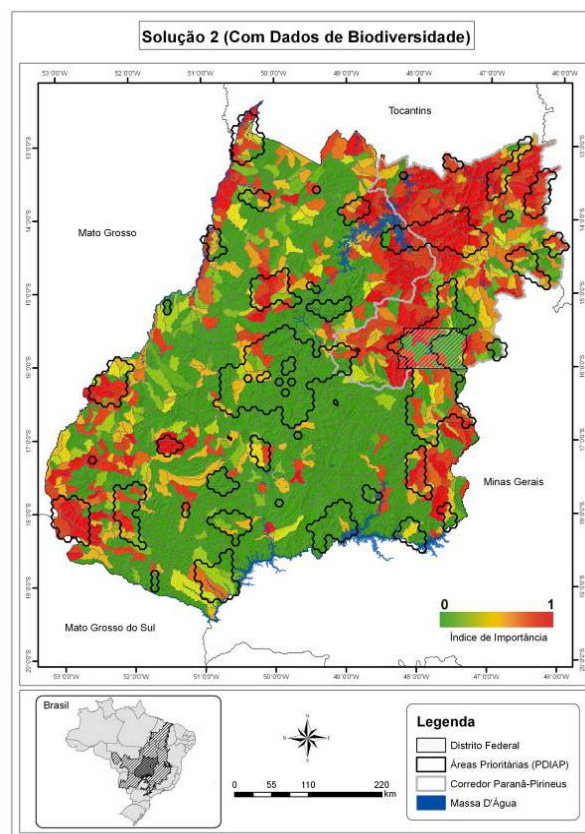


Figura 36. Solução 2 - nível de importância das bacias com dados de biodiversidade.

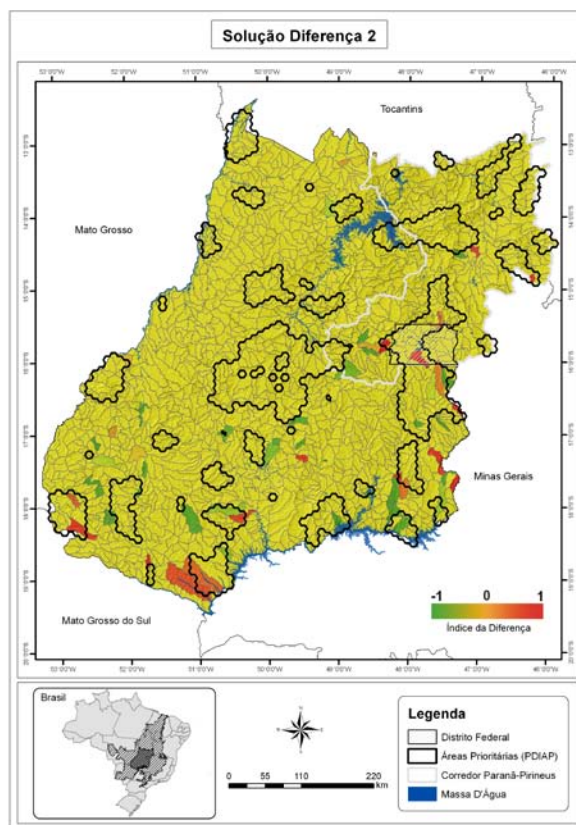


Figura 37. Solução Diferença 2 - nível de importância das bacias.

Conforme sugere a Figura 37, existe uma relação entre espécies, principalmente da fauna, e os ambientes ripários. Assim, com a valorização destes ambientes, há uma diminuição da diferença entre a solução sem e com dados de biodiversidade.

As Figuras 38 e 39, respectivamente representam a Solução 3, com e sem dados de biodiversidade, para quando se omite o parâmetro β ($c_6 = 0$), que está relacionado com vizinhança e conectividade entre áreas. Constatamos que, tanto no nível de importância dos remanescentes quanto no nível de importância das bacias, houve uma maior fragmentação das áreas selecionadas, principalmente na Região Sudeste, região de maior degradação ambiental. Neste caso, a diferença da Solução 3 (Figura 40) sem e com biodiversidade torna-se mais significativas do que na Solução 2 (Figura 37).

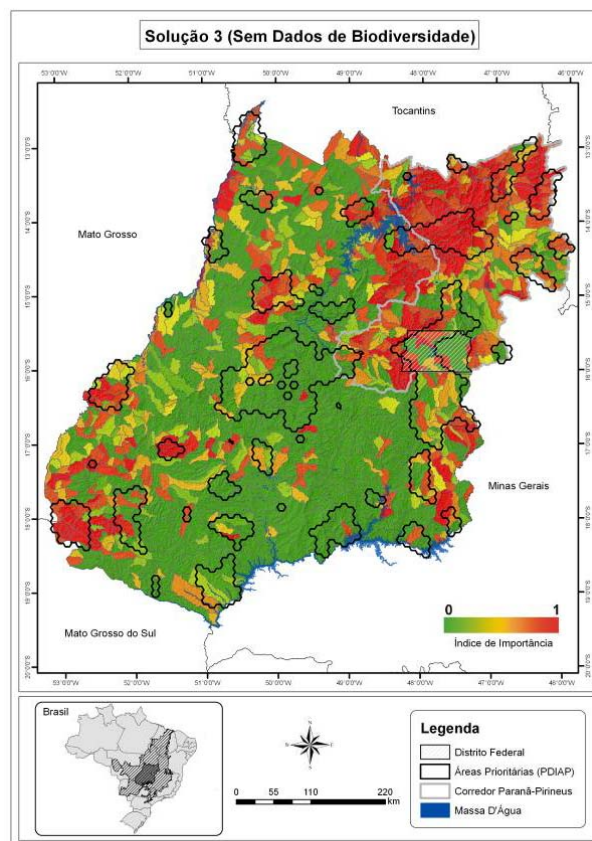


Figura 38. Solução 3 - nível de importância das bacias sem dados de biodiversidade.

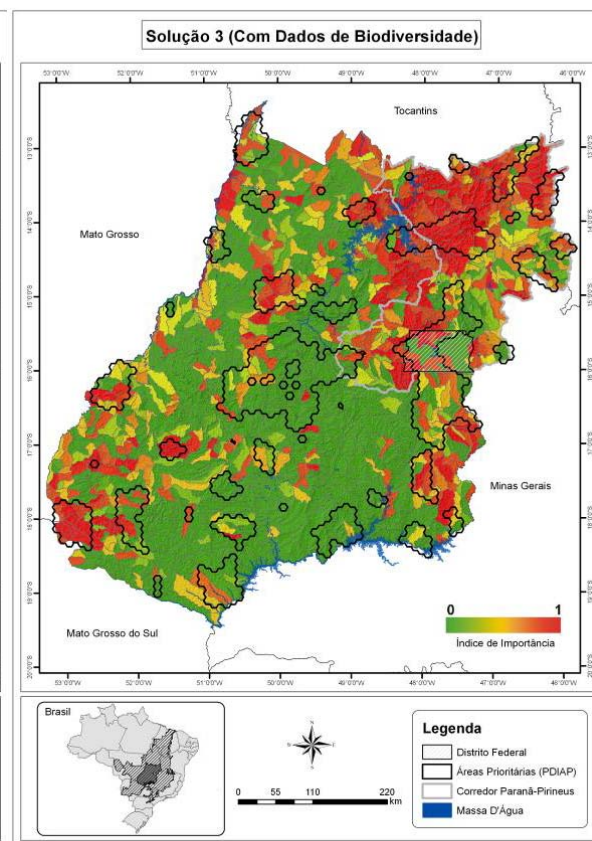


Figura 39. Solução 3 - nível de importância das bacias com dados de biodiversidade.

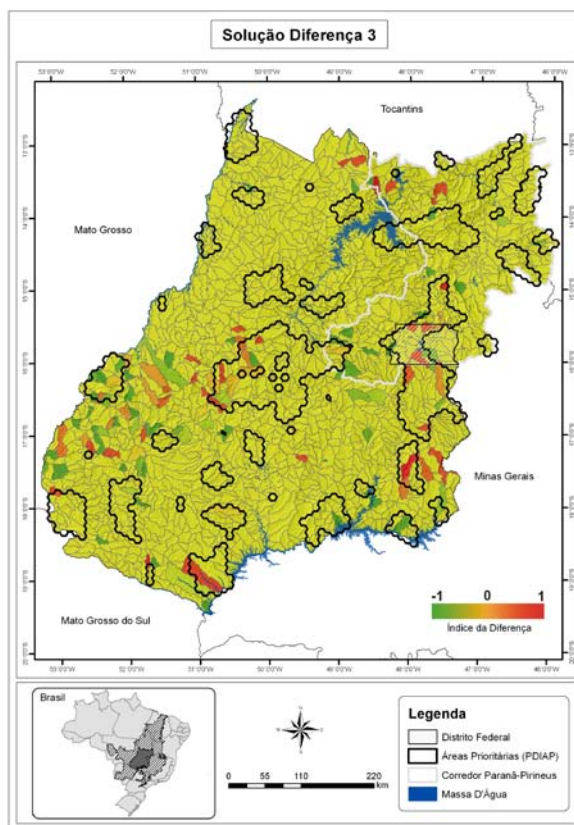


Figura 40. Solução Diferença 3 - nível de importância das bacias.

Em termos de distribuição das áreas selecionadas, em relação ao nível de importância das bacias, nas três soluções apresentadas acima, sem considerar os dados de biodiversidade, verifica-se que a área das bacias com nível de importância maior que 70% correspondem aproximadamente a 50% da área de todas as bacias com algum nível de importância, ou seja maior que zero (Figuras 41 a 43). Além disso, em qualquer uma das três soluções, estas áreas possuem mais de 67,1% de vegetação remanescente.

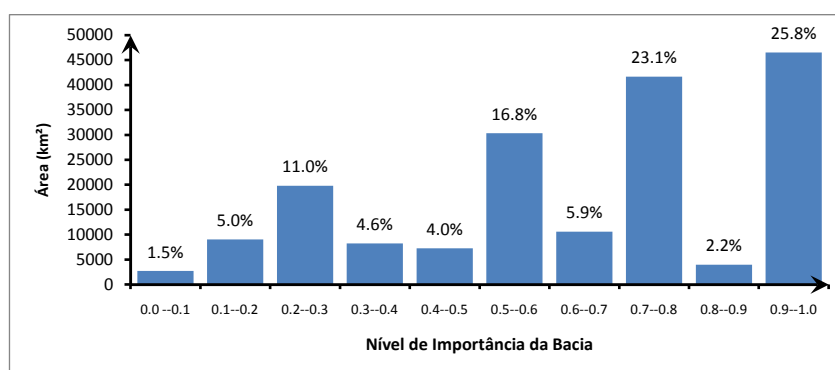


Figura 41. Distribuição das áreas selecionadas em função do nível de importância da bacia na Solução 1.

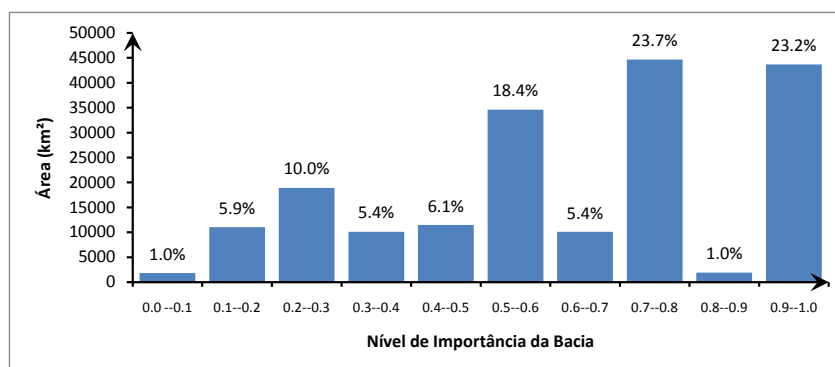


Figura 42. Distribuição das áreas selecionadas em função do nível de importância da bacia na Solução 2.

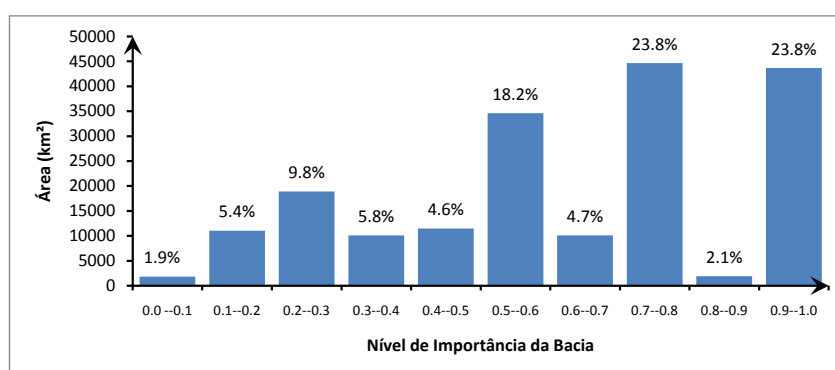


Figura 43. Distribuição das áreas selecionadas em função do nível de importância da bacia na Solução 3.

Comparando-se diretamente as três soluções (sem dados de biodiversidade) (Figura 44), concluímos que não há diferenças significativas entre a área total selecionada para cada classe de importância.

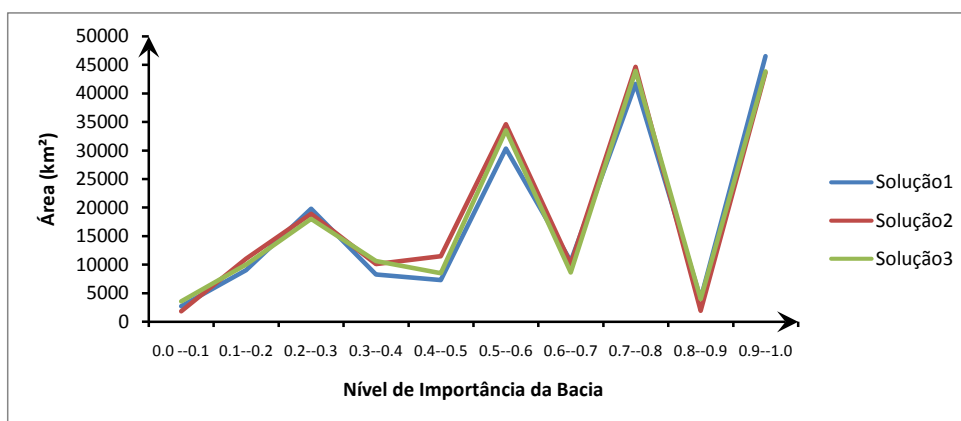


Figura 44. Comparação das três soluções (sem dados de biodiversidade).

Da mesma forma, também é importante ressaltar que a solução sem os dados de biodiversidade é bastante próxima da solução com dados de biodiversidade (para um mesmo parâmetro) (ver Figuras 34, 37 e 40). Isto sugere, que na área de estudo (Estado de Goiás e Distrito Federal) a biodiversidade influencia pouco na seleção de paisagens, pois grande parte destas se encontram em grandes áreas remanescentes com elevada porcentagem de ambientes ripários, priorizados pelo nosso modelo. Verificamos também que, em ambas as soluções (sem e com biodiversidade), as regiões altamente fragmentadas não são selecionadas.

Por outro lado, verificamos que o nosso modelo proporcionou a formação de corredores naturais ou a sua viabilidade (econômica e ecológica) nas três soluções, com e sem dados de biodiversidade.

Os resultados destas três soluções são algumas alternativas de novos cenários, haja vista que até no momento existia apenas o cenário das 40 áreas prioritárias definidas por Scaramuzza et al. (2008) para Goiás, no qual observamos uma boa concordância entre as áreas de maior importância selecionadas pelo modelo proposto nesta tese e as áreas prioritárias com elevada proporção de vegetação remanescente indicadas por eles.

É interessante destacar que os aproximadamente 82.279 km² destas 40 áreas prioritárias (das quais, apenas 42% são de vegetação remanescente – LOBO & FERREIRA, 2008), equivalem, para qualquer uma das nossas três soluções, as áreas das bacias com nível de importância igual ou superior a 70%, (Figura 45).

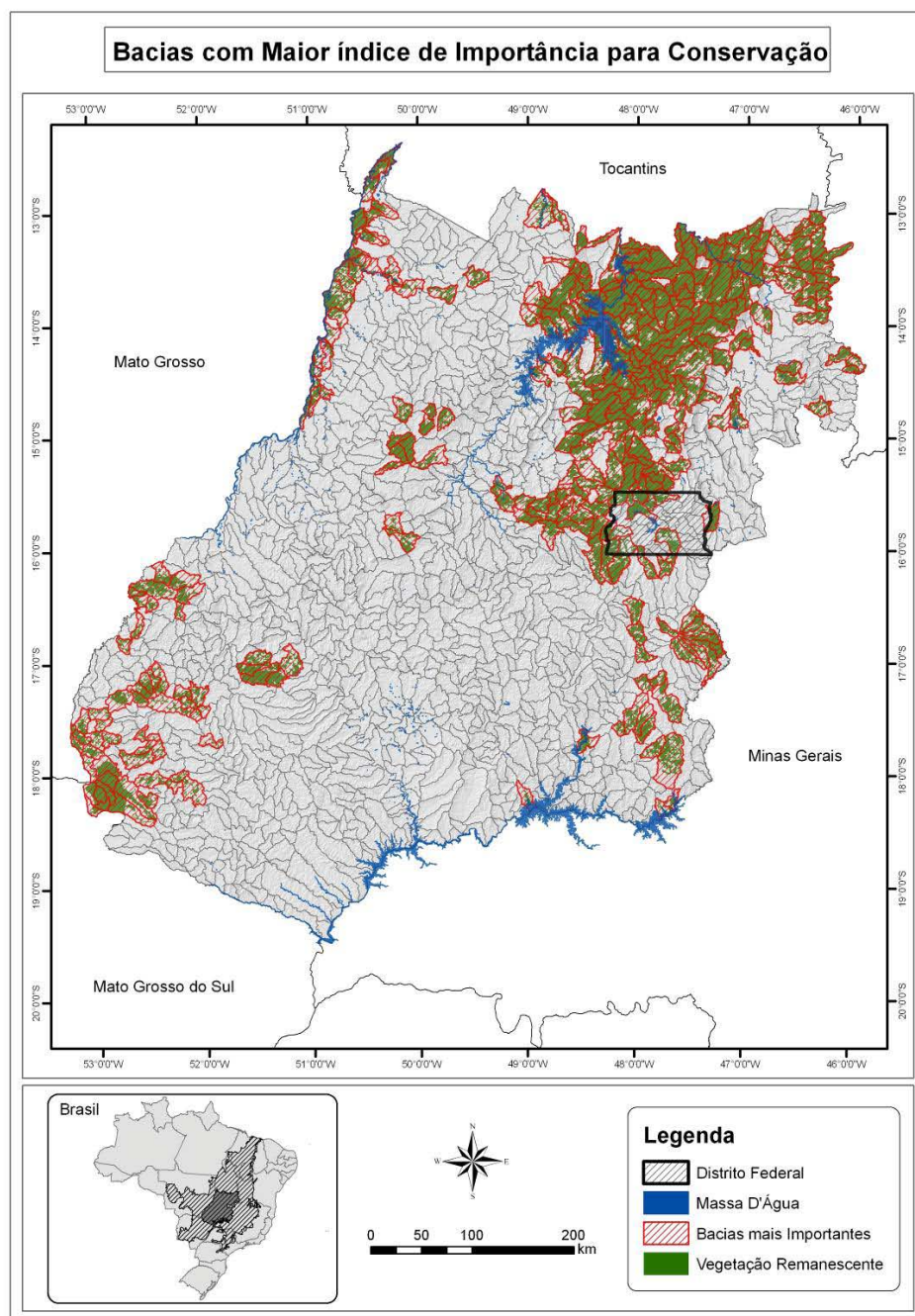


Figura 45. Área das bacias (Solução 1 - sem dados de biodiversidade), com maior nível de importância que correspondem aproximadamente 82.000 km².

CAPÍTULO 5

Considerações Finais

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 (e.g. paisagem e espécies), forte enfoque na distribuição potencial da biodiversidade e unidades de aplicação imaginárias (e.g. 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 os 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, a solução que possui elevado índice de ambientes ripários e de vegetação remanescente, e que valoriza a vizinhança e a conectividade entre as áreas remanescente, ao mesmo tempo, minimiza os efeitos das variáveis antrópicas sobre a conservação destas áreas.

Assim, consideramos a solução ótima do problema com e sem dados de biodiversidade, tomando os parâmetros $c_4 = 60$ e $c_6 = 3.000$ (Figuras 46 e 47 respectivamente), pois

valorizando estes parâmetros, estamos priorizando os ambientes ripários e a conectividade entre as áreas.

Para facilitar a visualização das diferenças entre a solução com e sem dados de biodiversidade (Figuras 46 e 47, respectivamente) em termos de nível de importância das bacias, a Figura 48 mostra a diferença entre estas soluções. A pequena diferença das soluções com e sem a inclusão dos dados de biodiversidade sugere, acima de tudo, uma premente necessidade de coletas mais sistemáticas e espacialmente representativas, que ressaltem, ao invés de mascarar, as intrínsecas peculiaridades e inter-dependências entre paisagem e biota.

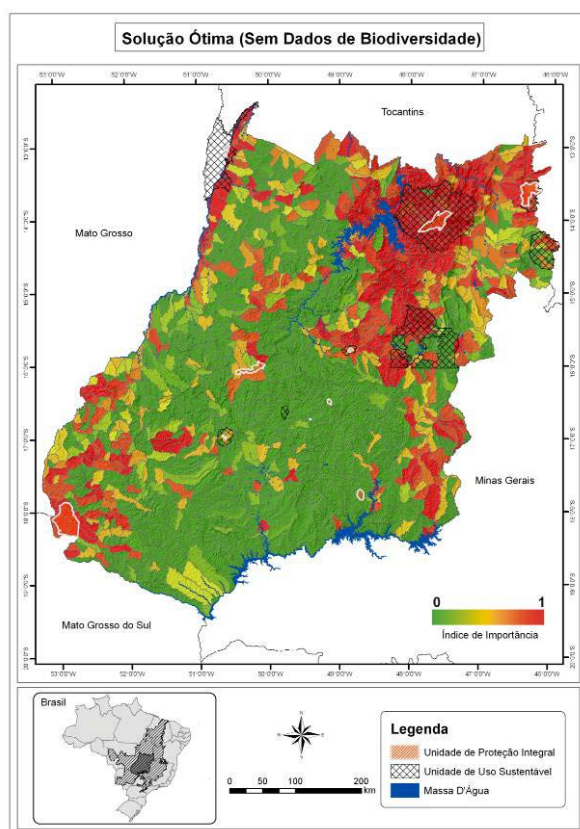


Figura 46. Solução Ótima - nível de importância das bacias sem dados de biodiversidade.

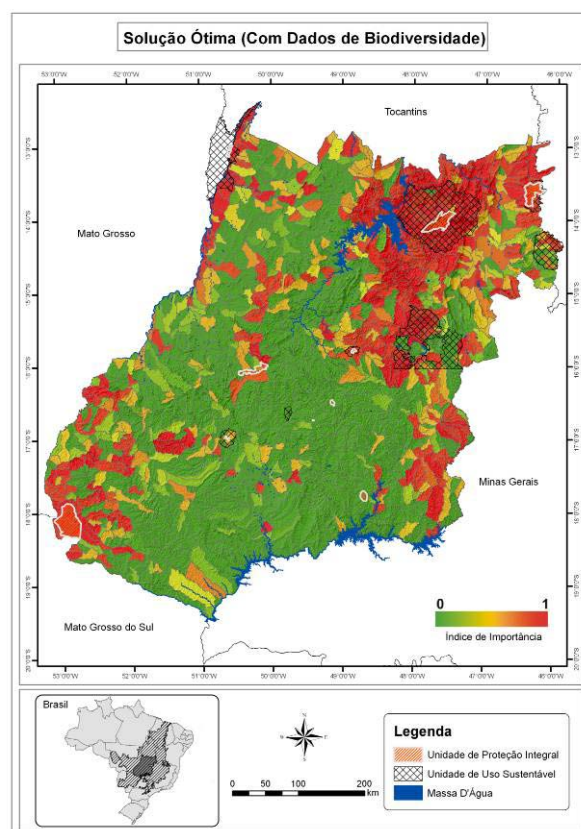


Figura 47. Solução Ótima - nível de importância das bacias com dados de biodiversidade.

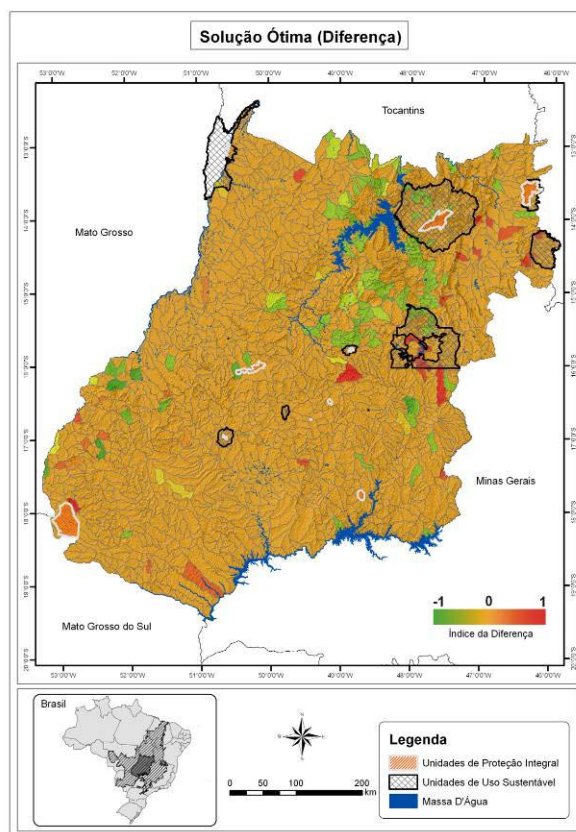


Figura 48. Mapa da diferença entre a solução ótima com e sem dados de biodiversidade.

A solução ótima (Figura 47) mostra 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 a nascente do Rio Araguaia (ver Figura 47 e Apêndice C). Além disso, esta solução viabiliza a implantação de corredores, tanto no aspecto biológico, como econômico, em algumas regiões do Estado. Por exemplo, a conexão da Região Noroeste com a Região Nordeste, e o adensamento das unidades de proteção existentes, haja vista que a maioria das unidades de conservação integral e das unidades de conservação de uso sustentável existentes coincide com as áreas de maior nível de importância desta solução (Figura 47).

Assim, o modelo matemático proposto pode contribuir tanto para valorização das áreas de vegetação remanescente para proposta de conservação, como para otimizar a restauração de áreas degradadas, principalmente de ambientes ripários, que favorecem a sua interligação.

Os dois enfoques de aplicação do modelo matemático não são mutuamente excludentes. Pelo contrário, podem ser complementares. Assim, uma próxima etapa da pesquisa prevê o aprimoramento do modelo matemático, com a introdução de novas variáveis antrópicas (e.g. agricultura e pecuária) e a maior valorização de parâmetros relacionados com os ambientes ripários e os fragmentos de vegetação remanescentes ainda existentes, tendo como intuito otimizar a restauração de áreas degradadas no Estado de Goiás.

Sugere-se também a aplicação deste modelo para todo o Cerrado, com vistas à otimização das principais áreas prioritárias para conservação e da restauração de áreas degradadas, que são importantes para manutenção de serviços ambientais.