

## Capítulo 6

### Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta os resultados obtidos pela aplicação das duas etapas de métodos propostos no capítulo 5 e uma discussão sobre esses resultados. Assim como a base de dados utilizada, os resultados gerados estão na escala de 1:10.000.

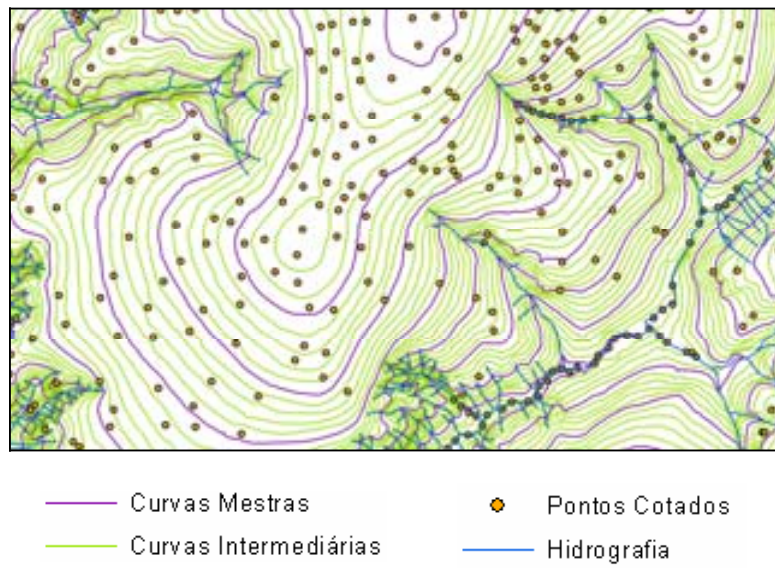
#### 6.1 - Aplicação da EUPS

As estimativas de erosão atual e de erosão potencial, no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto, foram calculadas aplicando-se a EUPS, seguindo o esquema apresentado na figura 5.2 (página 61), adotando-se o fator LS modificado disponível na equação 5 (página 66) e a seqüência de passos exposta na figura 5.4 (página 65). Esses resultados, bem como seus respectivos mapas e a geração de cada um dos parâmetros da EUPS são apresentados neste sub-capítulo.

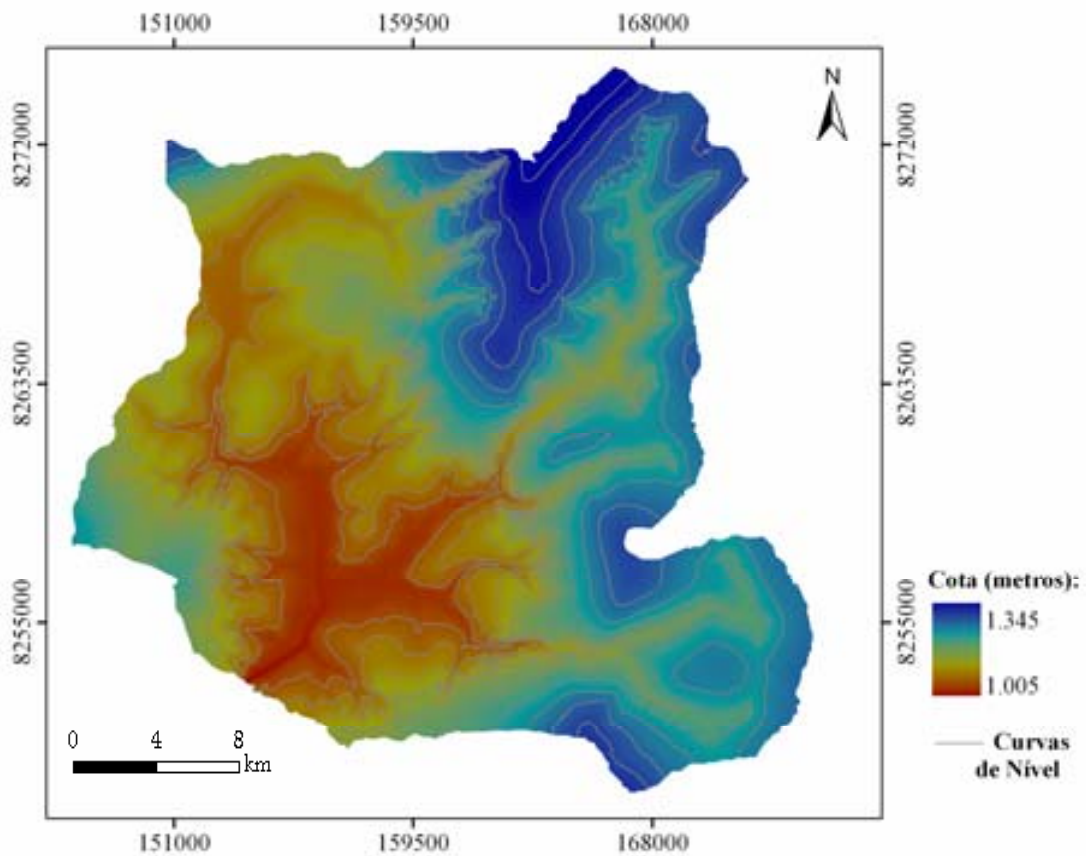
##### 6.1.1 - Modelo Digital do Terreno

Os dados vetoriais utilizados na geração do MDT do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto foram: pontos cotados e isolinhas (curvas de nível mestras e intermediárias, rede hidrográfica e o limite do reservatório), todos da base do SICAD-DF. Em primeiro lugar, necessário se fez corrigir algumas cotas da base de dados que estavam gerando ruído no MDT, além de ajustar o limite da bacia hidrográfica gerado automaticamente pela extensão *ArcHydro* para ArcGis 9.x à realidade das curvas de nível do terreno. A figura 6.1 apresenta uma cena com alguns pontos cotados e isolinhas utilizados na geração do modelo digital do terreno.

Aplicou-se à base de dados o algoritmo de interpolação TOPOGRID, disponível para ArcGis 9.x. Antes dessa escolha, no entanto, foram testados diversos métodos e parâmetros de interpolação disponíveis nas extensões *Spatial Analyst* e *3D Analyst*: IDW (*Inverse Distance Weighted*); *Spline*; *Kriging* e o TIN (*Triangular Irregular Network*). Diante dos resultados obtidos, concluiu-se que entre os métodos testados, o que melhor representa o terreno da área estudada é o TOPOGRID (Figura 6.2).



**Figura 6.1** – Exemplo de dados vetoriais utilizados na geração do MDT.



**Figura 6.2** - MDT do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto (TOPOGRID) e curvas de nível.

## 6.1.2 - Fator LS Modificado

Para determinação do fator topográfico (LS) modificado foi aplicado um *script* com a equação 5 (página 66), após a obtenção dos parâmetros necessários esquematizados na figura 5.4 (página 65) (Valentin *et al.*, 2008). Os parâmetros utilizados na formação do fator LS são apresentados na figura 6.3. Estes parâmetros foram gerados por meio da extensão *TauDEM* disponível para o *software* ArcMap - ArcGis 9.x.

O cálculo do fator LS foi efetuado empregando-se os métodos de determinação de direção de fluxo d'água D8 e  $D_{\infty}$  descritos no item 5.1.6 (página 68). As figuras 6.4-b e 6.4-c apresentam a acumulação de fluxo utilizando respectivamente os métodos de determinação de direção de fluxo D8 e  $D_{\infty}$  e na tabela 6.1 encontra-se uma tabulação cruzada entre o número de células com mesma acumulação de fluxo para cada um destes métodos. Estes resultados consideram a acumulação de fluxo distribuída nos intervalos de 8 classes com unidade correspondente ao número de células (1 : 1 a 10; 2 : 10 a 100; 3 : 100 a 1.000; 4 : 1.000 a 10.000; 5 : 10.000 a 100.000; 6 : 100.000 a 1.000.000; 7 : 1.000.000 a 2.000.000 e 8 : > 2.000.000).

**Tabela 6.1** – Tabulação cruzada entre o número de células de acumulação de fluxo calculado pelo método D8 e pelo  $D_{\infty}$ .

| Classes Método $D_{\infty}$ ( $10^3$ ) | Classes Método D8 ( $10^3$ ) |           |          |         |       |       |       |      |
|--|------------------------------|-----------|----------|---------|-------|-------|-------|------|
|  | 1                            | 2         | 3        | 4       | 5     | 6     | 7     | 8    |
| 1                                      | 2.774,0                      | 0,0       | 0,0      | 0,0     | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0  |
| 2                                      | 80.408,3                     | 9.449,9   | 136,2    | 5,9     | 0,0   | 0,8   | 0,0   | 0,0  |
| 3                                      | 111.545,5                    | 137.991,4 | 23.767,4 | 885,8   | 4,3   | 1,2   | 0,0   | 0,0  |
| 4                                      | 13.989,5                     | 30.138,4  | 16.672,1 | 3.006,0 | 43,9  | 1,3   | 0,0   | 0,0  |
| 5                                      | 435,0                        | 1.128,4   | 573,1    | 1.591,5 | 180,8 | 2,1   | 0,0   | 0,0  |
| 6                                      | 81,9                         | 150,9     | 84,4     | 40,9    | 983,2 | 35,3  | 2,5   | 0,0  |
| 7                                      | 13,0                         | 22,2      | 13,0     | 5,0     | 7,3   | 187,4 | 1,6   | 0,0  |
| 8                                      | 12,5                         | 34,0      | 28,1     | 10,2    | 2,4   | 379,1 | 138,3 | 61,5 |

Não só visualmente, mas também em termos quantitativos, podem-se observar as inconsistências relativas ao método D8 foram atenuadas com o  $D_{\infty}$ . Por exemplo, nota-se, com este método, visual e quantitativamente, uma melhor distribuição do fluxo d'água, mais próximo ao esperado para as situações topográficas da região, em especial, em relação à sua influência no cálculo da área de contribuição.

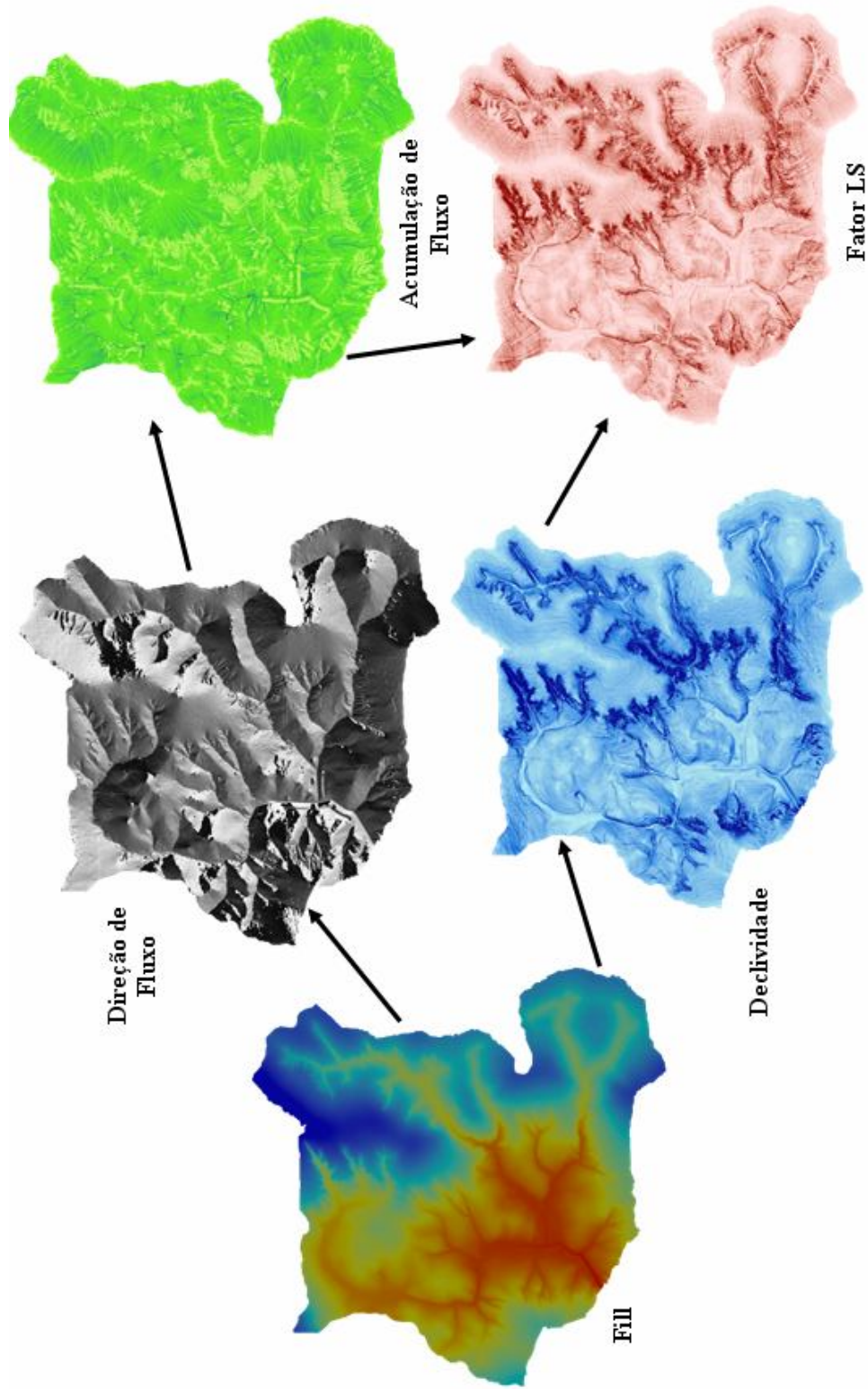
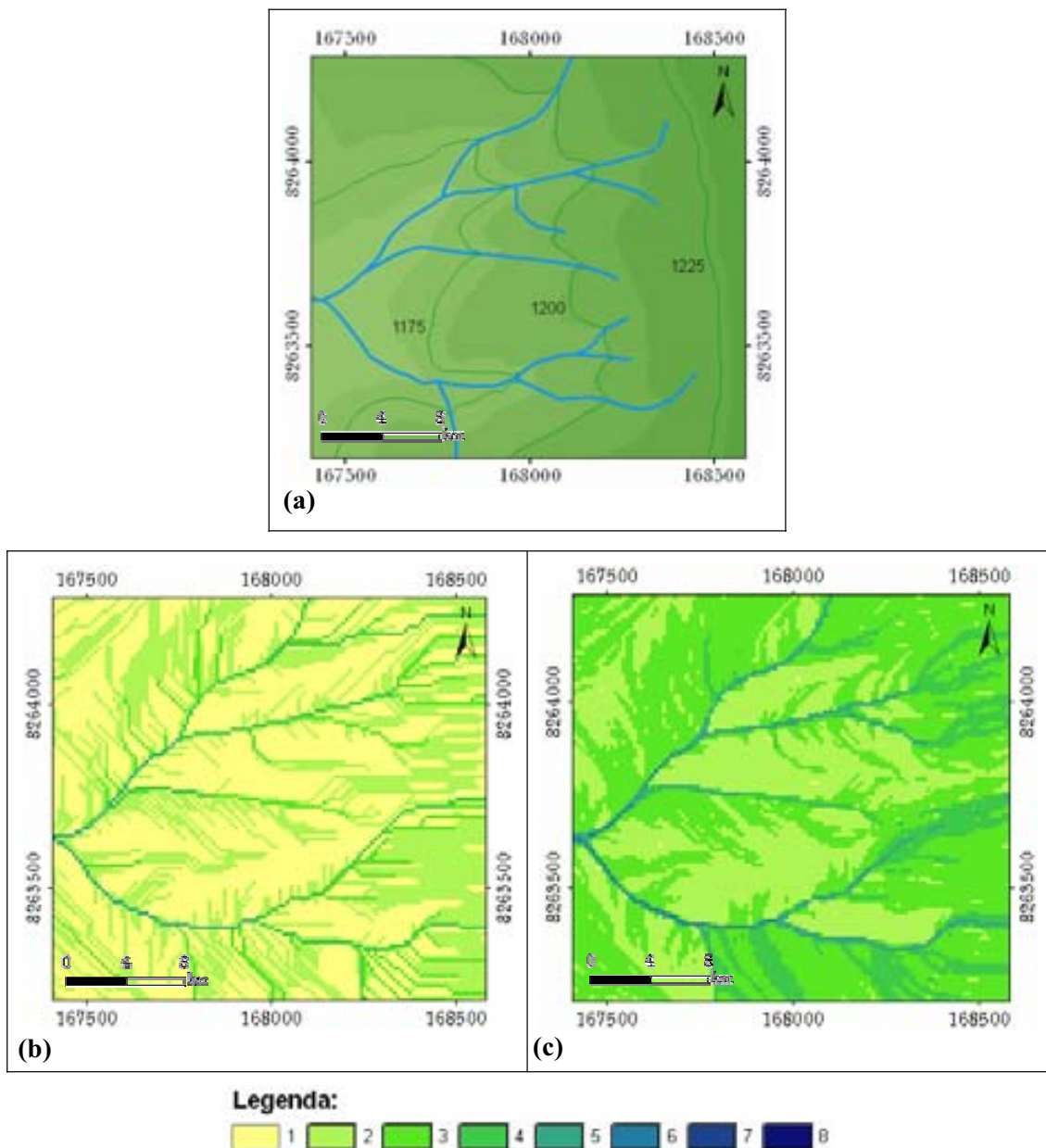


Figura 6.3 – Sequência de parâmetros utilizados no cálculo do fator LS modificado.



**Figura 6.4** – Acumulação de fluxo. (a) Altimetria. (b) Determinação de direção de fluxo pelo método D8. (c) Determinação de direção de fluxo pelo método  $D_{\infty}$ .

No método D8 (Figura 6.4-b), por não avaliar a contribuição da vizinhança, o resultado alcançado não permite uma clara distinção do modelo de fluxo em relação à configuração topográfica. Observa-se que em todas as situações geomorfológicas o fluxo d'água restringe-se a feições lineares. Um exemplo da não representatividade do modelo D8 em relação à realidade pode ser notado nas regiões que apresentam relevo suave, ou com encostas planas. Nestas situações, o fluxo calculado é definido predominantemente por um

conjunto de linhas paralelas, fora do contexto real, o que muitas vezes leva a representação do fluxo d'água a caminhos inexistentes. Estas características restringem a definição da área de contribuição e das rampas do relevo (fator L), acarretando uma subestimativa do fator topográfico (LS) calculado pela equação 5, como pode ser observado na figura 6.5 e nas tabelas 6.2 e 6.3.

Os resultados da tabulação cruzada do fator LS (Tabela 6.2) calculados pelos métodos estudados foram distribuídos em 8 classes com unidade correspondente ao número de células (1: 0,00 a 0,02; 2: 0,02 a 0,05; 3: 0,05 a 0,10; 4: 0,10 a 0,20; 5: 0,20 a 0,50; 6: 0,50 a 1,00; 7: 1,00 a 2,00 e 8: > 2,00).

**Tabela 6.2** – Tabulação cruzada entre o número de células para o fator LS calculado pelo método D8 e pelo D $\infty$ .

| Classes Fator LS Método D $\infty$ (10 <sup>3</sup> ) | Classes Fator LS Método D8 (10 <sup>3</sup> ) |          |         |         |       |      |     |     |
|---|---|----------|---------|---------|-------|------|-----|-----|
|   | 1   | 2        | 3       | 4       | 5     | 6    | 7   | 8   |
| 1   | 212.957,1                                     | 410,8    | 4,2     | 0,0     | 0,0   | 0,0  | 0,0 | 0,0 |
| 2   | 132.795,4                                     | 10.177,8 | 246,5   | 6,1     | 0,4   | 0,0  | 0,0 | 0,0 |
| 3   | 30.213,9                                      | 21.708,4 | 1.875,8 | 93,6    | 3,2   | 0,0  | 0,0 | 0,0 |
| 4   | 4.405,3                                       | 9.375,6  | 5.485,3 | 589,7   | 25,9  | 0,0  | 0,0 | 0,0 |
| 5   | 429,3   | 1.396,7  | 2.066,4 | 1.680,8 | 250,7 | 2,5  | 0,0 | 0,0 |
| 6   | 9,2   | 52,7     | 104,5   | 135,2   | 292,3 | 14,4 | 0,0 | 0,0 |
| 7   | 0,8   | 2,6      | 5,6     | 2,5     | 21,8  | 19,5 | 0,3 | 0,0 |
| 8   | 0,0   | 0,3      | 0,0     | 0,1     | 0,0   | 1,8  | 1,7 | 0,2 |

**Tabela 6.3** – Fator topográfico (Fator LS) pelo método D8.

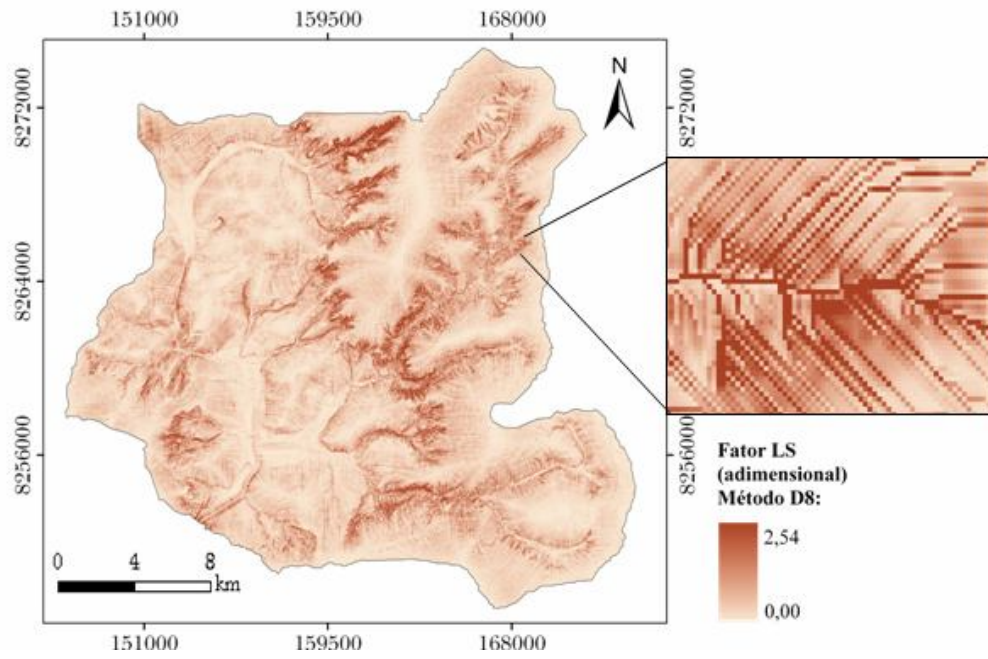
| Fator LS(adimensional) | Área (ha) | %       |
|------------------------|-----------|---------|
| 0,0000 – 0,0095        | 30.355,7  | 69,464  |
| 0,0095 – 0,0121        | 2.948,2   | 6,746   |
| 0,0121 – 0,0215        | 5.318,3   | 12,170  |
| 0,0215 – 0,0569        | 4.071,3   | 9,316   |
| 0,0569 – 0,1897        | 934,6     | 2,139   |
| 0,1897 – 0,6861        | 70,9      | 0,162   |
| 0,6861 – 2,5426        | 1,1       | 0,002   |
| <b>Total</b>           | 43.700,0  | 100,000 |

No que concerne aos resultados pela aplicação do método  $D_{\infty}$ , observa-se nas regiões de relevo suave uma grande área de contribuição, representando o espalhamento do escoamento superficial e a acumulação de fluxo, os quais correspondem à espacialização do fluxo laminar. Entretanto, nas regiões mais íngremes o fluxo encontra-se claramente concentrado ao longo dos vales. Estas características colaboram com uma definição mais representativa da área de contribuição e das rampas do relevo (fator L), acarretando a estimativa do fator LS de forma mais próxima à realidade topográfica da bacia. Os resultados do fator LS utilizando o modelo  $D_{\infty}$  estão disponíveis na figura 6.6 e nas tabelas 6.2 e 6.4.

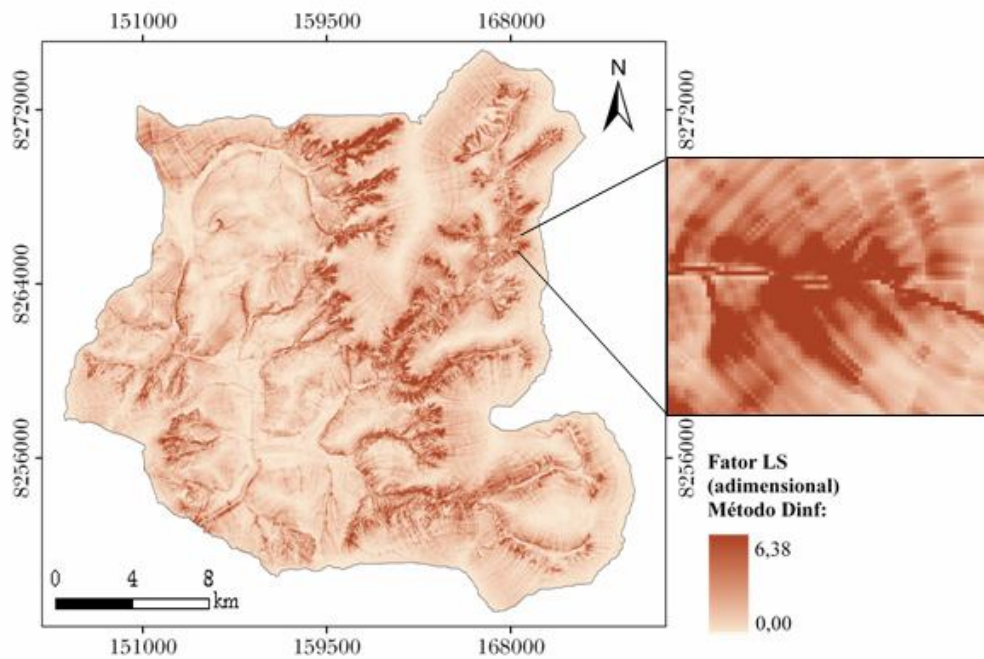
**Tabela 6.4** – Fator topográfico (Fator LS) pelo método  $D_{\infty}$ .

| <b>Fator LS(adimensional)</b> | <b>Área (ha)</b> | <b>%</b>       |
|-------------------------------|------------------|----------------|
| 0,0000 – 0,0238               | 24.505,5         | 56,077         |
| 0,0238 – 0,0302               | 4.117,5          | 9,422          |
| 0,0302 – 0,0539               | 7.870,2          | 18,010         |
| 0,0539 – 0,1429               | 5.879,8          | 13,455         |
| 0,1429 – 0,4759               | 1.250,4          | 2,861          |
| 0,4759 – 1,7212               | 76,0             | 0,174          |
| 1,7212 – 6,3792               | 0,7              | 0,002          |
| <b>Total</b>                  | <b>43.700,0</b>  | <b>100,000</b> |

O fator LS calculado pelo método D8 apresentou média de 0,007 e pelo  $D_{\infty}$  de 0,023, sendo o desvio padrão de 0,020 e de 0,052, respectivamente. Tanto na análise comparativa da tabela 6.1 quanto da tabela 6.2, que trazem tabulações cruzadas entre os resultados da acumulação de fluxo e entre o fator LS calculado pelos dois métodos estudados, nota-se que há maior concentração de células pelo D8 nas classes menores e praticamente zero nas classes iguais ou próximas da classe 8. Ao contrário, pelo  $D_{\infty}$  o número de células em classes com maior acumulação de fluxo, bem como com valores mais elevados para o LS são distribuídos ao longo das 8 classes. Isto enfatiza a influência da área de contribuição no cálculo do fator LS, em especial, quando calculado pelo modelo  $D_{\infty}$ .



**Figura 6.5** - Distribuição do fator LS modificado pelo método D8.



**Figura 6.6** - Distribuição do fator LS modificado método  $D_{\infty}$ .



### 6.1.3 - Fator R

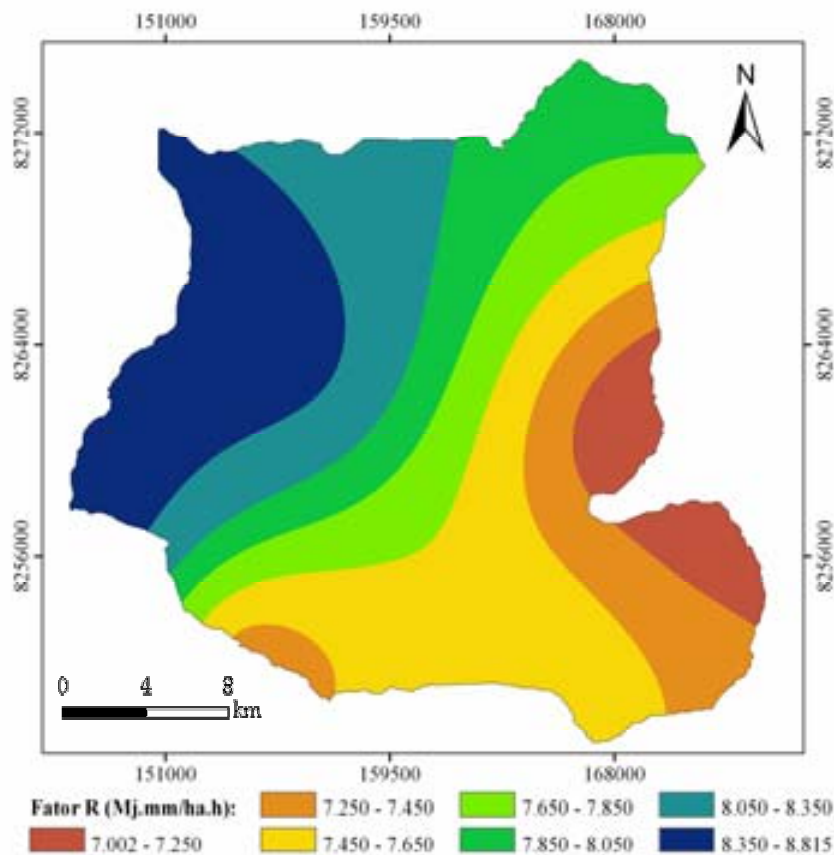
Os valores de erosividade adotados para o Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto foram obtidos a partir da equação 15 (apresentada no capítulo anterior), vez que a maior parte dos trabalhos consultados a utilizam por tratar-se de equação bem difundida nesta linha de pesquisa, além do alto coeficiente de correlação desta equação ( $R^2=0,991$ ).

Os cálculos se basearam nos totais mensais e anuais de precipitação pluviométrica de 30 estações do Distrito Federal e do entorno, pertencentes à Caesb (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal), CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias) e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Após a determinação dos valores de R para cada estação, os resultados foram espacializados por interpolação utilizando-se o método *Spline* tensionado empregando-se o número padrão de pontos igual a 12, com peso igual a 100.

A distribuição sazonal encontrada no cálculo do fator R para o Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto está na figura 6.7, contendo valores entre 7.002 e 8.815 Mj.mm/ha.h, média de 7853,31 Mj.mm/ha.h e desvio padrão de 425,49. Os intervalos de erosividade determinados para a bacia e as respectivas áreas e percentuais correspondentes estão na tabela 6.5.

**Tabela 6.5 – Erosividade das chuvas (Fator R).**

| <b>Fator R(Mj.mm/ha.h)</b> | <b>Área (ha)</b> | <b>%</b>     |
|----------------------------|------------------|--------------|
| 7.002 – 7.250              | 2.910            | 6,7          |
| 7.250 – 7.450              | 5.040            | 11,5         |
| 7.450 – 7.650              | 9.740            | 22,3         |
| 7.650 – 7.850              | 5.500            | 12,6         |
| 7.850 – 8.050              | 6.140            | 14,1         |
| 8.050 – 8.350              | 6.340            | 14,5         |
| 8.350 – 8.815              | 8.030            | 18,4         |
| <b>Total</b>               | <b>43.700</b>    | <b>100,0</b> |



**Figura 6.7 - Distribuição do fator R.**

#### 6.1.4 - Fator K

A determinação do fator K para o Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto baseou-se no estudo de Bloise *et al.* (2001) para uma sub-bacia do Descoberto, a Bacia do Olaria-DF. Esses autores estimaram o valor de K pelo nomograma de Wischmeier *et al.* (1971). No caso de inexistência de classe correspondente na Bacia do Olaria, o fator K foi calculado pela média dos valores estimados para as unidades da respectiva classe genérica.

Na tabela 6.6 estão a área e o percentual dos intervalos das classes do fator K. De acordo com esta tabela, a erodibilidade dos solos da bacia varia entre 0 e 0,0395 t.h/Mj.mm. Na figura 6.8 encontra-se o mapa do fator K gerado a partir da reclassificação das unidades pedológicas levantadas em Reatto *et al.* (2003a). O valor médio de K foi de 0,0162 t.h/Mj.mm e seu desvio padrão de 0,0067.

**Tabela 6.6** – Erodibilidade dos Solos (Fator K).

| Classe de Solo                    |                   | Fator K | Área (ha) | %    |
|-----------------------------------|-------------------|---------|-----------|------|
| Latossolo Vermelho (LVd)          | LVd <sub>1</sub>  | 0,0263  | 15.541,9  | 35,5 |
|                                   | LVd <sub>2</sub>  | 0,0092  |           |      |
|                                   | LVd <sub>3</sub>  | 0,0144  |           |      |
|                                   | LVd <sub>4</sub>  | 0,0105  |           |      |
|                                   | outros            | 0,0151  |           |      |
| Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd) | LVAd <sub>1</sub> | 0,0171  | 15.435,2  | 35,3 |
|                                   | LVAd <sub>2</sub> | 0,0237  |           |      |
|                                   | LVAd <sub>3</sub> | 0,0144  |           |      |
|                                   | outros            | 0,0184  |           |      |
| Nitossolo Háplico(NX)             | NXd <sub>1</sub>  | 0,0197  | 100,2     | 0,2  |
|                                   | NXa <sub>1</sub>  | 0,0342  |           |      |
| Plintossolos (FF)                 | FFad              | 0,0092  | 4.014,9   | 9,2  |
| Cambissolo (CX)                   | CXd <sub>1</sub>  | 0,0237  | 2.212,4   | 5,1  |
|                                   | CXd <sub>2</sub>  | 0,0158  |           |      |
|                                   | CXa <sub>1</sub>  | 0,0263  |           |      |
|                                   | CXa <sub>2</sub>  | 0,0210  |           |      |
|                                   | outros            | 0,0217  |           |      |
| Gleissolos (GM e GX)              | GMd <sub>1</sub>  | 0,0158  | 2.296,6   | 5,3  |
|                                   | GMd <sub>2</sub>  | 0,0273  |           |      |
|                                   | GMd <sub>3</sub>  | 0,0395  |           |      |
|                                   | GXa <sub>1</sub>  | 0,0355  |           |      |
| Neossolo Flúvico (RU)             | RUbd <sub>1</sub> | 0,0250  | 72,7      | 0,16 |
|                                   | RUbd <sub>2</sub> | 0,0303  |           |      |

Fonte: adaptado de Bloise *et al.* (2001).

### 6.1.5 - Fator CP

Na determinação dos fatores antrópicos da EUPS - uso e manejo (fator C) e práticas conservacionistas (fator P) – adotou-se a integração desses fatores proposta por Stein *et al.* (1987). Obteve-se o fator CP a partir da interpretação do uso e ocupação do solo com base nas classificações de cenas de imagens de satélite Landsat ETM 221/071 de 1984, de 1994 e de 2003, dada a disponibilidade multitemporal de imagens deste satélite para a bacia do Descoberto. Partindo-se dessa proposta (Tabela 5.2) e de valores adotados para o fator CP por Baptista (1997) e por Silva (2001), definiu-se a tabela 6.7 com valores correspondentes às classes identificadas no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto. A tabela 6.7 apresenta, ainda, as respectivas estimativas de área e de percentual das classes encontradas na bacia com

a classificação/interpretação do uso e ocupação do solo na região para o ano de 2003. A média do fator CP na Bacia do Descoberto foi de 0,13 e o desvio padrão de 0,17.

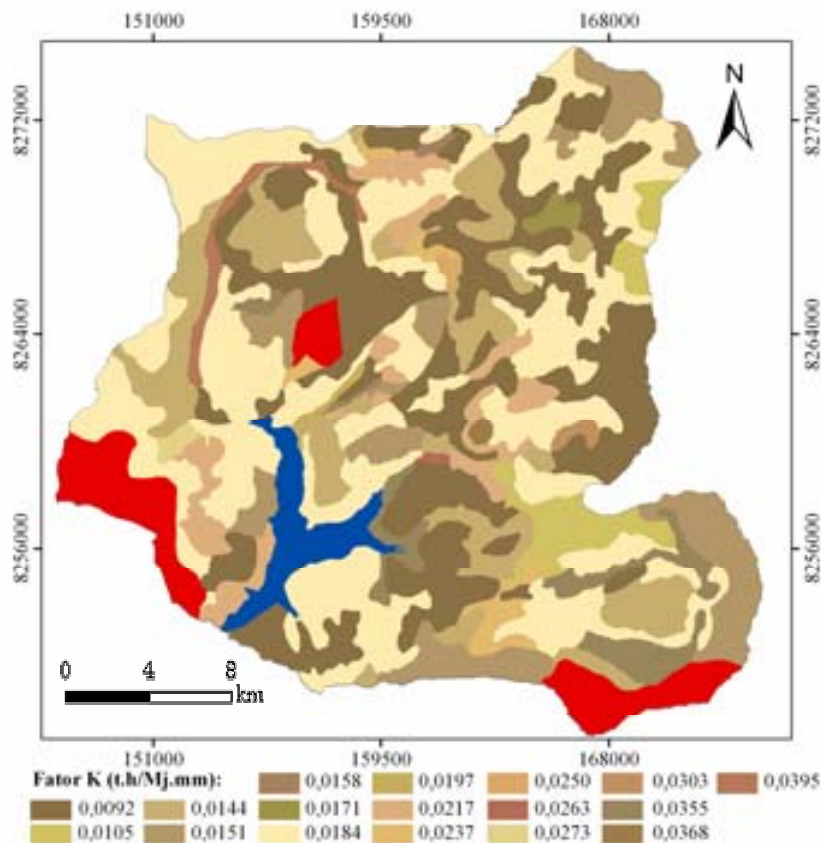


Figura 6.8 – Distribuição do fator K.

Tabela 6.7 – Uso, manejo e práticas conservacionistas (Fator CP).

| Classe                                   | Fator CP (adimensional) | Área (ha) | % Área |
|--|-------------------------|-----------|--------|
| Corpos d'água                            | 0                       | 1.310     | 3,0    |
| Área Urbana Consolidada                  | 0                       | 1.730     | 3,9    |
| Mata Ciliar                              | 0,00004                 | 2.880     | 6,6    |
| Reflorestamento                          | 0,0001                  | 4.360     | 10,0   |
| Vegetação/Regeneração                    | 0,01                    | 12.930    | 29,6   |
| Área Rural de Uso Diversificado          | 0,2                     | 17.960    | 41,1   |
| Área Urbana de Expansão e Qualificação 1 | 0,5                     | 820       | 1,9    |
| Área Urbana de Expansão e Qualificação 2 | 0,8                     | 1.720     | 3,9    |
| <b>Total</b>                             | -                       | 43.700    | 100,0  |

Em um primeiro momento, as classes foram identificadas pela classificação supervisionada com base em cena de uma imagem Landsat de 2003 da região, utilizando-se o método *Maximum Likelihood* (Máxima Verossimilhança) disponível no *software* Envi. Na análise destes resultados observaram-se classificações errôneas, gerando confusão visual entre algumas classes em decorrência do diversificado uso e ocupação na Bacia do Descoberto. A bacia tem se tornado uma área complexa não apenas pela expansão demográfica desordenada, como também pelo grande percentual de áreas rurais de uso diversificado. Pode-se citar como exemplo, que compromete classificações automáticas do uso e ocupação do solo, o que ocorre na região do PICAG, onde as classes de vegetação, cultura e ocupações antrópicas se confundem.

Para corrigir os erros de classificações gerados, foram realizadas diversas tentativas manuais no *software* ArcMap, bem como correções usando a extensão Editar Classificação no Envi. Apesar desses esforços empreendidos, os resultados continuaram insatisfatórios. Por conseguinte, a complexidade do uso e ocupação do solo na bacia comprometeu a classificação automática precisa.

Assim, nessa primeira etapa o mapa do fator CP (Figura 6.9) foi gerado a partir da interpretação da classificação gerada para a imagem Landsat de 2003 (Figuras 6.9), com posterior validação em saída de campo. Para a etapa seguinte de modelagem dinâmica, foram realizadas classificações e posteriores interpretações para os anos de 1994 e 1984 (Figuras 6.10 e 6.11). Esses mapas gerados integrarão a base de mapas dinâmicos para simulação de cenários da região (item 6.2).

Cabe salientar que na fase de interpretação, na classe de maior complexidade que é a classe Área Rural de Uso Diversificado, foram englobadas áreas de cultura, solo exposto, cascalheiras, pequenas áreas remanescentes de cerrado, chácaras, pastagens, caixas de empréstimo, entre outros. Portanto, esta pode ser considerada uma classe residual. A generalização efetuada nessa classe é bastante propícia, uma vez que estes mapas servirão de base de dados multitemporal para a modelagem dinâmica e nesta os resultados geralmente são mais satisfatórios empregando-se classificações genéricas. A ausência de generalização de algumas classes pode gerar ruído nas simulações a partir da transição de manchas muito pequenas.

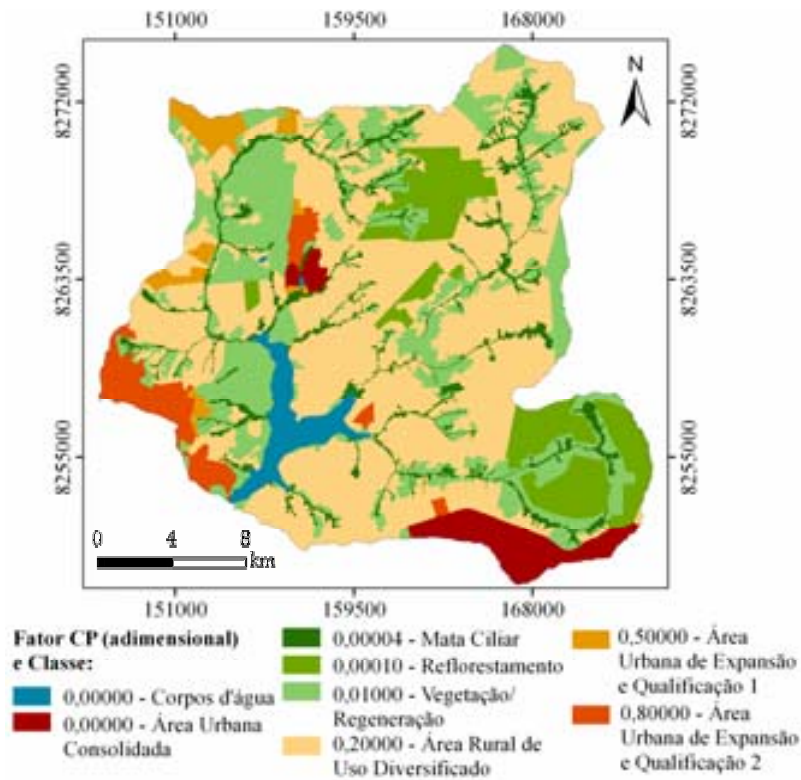


Figura 6.9 – Distribuição do fator CP e classes de uso e ocupação do solo em 2003.

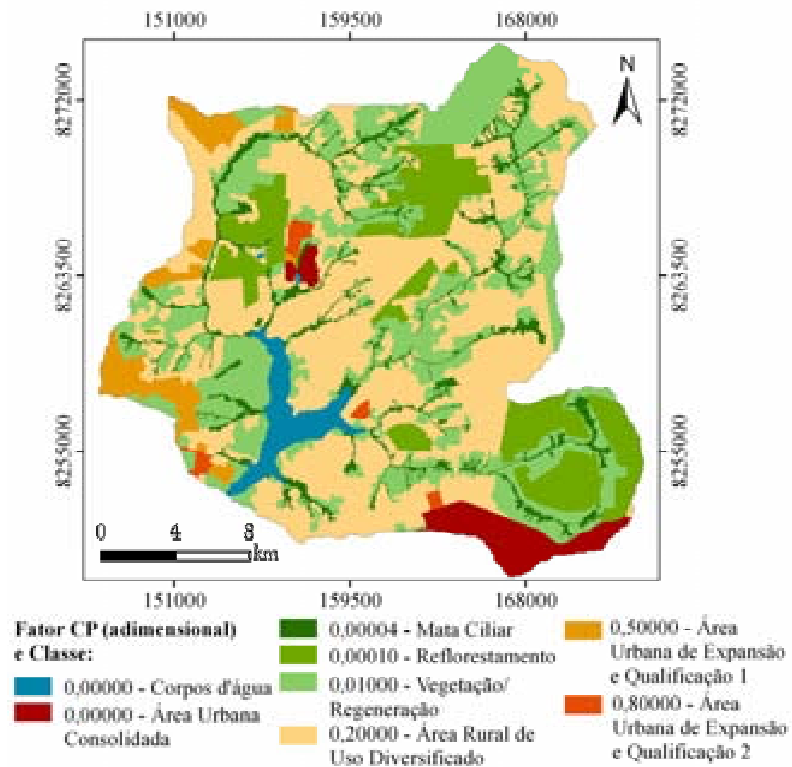
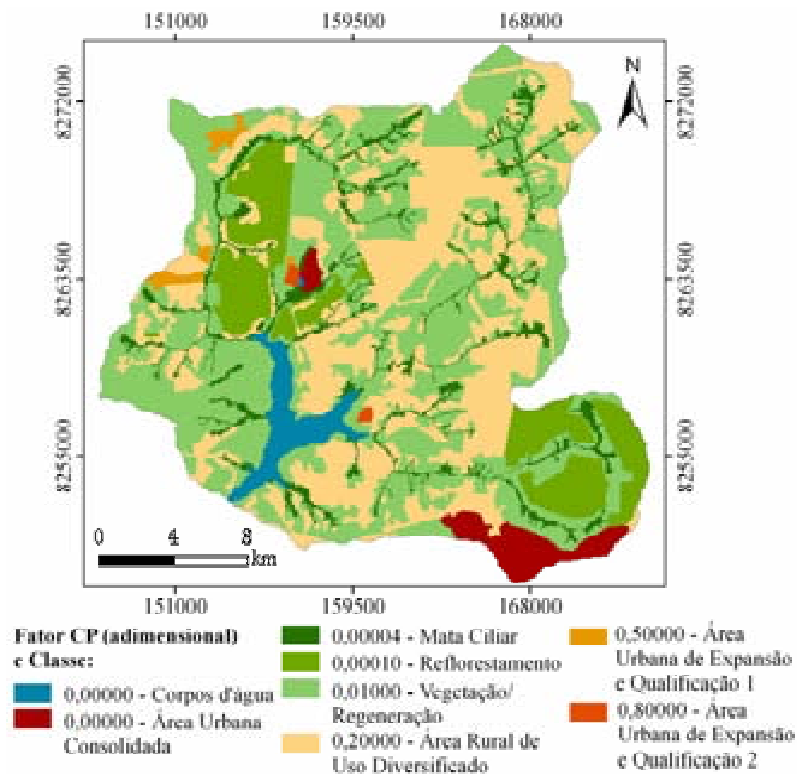


Figura 6.10 – Distribuição do fator CP e classes de uso e ocupação do solo em 1994.



**Figura 6.11** – Distribuição do fator CP e classes de uso e ocupação do solo em 1984.

Ademais, a classe Área Urbana de Expansão e Qualificação foi dividida em 1 e 2. Ambas referem-se a áreas urbanas em consolidação, sem infra-estrutura ou com infra-estrutura precária, com ausência de saneamento, coleta de lixo e pavimentação. A primeira (1), em sua maior parte, corresponde a ocupações antrópicas resultantes de chácaras que estão sendo lentamente divididas, dando origem a novos espaços urbanos. A segunda (2), por sua vez, possui áreas de maior adensamento populacional e mais susceptível a contribuir com os processos erosivos.

Em relação à classe Vegetação/Regeneração, também com o objetivo de generalização para evitar manchas muito pequenas, optou-se por agrupar as vegetações predominantes na região de porte baixo a rasteiro com cobertura total do terreno, por exemplo, campo, cerrado e áreas de vegetação em regeneração.

### 6.1.6 - Erosão Atual (A) e Potencial (Ap)

Os mapas de erosão atual e potencial da área de estudos foram gerados pelo produto dos fatores da EUPS, aplicando-se a equação 1, por meio do comando *Raster*

*Calculator* da extensão *Spatial Analyst* para ArcGis 9.x. Cabe lembrar que o cálculo da  $A_p$  considera o pior cenário possível, isto é, solo exposto e sem prática conservacionista, atribuindo-se o valor 1 para os fatores C e P. As figuras de 6.12 até a 6.15 apresentam mapas de A e  $A_p$  para o Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto para 2003 pelos métodos D8 e  $D_\infty$ .

A média anual de perdas de solo (A) encontra-se entre 0 e 147,8 t/ha.ano com o D8 (Figura 6.12) e entre 0 e 386,4 t/ha.ano com o  $D_\infty$  (Figura 6.13). De acordo com a tabela 5.4 (página 78), estas estimativas de perdas de solo para o ano de 2003 podem ser consideradas: forte pelo método D8 e muito forte pelo método  $D_\infty$ . Por sua vez, o potencial médio de perdas de solo ( $A_p$ ) com o método D8 encontra-se entre 0 e 315,65 t/ha.ano (Figura 6.14) e entre 0 e 669,75 t/ha.ano com o  $D_\infty$  (Figura 6.15). Conforme a tabela 5.3 (página 78), estes potenciais de perdas de solo para o Alto Curso do Descoberto podem ser interpretados como fraco pelo D8 e como moderado pelo método  $D_\infty$ .

As tabelas 6.8 e 6.9 apresentam uma comparação entre os resultados alcançados utilizando os dois métodos estudados para A e para  $A_p$ , respectivamente. A perda média de solo com o D8 foi de 0,045 t/ha.ano e o desvio padrão de 0,31 e a perda média de solo de 0,16 t/ha.ano e desvio padrão de 0,86 com o  $D_\infty$ . Por sua vez, o potencial de perdas de solo pelo modelo D8 teve valor médio de 0,89 t/ha.ano e desvio padrão de 2,79, contra 3,25 t/ha.ano e desvio padrão de 7,48 calculados pelo método  $D_\infty$ . As figuras 6.16 e 6.17 apresentam estimativas de perdas de solo do Alto do Descoberto para os anos de 1984 e 1994 apenas pelo método  $D_\infty$ . Estas estimativas médias anuais de erosão podem ser interpretadas como média a forte para 1984 e como forte para 1994.

**Tabela 6.8** – Média anual de perdas de solo (A): método D8 *versus*  $D_\infty$ .

| A (t/ha.ano) | D8            |               | $D_\infty$    |               |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|              | Área (ha)     | % da Área     | Área (ha)     | % da Área     |
| 0,0 – 0,1    | 31.679        | 72,49         | 24.064        | 55,07         |
| 0,1 – 0,25   | 6.372         | 14,58         | 4.933         | 11,29         |
| 0,25 – 0,5   | 3.186         | 7,29          | 4.912         | 11,24         |
| 0,5 – 1,0    | 1.642         | 3,76          | 4.884         | 11,18         |
| 1,0 – 2,0    | 606           | 1,39          | 3.063         | 7,01          |
| 2,0 – 5,0    | 189           | 0,43          | 1.553         | 3,55          |
| 5,0 – 10,0   | 22            | 0,05          | 242           | 0,55          |
| > 10         | 3             | 0,01          | 49            | 0,11          |
| <b>Total</b> | <b>43.700</b> | <b>100,00</b> | <b>43.700</b> | <b>100,00</b> |



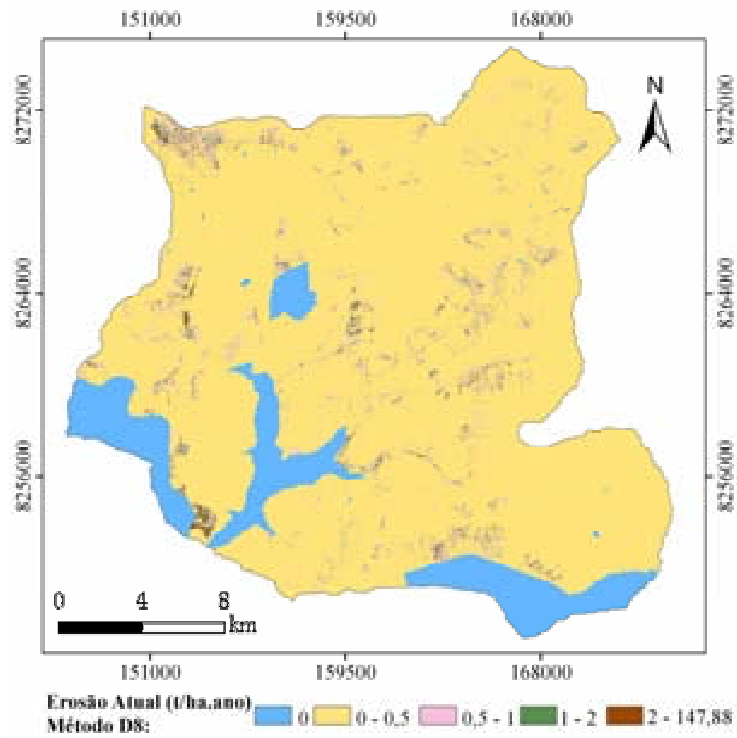


Figura 6.12 – Distribuição da estimativa de perdas de solo pelo método D8 para 2003.

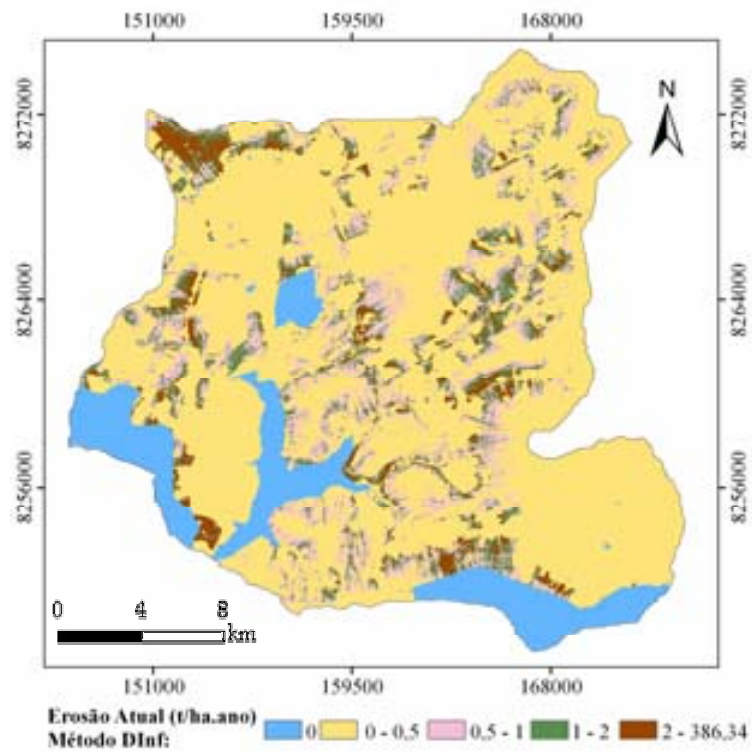


Figura 6.13 – Distribuição da estimativa de perdas de solo pelo método  $D_{\infty}$  para 2003.

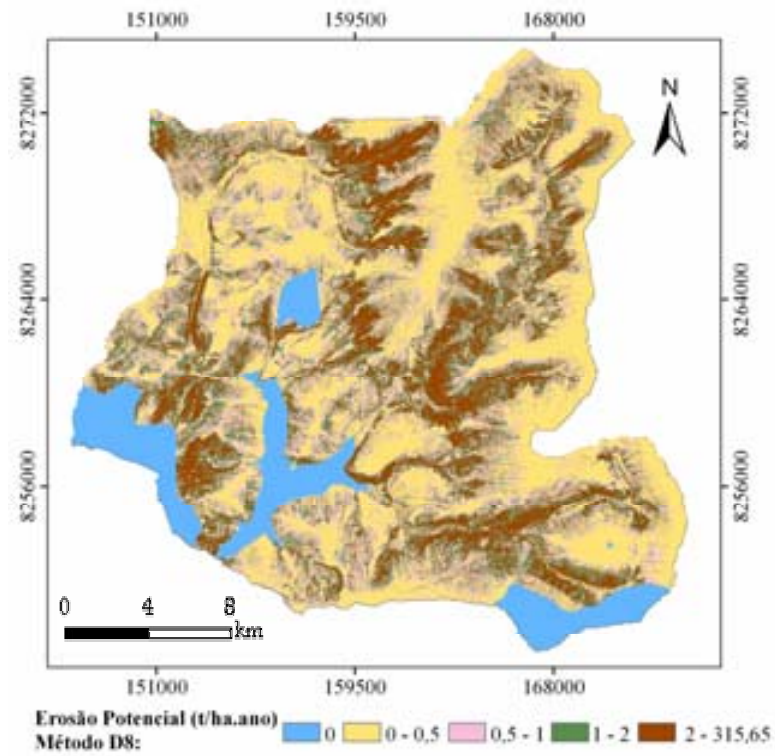


Figura 6.14 – Distribuição do potencial de perdas de solo pelo método D8.

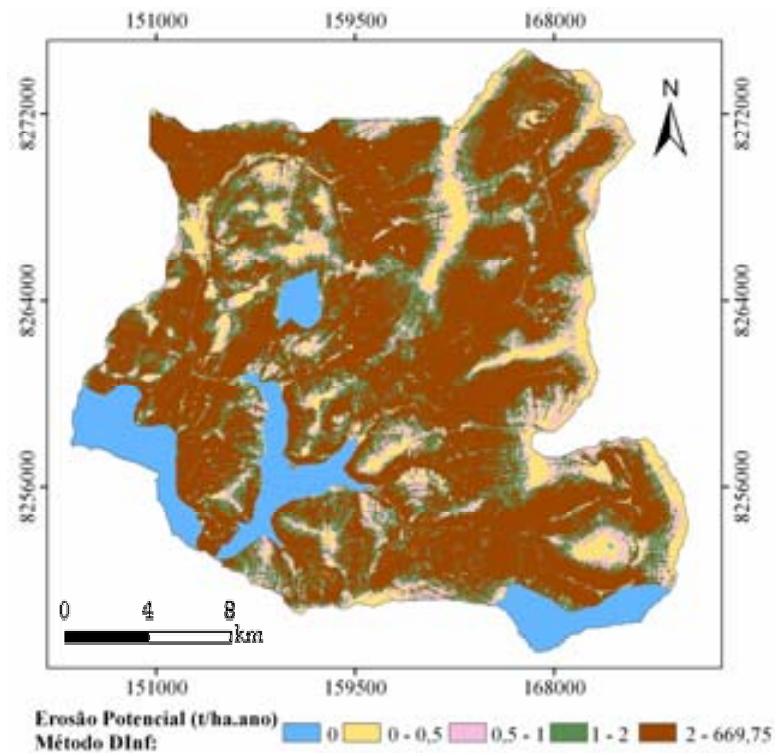


Figura 6.15 – Distribuição do potencial de perdas de solo pelo método D $\infty$ .

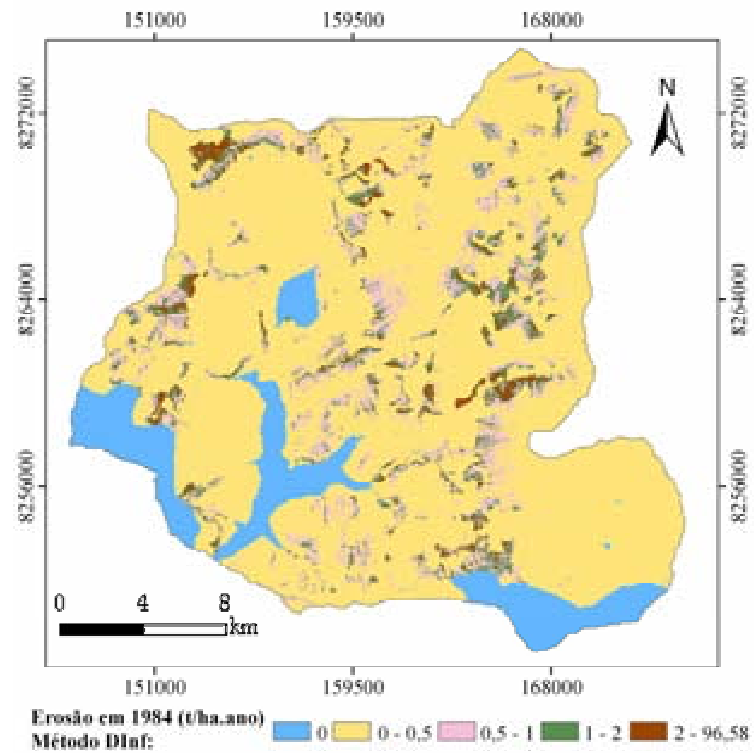


Figura 6.16 – Distribuição da estimativa de perdas de solo pelo método  $D_{\infty}$  para 1984.

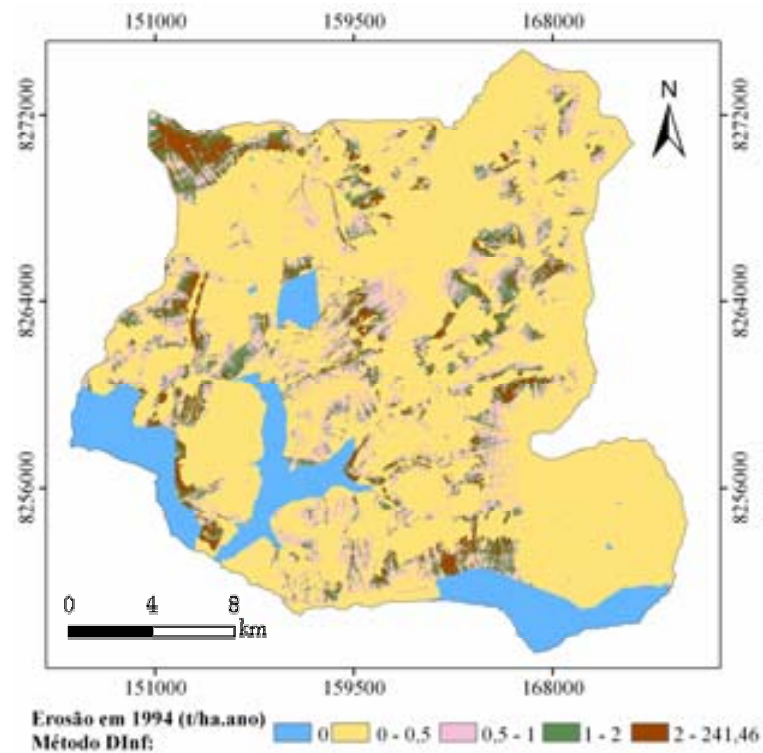


Figura 6.17 – Distribuição da estimativa de perdas de solo pelo método  $D_{\infty}$  para 1994.

**Tabela 6.9** – Potencial médio de perdas de solo ( $A_p$ ): método D8 *versus*  $D_\infty$ .

| $A_p$ (t/ha.ano) | D8            |               | $D_\infty$    |               |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                  | Área (ha)     | % da Área     | Área (ha)     | % da Área     |
| 0,0 – 0,1        | 6.370         | 14,58         | 4.473         | 10,24         |
| 0,1 – 0,25       | 5.428         | 12,42         | 1.049         | 2,40          |
| 0,25 – 0,5       | 7.861         | 17,99         | 2.200         | 5,03          |
| 0,5 – 1,0        | 9.323         | 21,34         | 4.670         | 10,69         |
| 1,0 – 2,0        | 7.306         | 16,72         | 8.053         | 18,43         |
| 2,0 – 5,0        | 5.237         | 11,98         | 12.641        | 28,93         |
| 5,0 – 10,0       | 1.525         | 3,49          | 6.296         | 14,41         |
| > 10             | 649           | 1,48          | 4.319         | 9,88          |
| <b>Total</b>     | <b>43.700</b> | <b>100,00</b> | <b>43.700</b> | <b>100,00</b> |

Diante dos resultados, observa-se que o método  $D_\infty$  traz uma mudança significativa nas estimativas atual e potencial de perdas de solo por erosão laminar, como visualizado na comparação entre os resultados obtidos pelos dois modelos de determinação de fluxo d'água e de sedimentos.

Como já mencionado no Capítulo 5, uma das motivações para propor o emprego do fator LS modificado foi o fato de que uma das maiores limitações da EUPS está no cálculo original do fator LS. Entre algumas das razões para o uso potencial do fator LS modificado na EUPS destacam-se: redução de inconsistências produzidas na aplicação do fator LS original; possibilidade de ser aplicado em terrenos com geometrias de rampa complexas; e representação mais adequada da acumulação de fluxo d'água e de sedimentos.

O método proposto permitiu estimar a erosão do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto. Os resultados expostos ao longo deste sub-capítulo evidenciam que o cálculo do fator LS modificado, utilizando o método de determinação de fluxo d'água D8, subestima as perdas anuais e potenciais de solo em uma bacia hidrográfica. Dessa forma, os resultados do fator LS obtidos com o modelo  $D_\infty$  são mais significativos, pois retratam e quantificam as perdas de solo por erosão laminar de forma mais próxima à realidade topográfica da bacia.

Cumprе ressaltar que o fator estático LS tem participação significativa no processo erosivo do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto. As taxas estimadas de perdas de solo por erosão laminar pelo método  $D_\infty$  para o ano de 2003, com média anual variando entre 0 e 386,34 t/ha.ano, ratificam os impactos ambientais na região como

conseqüência de problemas relacionados ao crescimento demográfico desordenado. O aumento significativo de perdas de solo na bacia fica mais evidente ao comparar a estimativa média de 2003 com as médias anuais estimadas para 1984 e 1994 que chegaram a 96,58 e 241,46 t/ha.ano, respectivamente.

A combinação dos fatores da EUPS determina o ritmo do processo erosivo. Logo, além do fator LS, os demais fatores também são expressivos na estimativa de perdas de solo e necessitam de melhorias no cálculo. No que tange ao fator dinâmico erosividade das chuvas (fator R), existem contribuições recentes relatadas no Capítulo 4, tais como: Barreto Neto (2004) e Rennó (2003). Em relação ao fator estático erodibilidade dos solos (fator K), há uma grande carência de estudos que considerem na modelagem, não apenas as classes de solos, mas também outros atributos, por exemplo, a textura.

Ademais, para o cálculo dos fatores K e CP (fator dinâmico), a grande maioria dos trabalhos baseiam-se em equações resultantes de pesquisas na região sudeste do país, principalmente no estado de São Paulo, o que pode prejudicar uma estimativa representativa destes fatores em outras regiões do Brasil empregando estas mesmas equações. Nestas situações, via de regra, verifica-se a necessidade de saídas de campo para validar se os resultados obtidos correspondem à realidade.

No caso do fator CP, para resultados mais significativos na EUPS, é indicado que as variáveis antrópicas sejam tratadas separadamente. Além disso, recomenda-se especial atenção na seleção do método de classificação e que se evite a generalização das classes de uso e ocupação para uma estimativa mais realista.

## **6.2 - Modelagem Dinâmica de Perdas de Solo**

Neste sub-capítulo, como contribuição à estimativa multitemporal de perdas de solo, serão apresentados os resultados, bem como uma discussão sobre os passos empregados na simulação de cenários tendenciais e cenários otimistas de uso e ocupação do solo. Os mapas de cenários produzidos correspondem à simulação de mapas de uso e ocupação do solo que servirão de base ao parâmetro CP da EUPS. Os cenários foram gerados por modelagem dinâmica utilizando o ambiente de modelagem Dinamica EGO.

### **6.2.1 - Entrada de Dados**

A fim de se obter uma melhor calibração e validação do modelo dinâmico de perdas de solo, foi selecionada no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto a sub-bacia do Ribeirão Rodeador (Figura 6.18), com área de 119,43 km<sup>2</sup> (11.943 ha) para simulação de cenários futuros de uso e ocupação do solo. Essa escolha foi motivada pela grande extensão dedicada à área rural nesta sub-bacia, o que tem provocado conseqüente aumento na produção de sedimentos, embora localizada na Zona Rural de Uso Controlado III de acordo com o PDOT (página 48). Outro ponto que motivou a modelagem dinâmica de perdas de solo desta sub-bacia se deve à preocupação da Caesb em relação ao aumento da contribuição de sedimentos provenientes do Ribeirão Rodeador no reservatório.

A despeito da recomendação de se evitar generalizações das classes de uso e ocupação do solo, como justificado no item 6.1.5, foram mantidas as classes definidas inicialmente na tabela 6.7.

As figuras 6.18 e 6.19 mostram os mapas de uso e ocupação na sub-bacia do Rodeador para os anos de 2003, 1994 e 1984. A seguir, nas figuras 6.20 e 6.21 são apresentados os mapas estáticos selecionados do banco de dados levantado nesta pesquisa, os quais serão utilizados na simulação de cenários tendenciais de uso e ocupação na sub-bacia. Para se chegar a esses resultados, testou-se sete variáveis: hidrografia, áreas protegidas (Flona – Floresta Nacional), altitude, slope, classes de solos, textura e fator K. Optou-se por escolher quatro variáveis que apresentaram alta independência entre os pares e que possivelmente afetam as mudanças relacionadas a perdas de solo. Essas variáveis poderão auxiliar no entendimento da dinâmica de perdas de solo na sub-bacia do Rodeador.

### **6.2.2 - Análise Multitemporal**

A análise multitemporal resultou na construção de um modelo conceitual das mudanças no uso do solo na sub-bacia do Rodeador a partir das principais mudanças observadas no intervalo de 1984 a 2003 nos mapas dinâmicos apresentados nas figuras 6.18 e 6.19 e por meio das tabulações cruzadas elaboradas para o mesmo intervalo temporal.

A tabela 6.10 apresenta um modelo conceitual de mudanças elaborado com as possíveis transições para esse estudo de caso. Nesse modelo foram empregadas as seis classes de uso e ocupação encontradas na sub-bacia (1 = Corpos d'água; 2 = Mata Ciliar; 3 = Vegetação/Regeneração; 4 = Área Rural de Uso Diversificado; 5 = Área Urbana de Expansão

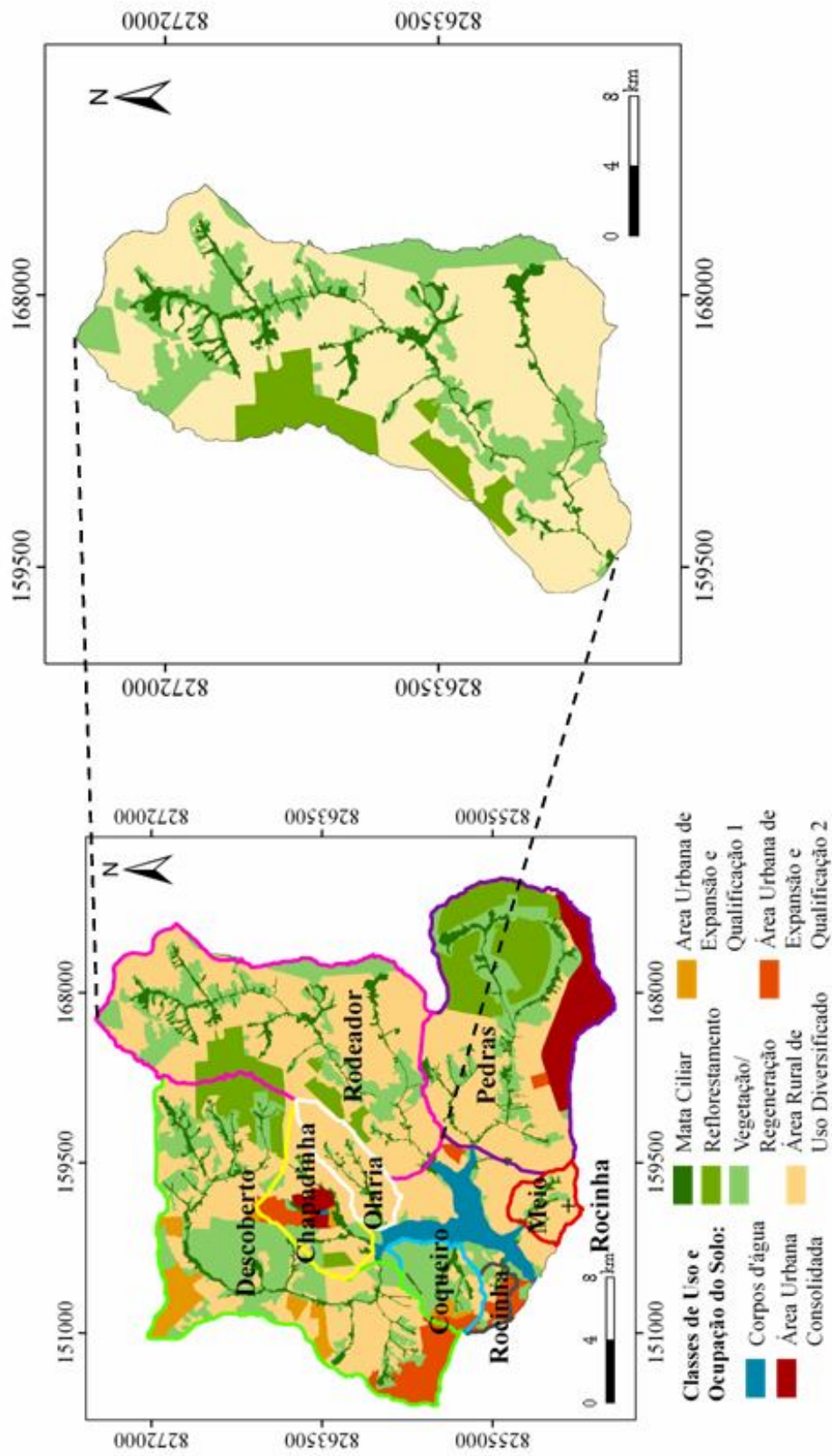
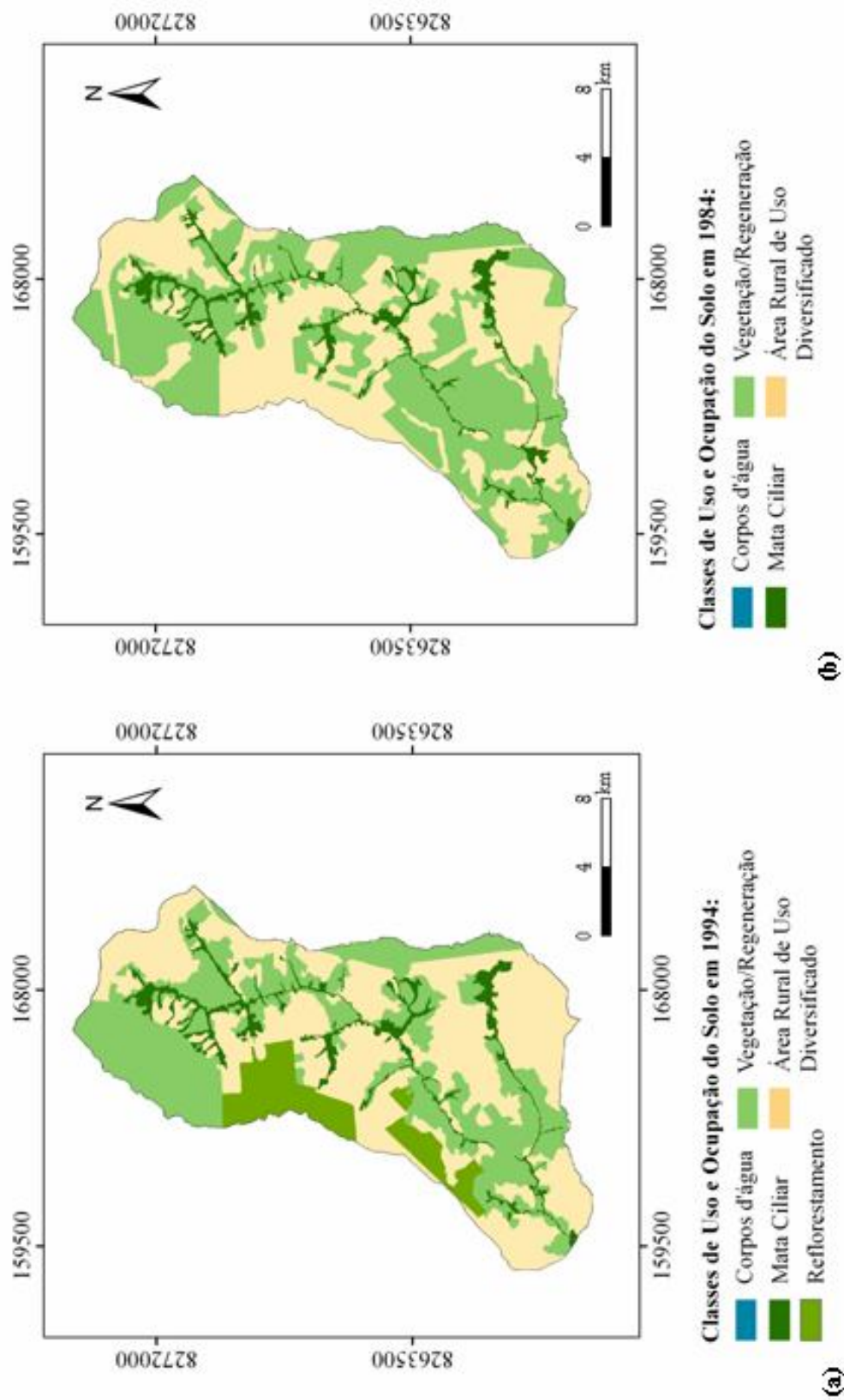
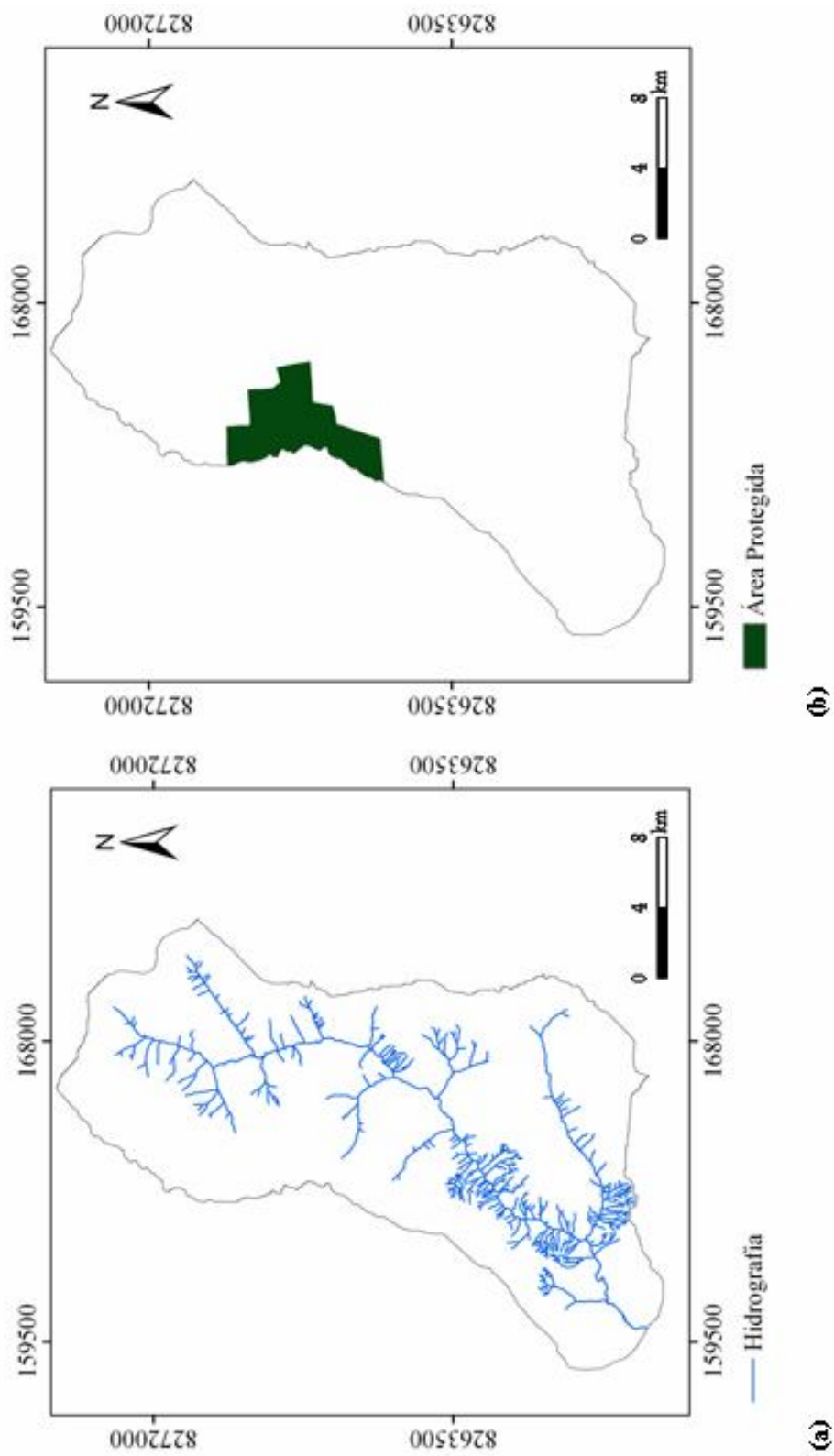


Figura 6.18 – Localização da sub-bacia do Riberão Rodeador e classes de uso e ocupação do solo na sub-bacia em 2003.

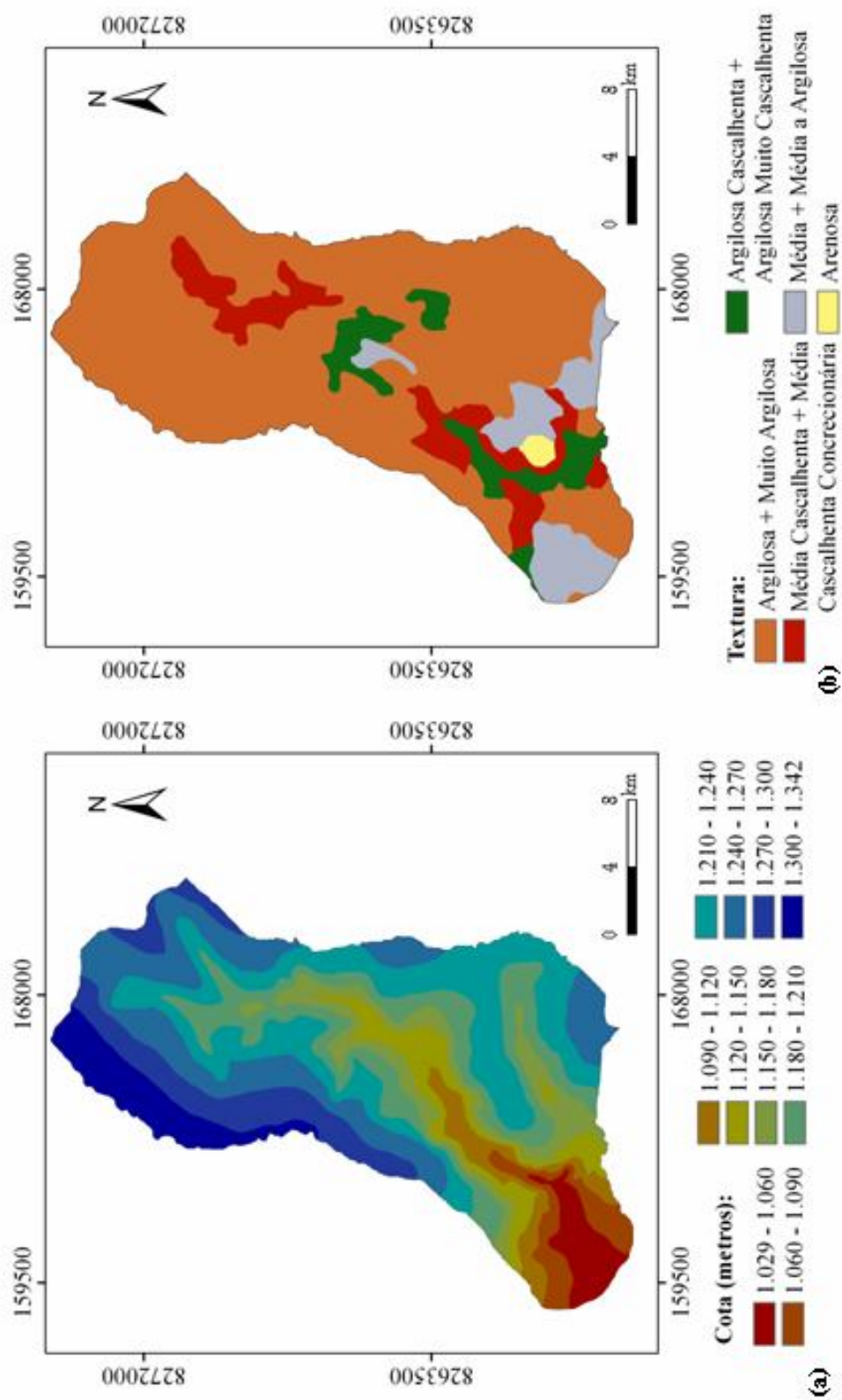


**Figura 6.19** – Classes de uso e ocupação do solo na sub-bacia do Rbierão Rodeador. (a) 1994. (b) 1984.





**Figura 6.20** – Mapas estáticos da sub-bacia do Ribeirão Rodeador. (a) Hidrografia. (b) Área Protegida (Flona).



**Figura 6.21** – Mapas estáticos da sub-bacia do Ribeirão Rodeador. (a) Altitude. (b) Classes de texturas agregadas.

e Qualificação 2; 6 = Reflorestamento). As células sem marcação correspondem à não-ocorrência de transição no período e as células com sombreado em cinza mais escuro correspondem às mais significativas transições detectadas.

**Tabela 6.10** – Modelo conceitual com as possíveis transições de uso do solo observadas na sub-bacia do Rodeador no período de 1984-2003.

| Classes | Classes |   |   |   |   |   |
|---------|---------|---|---|---|---|---|
|         | 1       | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1       |         |   |   |   |   |   |
| 2       |         |   | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 3       |         |   |   | ✓ | ✓ | ✓ |
| 4       |         |   | ✓ |   | ✓ | ✓ |
| 5       |         |   |   |   |   |   |
| 6       |         |   | ✓ | ✓ | ✓ |   |

A tabulação cruzada deu origem às tabelas 6.11 à 6.14, que auxiliaram nesta etapa. Essas tabelas mostram em valores relativos a hectares e a percentuais, as transições entre as seis classes encontradas na sub-bacia do Rodeador, que ocorreram de 1984 para 1994 e de 1994 para 2003, respectivamente. As diagonais de células com sombreado em cinza mais escuro correspondem aos quantitativos das classes originais que se mantiveram constantes durante o intervalo temporal avaliado. A partir das tabulações cruzadas é possível observar que as transições mais significativas destacadas no modelo conceitual (da classe Vegetação/Regeneração para a classe Área Rural de Uso Diversificado e da classe Área Rural de Uso Diversificado para a classe Vegetação/Regeneração), de fato, foram as mudanças detectadas em maior percentual na sub-bacia. Ademais, de 1984 para 1994 surgiu a classe Reflorestamento, que tem se mantido constante.

### 6.2.3 - Modelagem, Calibração e Validação

O primeiro passo na modelagem abordou a elaboração da matriz de transição anual. A matriz de transição (Tabela 6.15) foi gerada no *software* Dinamica EGO por transição cruzada com base no intervalo entre o mapa de uso inicial de 1994 e o mapa de uso final para 2003. A tabela 6.15 contém apenas os valores de transição, ou seja, as células sem valores correspondem a transições nulas e as células com “XXX” aos valores que foram mantidos. As células com sombreado mais escuro tratam-se das mudanças mais significativas detectadas na etapa de análise multitemporal, correspondendo às transições que receberam maior atenção na modelagem dinâmica.

**Tabela 6.11** – Transições observadas na sub-bacia de 1984 para 1994 em hectares.

|      | Classes (ha) | 1994         |        |          |          |       |        |
|------|--------------|--------------|--------|----------|----------|-------|--------|
|      |              | Classes (ha) |        |          |          |       |        |
|      |              | 1            | 2      | 3        | 4        | 5     | 6      |
| 1984 | 1            | 39,14        | 0      | 0        | 0        | 0     | 0      |
|      | 2            | 0            | 789,01 | 10,64    | 14,03    | 0     | 0      |
|      | 3            | 0            | 0      | 3.324,99 | 2.074,35 | 0,5   | 271,56 |
|      | 4            | 0            | 0      | 931,25   | 3.725,70 | 2,19  | 735,29 |
|      | 5            | 0            | 0      | 0        | 0        | 24,77 | 0      |

**Tabela 6.12** – Transições observadas na sub-bacia de 1984 para 1994 em percentuais.

|      | Classes (%) | 1994        |        |       |       |       |       |
|------|-------------|-------------|--------|-------|-------|-------|-------|
|      |             | Classes (%) |        |       |       |       |       |
|      |             | 1           | 2      | 3     | 4     | 5     | 6     |
| 1984 | 1           | 100,00      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0     |
|      | 2           | 0           | 100,00 | 0,25  | 0,24  | 0     | 0     |
|      | 3           | 0           | 0      | 77,93 | 35,68 | 1,82  | 26,97 |
|      | 4           | 0           | 0      | 21,82 | 64,08 | 7,97  | 73,03 |
|      | 5           | 0           | 0      | 0     | 0     | 90,21 | 0     |

**Tabela 6.13** – Transições observadas na sub-bacia de 1994 para 2003 em hectares.

|      | Classes (ha) | 2003         |        |          |          |       |          |
|------|--------------|--------------|--------|----------|----------|-------|----------|
|      |              | Classes (ha) |        |          |          |       |          |
|      |              | 1            | 2      | 3        | 4        | 5     | 6        |
| 1994 | 1            | 39,14        | 0      | 0        | 0        | 0     | 0        |
|      | 2            | 0            | 770,74 | 2,28     | 15,99    | 0     | 0        |
|      | 3            | 0            | 0      | 2.343,02 | 1.923,83 | 0     | 0        |
|      | 4            | 0            | 0      | 121,78   | 5.686,51 | 5,79  | 0        |
|      | 5            | 0            | 0      | 0        | 0        | 27,46 | 0        |
|      | 6            | 0            | 0      | 0        | 0        | 0     | 1.006,85 |

**Tabela 6.14** – Transições observadas na sub-bacia de 1994 para 2003 em percentuais.

|      | Classes (%) | 2003        |        |       |       |       |        |
|------|-------------|-------------|--------|-------|-------|-------|--------|
|      |             | Classes (%) |        |       |       |       |        |
|      |             | 1           | 2      | 3     | 4     | 5     | 6      |
| 1994 | 1           | 100,00      | 0      | 0     | 0     | 0     | 0      |
|      | 2           | 0           | 100,00 | 0,09  | 0,21  | 0     | 0      |
|      | 3           | 0           | 0      | 94,97 | 25,23 | 0     | 0      |
|      | 4           | 0           | 0      | 4,94  | 74,56 | 17,42 | 0      |
|      | 5           | 0           | 0      | 0     | 0     | 82,58 | 0      |
|      | 6           | 0           | 0      | 0     | 0     | 0     | 100,00 |

**Tabela 6.15** – Matriz de transição anual de 1994 para 2003.

|                  | Classes | 2003    |     |        |        |        |     |
|------------------|---------|---------|-----|--------|--------|--------|-----|
|                  |         | Classes |     |        |        |        |     |
|                  |         | 1       | 2   | 3      | 4      | 5      | 6   |
| 1<br>9<br>9<br>4 | 1       | XXX     | -   | -      | -      | -      | -   |
|                  | 2       | -       | XXX | 0,0004 | 0,0022 | -      | -   |
|                  | 3       | -       | -   | XXX    | 0,0655 | -      | -   |
|                  | 4       | -       | -   | 0,0031 | XXX    | 0,0001 | -   |
|                  | 5       | -       | -   | -      | -      | XXX    | -   |
|                  | 6       | -       | -   | -      | -      | -      | XXX |

Considerando: 1 = Corpos d'água; 2 = Mata Ciliar; 3 = Vegetação/Regeneração; 4 = Área Rural de Uso Diversificado; 5 = Área Urbana de Expansão e Qualificação 2; 6 = Reflorestamento.

Para escolha de pesos de evidência que auxiliem no estudo da dinâmica de uso e ocupação e das perdas de solo na sub-bacia do Rodeador trabalhou-se em paralelo com o cálculo da correlação entre as variáveis estáticas. O Índice de Cramer (V) e o de Incerteza de Informação Conjunta (JIU) foram os índices avaliados. A seleção dos pesos baseou-se nos resultados do JIU, porque ele tende a ser mais robusto que o V, uma vez que opera com base em valores percentuais da matriz de tabulação cruzada. O índice de Cramer, por sua vez, considera os valores absolutos da mesma matriz.

Dentre as variáveis estáticas candidatas a pesos de evidência foram avaliadas: Altitude, Áreas Protegidas, Classes de Solos, Fator K, Hidrografia, *Slope*, Textura, Distância à Hidrografia e Distância à Classe 4 (Área Rural de Uso Diversificado). As variáveis Classes de Solos, Fator K e Textura apresentaram alta correlação entre elas, superando o patamar de 60% de dependência. Entre estas variáveis selecionou-se a Textura devido à direta relação dela com as mudanças na classe Área Rural de Uso Diversificado. Além das variáveis Classes de Solos e Fator K, também foi descartada a variável *Slope*, porque esta não apresentou peso de evidência significativo. Outras variáveis relacionadas às unidades de solo da região que poderiam ser avaliadas como pesos de evidência são a permeabilidade e a estrutura dos solos.

A tabela 6.16 disponibiliza as variáveis que apresentaram razoável independência espacial e os respectivos valores do Índice de Cramer e de Incerteza de Informação Conjunta. Cabe salientar que as variáveis selecionadas mostraram-se espacialmente representativas nas probabilidades de transição da classe Vegetação/Regeneração para a classe Área Rural de Uso Diversificado e da classe Área Rural de Uso Diversificado para a classe Vegetação/Regeneração.

**Tabela 6.16** – Correlação espacial entre as variáveis selecionadas como pesos de evidência.

| Variável A              | Variável B              | Cramer V | JIU  |
|-------------------------|-------------------------|----------|------|
| Altitude                | Distância à Hidrografia | 0,46     | 0,29 |
|                         | Distância à Classe 4    | 0,27     | 0,27 |
|                         | Área de Proteção        | 0,28     | 0,27 |
|                         | Hidrografia             | 0,28     | 0,27 |
|                         | Textura                 | 0,36     | 0,34 |
| Distância à Hidrografia | Distância à Classe 4    | 0,35     | 0,17 |
|                         | Área de Proteção        | 0,35     | 0,17 |
|                         | Hidrografia             | 0,35     | 0,17 |
|                         | Textura                 | 0,42     | 0,26 |
| Distância à Classe 4    | Área de Proteção        | 0,45     | 0,55 |
|                         | Hidrografia             | 0,45     | 0,55 |
|                         | Textura                 | 0,45     | 0,55 |
| Área de Proteção        | Hidrografia             | 0,22     | 0,35 |
|                         | Textura                 | 0,22     | 0,35 |
| Hidrografia             | Textura                 | 0,14     | 0,01 |

Apesar de alguns índices serem relativamente altos, por exemplo, os avaliados em relação à Distância à Classe 4 que chegaram a 55%, o ato de descartar uma variável depende da importância dessa variável para o modelo. Desse modo, mesmo apresentando altos coeficientes de correlação, a Distância à Classe 4 será mantida por ter contribuído expressivamente com os resultados das simulações de cenários.

A seguir, nas tabelas 6.17 e 6.18, são analisados os pesos de evidência relacionados com as duas transições mais significativas encontradas no período de 1994 a 2003. Trata-se dos mesmos pesos adotados nas simulações dos cenários visualizados no subitem Prognósticos e que auxiliam na compreensão das mudanças tendenciais observadas. Nessas tabelas deve-se considerar as células sem conteúdo como situação indiferente e para a variável textura: 1 = argilosa + muito argilosa; 2 = média cascalhenta + média cascalhenta concrecionária; 3 = argilosa cascalhenta + argilosa muito cascalhenta; 4 = média + média a argilosa; e 5 = arenosa.

Após as etapas anteriores passou-se à simulação de cenários e a calibração e validação do modelo em paralelo. Para a calibração do modelo de simulação foram adotados procedimentos empíricos de análise visual comparativa entre as mudanças de uso e ocupação

do solo ocorridas durante o período de 1994 a 2003 e em um momento seguinte, a calibração das simulações de cenários futuros, com os ajustes que se fizeram necessários. Ademais, também foram calibrados e ajustados os parâmetros internos das funções *Expander* e *Patcher*, inclusas no *script* do modelo de simulação do Dinamica EGO.

**Tabela 6.17** – Pesos de evidência na transição da classe Vegetação/Regeneração para a classe Área Rural de Uso Diversificado.

| <b>Vegetação/Regeneração → Área Rural de Uso Diversificado</b> |                             |                                |
|--|-----------------------------|--------------------------------|
| <b>Variável</b>  | <b>Favorece a Transição</b> | <b>Desfavorece a Transição</b> |
| Altitude (metros)  | ≤ 1.110                     | > 1.110                        |
| Presença de Área de Proteção                                   | -                           | sim                            |
| Distância à Classe 4 (metros)                                  | ≤ 140                       | > 140                          |
| Distância à Hidrografia (metros)                               | > 50                        | ≤ 50                           |
| Presença de Hidrografia  | -                           | sim                            |
| Textura  | 1 e 4                       | 2, 3 e 5                       |

**Tabela 6.18** – Pesos de evidência na transição da classe Área Rural de Uso Diversificado para a classe Vegetação/Regeneração.

| <b>Área Rural de Uso Diversificado → Vegetação/Regeneração</b> |                             |                                |
|--|-----------------------------|--------------------------------|
| <b>Variável</b>  | <b>Favorece a Transição</b> | <b>Desfavorece a Transição</b> |
| Altitude (metros)  | > 1.140                     | ≤ 1.140                        |
| Presença de Área de Proteção                                   | sim                         | -                              |
| Distância à Classe 4 (metros)                                  | -                           | -                              |
| Distância à Hidrografia (metros)                               | ≤ 120                       | -                              |
| Presença de Hidrografia  | sim                         | -                              |
| Textura  | 2 e 3                       | 1 e 4                          |

A calibração e o ajuste do modelo dinâmico de simulação são de suma importância para se obter, um grau de similaridade, na etapa de validação, que ratifique a similaridade entre o mapa simulado e a realidade observada. Dessa forma, foram modeladas apenas as duas transições mais significativas destacadas na tabulação cruzada (Tabela 6.10) e na matriz de transição (Tabela 6.15). Transições, tais como, da classe Mata Ciliar para a classe Vegetação/Regeneração e da classe Mata Ciliar para a classe Área Rural de Uso Diversificado foram consideradas estáticas porque, de modo geral, os percentuais de transição dessas classes se mostraram baixos e visualmente geraram ruído nos cenários simulados.

A tabela 6.19 apresenta os parâmetros testados que apresentaram melhores resultados numéricos e/ou visuais na calibração e validação do modelo. Em relação aos parâmetros testados nas simulações, o ponto de partida para o tamanho e a variação das manchas foi a conversão da resolução dos mapas (10 m) para hectares (0,001 ha). Assim, o tamanho das manchas variaram a partir de 0,001 ha e a variância delas de 0,001 ha até o respectivo tamanho definido para a mancha. Já a isometria variou de 0 a 3, com melhores resultados quando definida como 1,0 ou 1,5. Desse modo, o melhor percentual de validação foi encontrado na simulação 1, apesar de visualmente ter apresentado ruído em algumas manchas correspondentes a classe Vegetação/Regeneração como pode ser observado no mapa de uso e ocupação da figura 6.24.

No próximo subitem serão apresentados os mapas de cenários relativos aos resultados obtidos com a simulação 1. Esta escolha baseou-se no critério quantitativo (% de validação), visto que visualmente a simulação 3 mostrou-se superior, apresentando menos ruído pela maior agregação das manchas. Apesar de superior qualitativamente, a simulação 3 apresentou grau de similaridade bem inferior ao da simulação 1, conforme a tabela 6.19.

**Tabela 6.19** – Parâmetros estabelecidos nas três melhores simulações.

| Parâmetros       |                          | Simulação 1 |       | Simulação 2 |       | Simulação 3 |       |
|------------------|--------------------------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|
|                  |                          | A           | B     | A           | B     | A           | B     |
| <i>Expander</i>  | Percentual (%)           | 65          | 50    | 65          | 50    | 65          | 50    |
|                  | Tamanho da Mancha (ha)   | 0,01        | 0,001 | 0,3         | 0,001 | 20          | 0,001 |
|                  | Variância da Mancha (ha) | 0,001       | 0,0   | 0,05        | 0,0   | 5           | 0,0   |
|                  | Isometria da Mancha      | 1,0         | 1,0   | 1,0         | 1,0   | 1           | 1,0   |
| <i>Patcher</i>   | Percentual (%)           | 35          | 50    | 35          | 50    | 35          | 50    |
|                  | Tamanho da Mancha (ha)   | 0,01        | 0,001 | 0,3         | 0,001 | 20          | 0,001 |
|                  | Variância da Mancha (ha) | 0,001       | 0,0   | 0,05        | 0,0   | 5           | 0,0   |
|                  | Isometria da Mancha      | 1,5         | 1,5   | 1,5         | 1,5   | 1,5         | 1,5   |
| <b>Validação</b> |                          | 80,4%       |       | 76,2%       |       | 61,1%       |       |

Transições: A = da classe Vegetação/Regeneração para a classe Área Rural de Uso Diversificado; B = da classe Área Rural de Uso Diversificado para a classe Vegetação/Regeneração.

#### 6.2.4 - Prognósticos

Realizados os procedimentos de calibração e validação do modelo, chegou-se aos mapas de uso e ocupação do solo. Primeiro as simulações foram feitas de 1994 para 2003, partindo do mapa da figura 6.19-a e validadas com o mapa de uso e ocupação de 2003 (Figura



6.18). Em seguida, partindo do mapa de 2003, foram simulados cenários que possam ser úteis ao planejamento estratégico da região, curto e médio prazo, como explicado no item 5.2.6 (página 95). Neste sentido, foram simulados o uso e ocupação da sub-bacia para 2008 (figura 6.24), para 2013 (curto prazo) e para 2017 (médio prazo).

Cabe ressaltar que as simulações realizadas consideram que em médio prazo serão mantidas as tecnologias agrícolas e agropecuárias utilizadas na região do PICAG, bem como a pressão exercida com o crescimento de Águas Lindas de Goiás. Ademais, considera-se que em médio prazo não devem ocorrer mudanças nas práticas de conservação de uso do solo.

Os produtos das simulações são *layers* com as probabilidades de transição de cada classe, de acordo com o número de iterações do modelo, bem como os cenários simulados para o intervalo de iterações definido. Os prognósticos gerados neste trabalho para a sub-bacia do Rodeador são apresentados e discutidos a seguir.

A base para avaliação dos prognósticos de perdas de solo foi a aplicação da EUPS tendo o parâmetro CP baseado nos mapas de uso e ocupação da sub-bacia para 1984, 1994 e 2003 (Figuras 6.18 e 6.19), junto aos demais parâmetros do modelo dinâmico tratados no sub-capítulo anterior.

Uma comparação numérica entre os prognósticos de perdas de solo elaborados está disponível na tabela 6.20. Como resultados foram gerados os mapas de estimativa de perdas de solo apresentados nas figuras 6.22-a, 6.22-b e 6.23-a, correspondendo aos anos de 1984, 1994 e 2003, respectivamente. Nesses mapas observa-se que houve uma significativa redução de perdas de solo de 1984 para 1994. Inclusive, de acordo com a tabela 5.4 (página 78), a estimativa de perdas de solo que em 1984 podia ser interpretada como média a forte, em 1994 passou a ser uma taxa média de erosão. Essa redução justifica-se por uma significativa regeneração da vegetação e principalmente pelo reflorestamento realizado na sub-bacia durante este período. Mesmo assim, as tendências de desmatamento mantiveram-se e as perdas de solo voltaram a crescer em 2003, conforme constatado na figura 6.23-a, mas com a estimativa continuando a ser classificada como uma taxa média de erosão.

A figura 6.23-b mostra a validação da modelagem em relação a 2003. Pode-se constatar que com os parâmetros do modelo de simulação 1 e validação alcançada de 80,4%, a estimativa de perdas de solo para 2003 se mostrou bem próxima à realidade, com uma diferença de 1,47 t/ha.ano. A simulação do uso e ocupação da sub-bacia para 2008 foi

comparada com o *Google Earth*, com a verificação visual da correspondência entre as classes do mapa tendencial e a imagem de satélite. A estimativa média anual de perdas de solo para 2008 de 56,47 t/ha.ano pode ser interpretada como uma taxa média a forte.

**Tabela 6.20** – Comparação entre os resultados dos prognósticos de perdas de solo.

| Ano de Prognóstico | Origem do Mapa de Uso e Ocupação | Média Anual de Perdas de Solo (t/ha.ano) | Interpretação da Taxa de Erosão |
|--------------------|----------------------------------|--|---------------------------------|
| 1984               | Classificação                    | 56,47                                    | Média a forte                   |
| 1994               | Classificação                    | 36,00                                    | Média                           |
| 2003               | Classificação                    | 47,82                                    | Média                           |
| 2003               | Simulação Tendencial             | 46,35                                    | Média                           |
| 2008               | Simulação Tendencial             | 56,47                                    | Média a forte                   |
| 2013               | Simulação Tendencial             | 68,00                                    | Média a forte                   |
| 2017               | Simulação Tendencial             | 79,54                                    | Média a forte                   |
| 2017               | Simulação Otimista               | 46,61                                    | Média                           |
| 2017               | Simulação Pessimista             | 83,03                                    | Média a forte                   |

Nos mapas de estimativa de perdas de solo para 2008 (Figura 6.25-a), 2013 (Figura 6.25-b) e 2017 (Figura 6.26-a) observa-se que apesar da sub-bacia do Rodeador localizar-se em Zona Rural de Uso Controlado (Seduma, 2007a), se forem mantidas as tendências de desmatamento encontradas até 2003, nos cenários tendenciais (pessimistas), a erosão na sub-bacia continuará crescendo nos próximos anos com taxas de perdas de solo de média a forte.

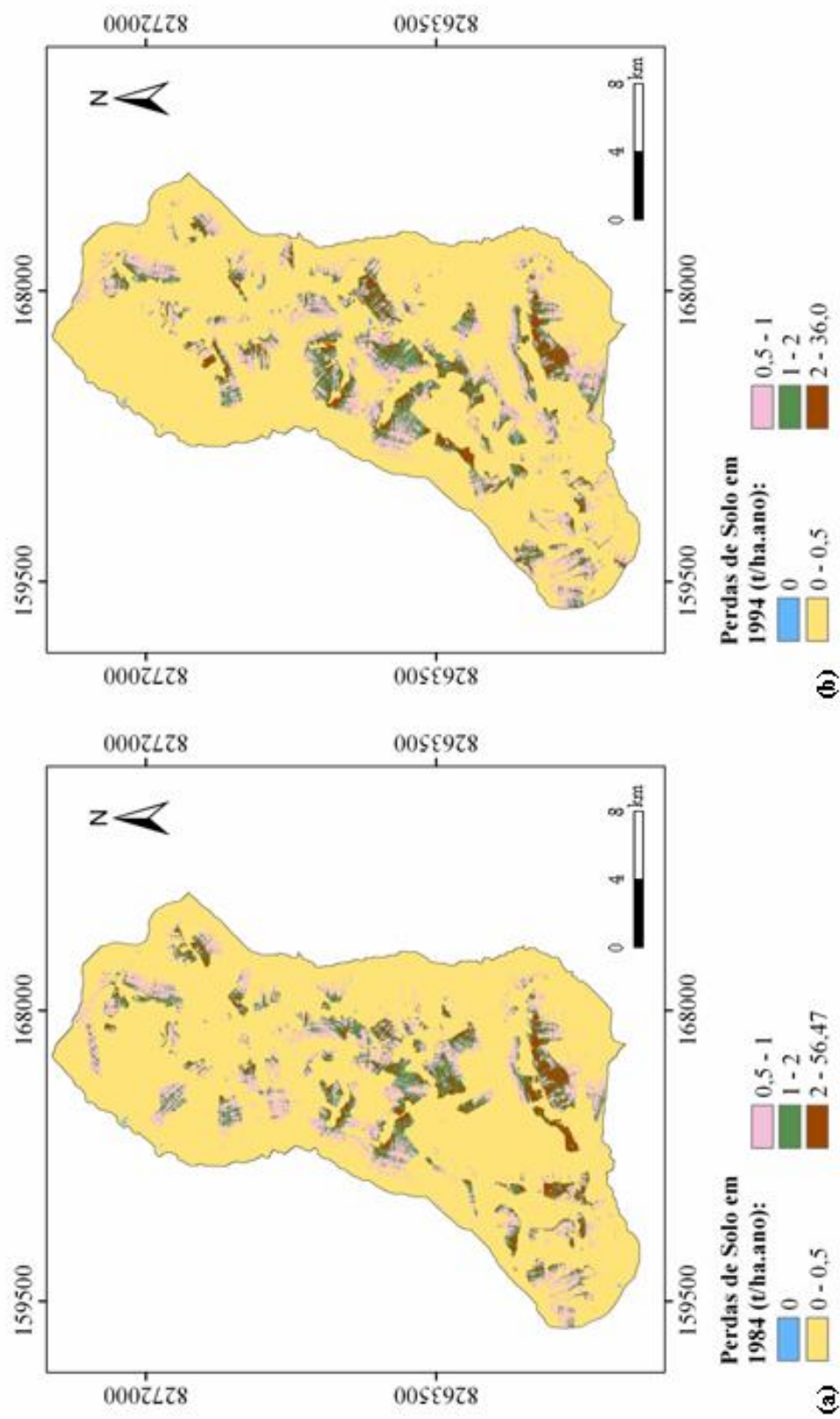
Além dos cenários tendenciais, também elaborou-se um cenário hipotético otimista para 2017 (Figura 6.26-b). Nesse cenário considerou-se um peso de evidência maior para regeneração da vegetação em áreas anteriormente desmatadas (transição da classe Área Rural de Uso Diversificado para a classe Vegetação/Regeneração) e ausência de novos desmatamentos (transição da classe Vegetação/Regeneração para a classe Área Rural de Uso Diversificado). De acordo com esta estimativa otimista, as perdas de solos permaneceriam praticamente estáveis em relação ao ano de 2003, voltando a uma taxa de erosão interpretada como média.

Para prognósticos, também foi concebido um cenário hipotético para 2017, mais pessimista que o cenário tendencial (Figura 6.27-a). Nesse outro cenário, não somente considerou-se que não ocorrerão transições de regeneração da vegetação e que as manchas da classe reflorestamento serão totalmente desmatadas ao longo dos próximos anos, com

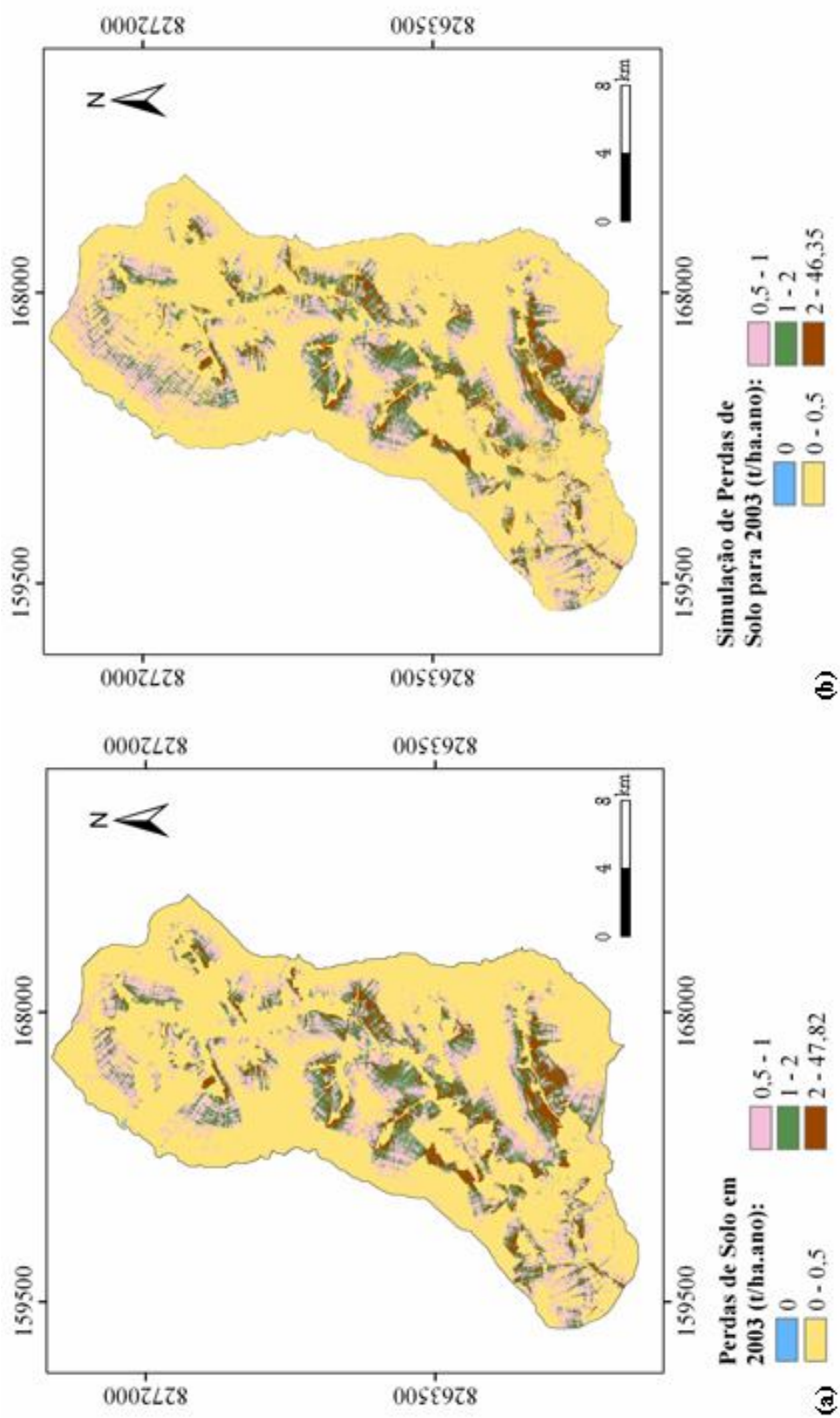
mudança destas manchas para a classe Área Rural de Uso Diversificado, mas também elevou-se o peso das transições de desmatamento.

Na figura 6.27-b apresenta-se o potencial de perdas de solo da sub-bacia, quantificando o pior cenário possível, isto é, solo exposto e sem prática conservacionista, atribuindo-se o valor 1 para os fatores C e P. Segundo a tabela 5.3 (página 78), o potencial de perdas de solo de 418,02 t/ha.ano da sub-bacia do Rodeador pode ser interpretado como um valor moderado. De acordo com o mapa potencial de erosão, pode-se constatar que numericamente os cenários simulados ficaram abaixo da pior situação possível de ocorrer na sub-bacia do Ribeirão Rodeador.

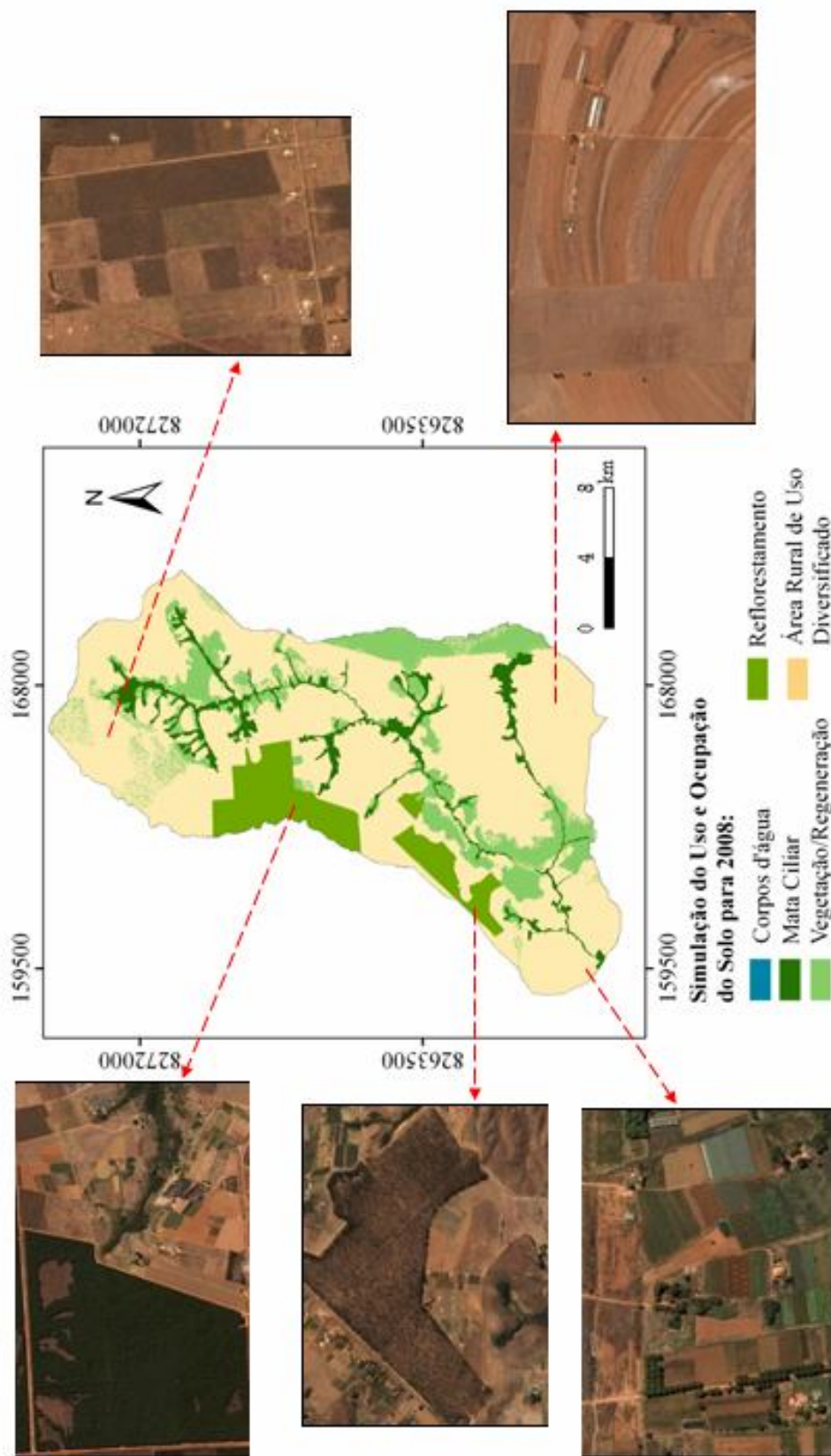
Ainda em relação aos prognósticos de perdas de solo gerados para a sub-bacia do Rodeador, foram avaliadas as áreas mais susceptíveis a perdas de solo na sub-bacia. Observa-se nos prognósticos, que as áreas mais susceptíveis a erosão são as áreas desmatadas e classificadas como Área Rural de Uso Diversificado. As mudanças para esta classe, conforme os pesos de evidência da tabela 6.17, são favorecidas em locais: com até 1.110 m de altitude, que não pertençam a Flona, com uma distância às hidrografias superior a 50 m e com textura argilosa, muito argilosa, média e média a argilosa. Outro peso de evidência para o desmatamento é a distância até a classe Área Rural de Uso Diversificado. Quanto menor a distância a esta classe, maiores são as chances de novos desmatamentos. As evidências para esta transição têm maior peso quando a classe analisada estiver até 140 m de distância da classe Área Rural de Uso Diversificado.



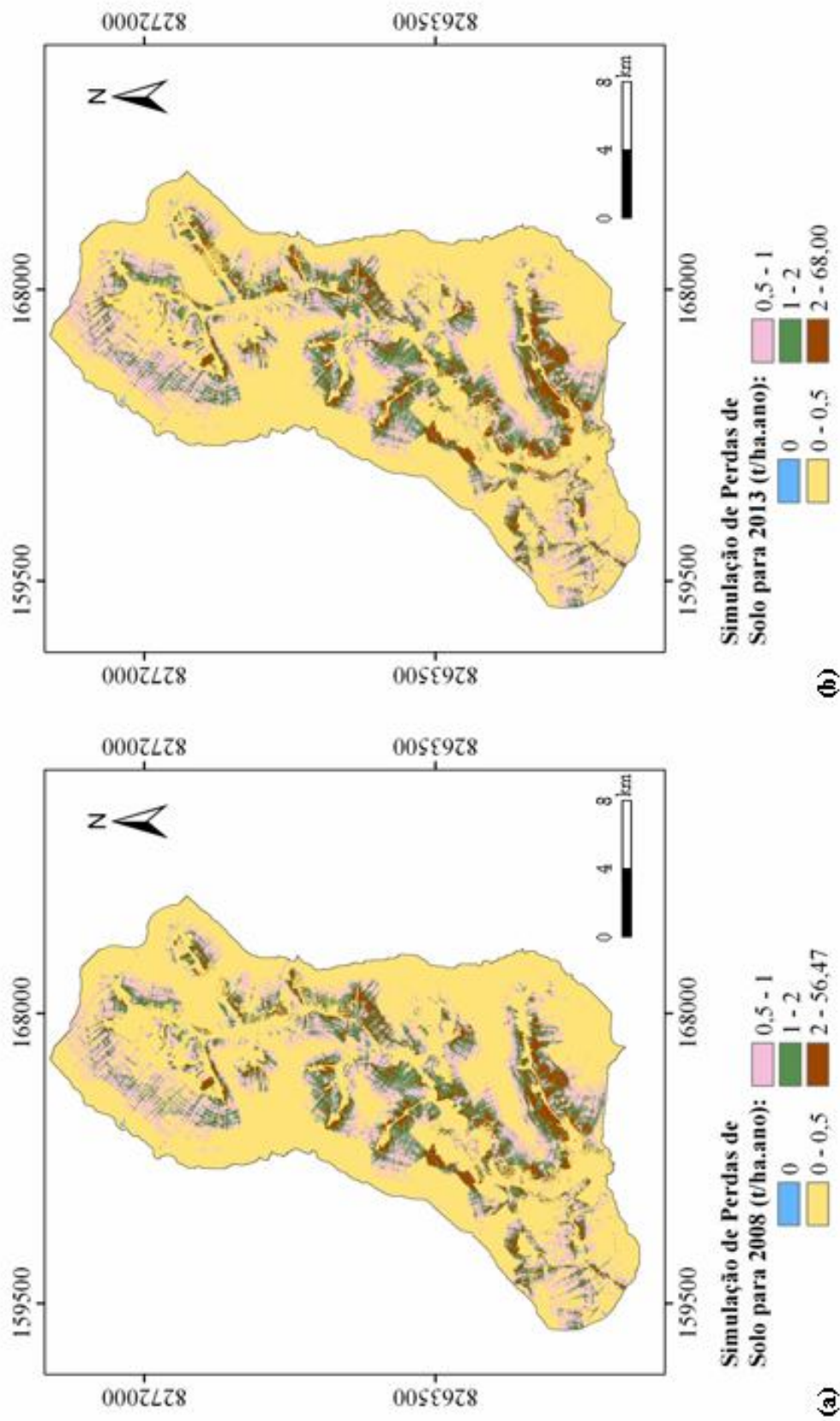
**Figura 6.18** – Mapas dinâmicos de estimativa de perdas de solo da sub-bacia do Rodoador. (a)1984. (b)1994.



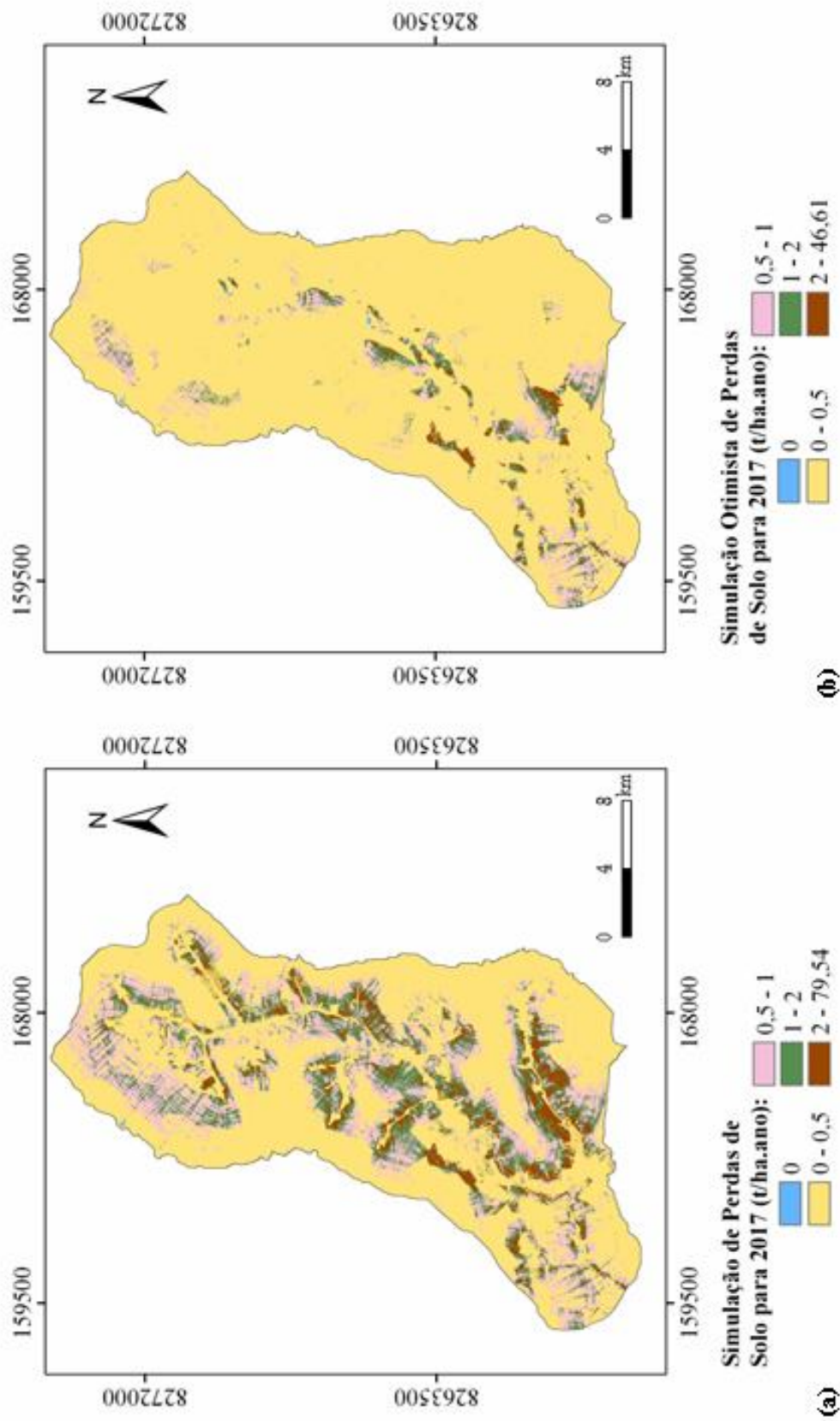
**Figura 6.19** – Mapas dinâmicos de estimativa de perdas de solo da sub-bacia do Rodeador. (a) 2003. (b) Simulação para 2003.



**Figura 6.20** – Simulação do uso do solo da sub-bacia do Rodeador para 2008 e validação visual com imagens do *Google Earth* em 06/02/2008.

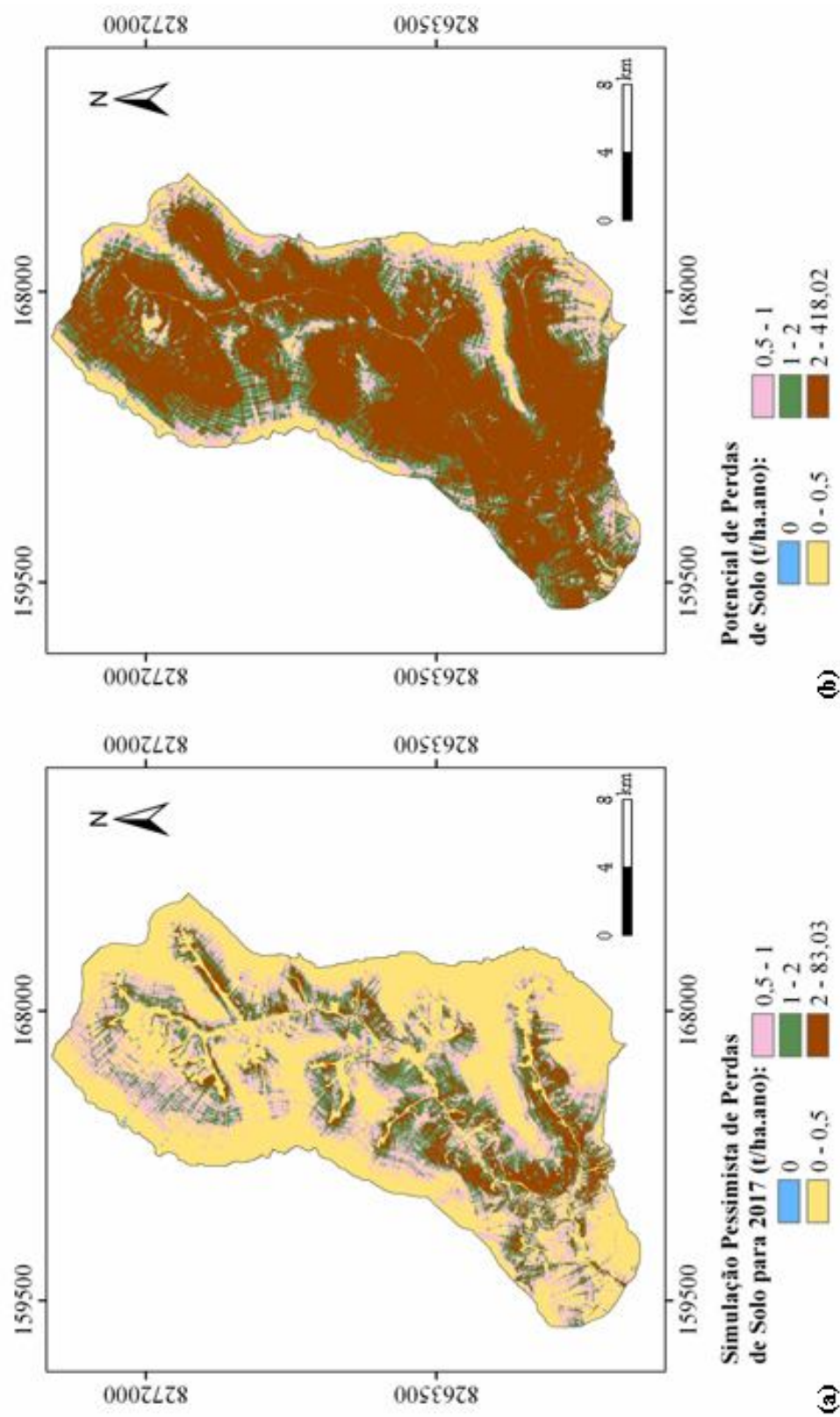


**Figura 6.21** – Mapas dinâmicos de simulação da estimativa de perdas de solo da sub-bacia do Rodeador. (a) 2008. (b) 2013.



**Figura 6.22** – Mapas dinâmicos de simulação da estimativa de perdas de solo da sub-bacia do Roddeador. (a) 2017. (b) 2017 otimista.





**Figura 6.23** – Mapas dinâmicos de estimativa de perdas de solo da sub-bacia do Rodeador. (a) Simulação 2017 pessimista. (b) Erosão Potencial.



## Capítulo 7

### Conclusões

O resultado do estudo desta tese de doutorado torna viável a utilização mais eficiente da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) ao reduzir algumas das limitações desta equação para ser utilizada em modelagem dinâmica de perdas de solo. Nesse sentido, enfatizou-se a melhoria de dois fatores que exercem relevante importância na estimativa de erosão: o cálculo do fator topográfico (fator LS) e do fator uso, manejo e práticas conservacionistas (fator CP).

O método proposto para o cálculo do fator LS modificado permite estimar com maior representatividade este parâmetro estático na EUPS e identificar as áreas mais susceptíveis à erosão, adotando o algoritmo  $D_{\infty}$  na determinação de direção de fluxo d'água e de sedimentos na bacia. O método  $D_{\infty}$  apresenta resultados mais significativos em relação aos obtidos pelo tradicional D8 na estimativa atual e potencial de perdas de solo por erosão laminar.

Além da quantificação e da identificação das áreas mais susceptíveis à erosão com análise espacial, a incorporação do parâmetro tempo permite uma avaliação mais detalhada dos processos erosivos na bacia. Assim, a modelagem dinâmica de perdas de solo mostra-se recomendável para o entendimento da correlação entre as mudanças do uso e ocupação do solo no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto e a direta variação da estimativa de perdas de solo na região. Esta correlação justifica-se por ser o parâmetro CP um fator dinâmico na Equação Universal de Perdas de Solo, uma vez que mudanças no uso e ocupação do solo apresentam um comportamento não-estático.

A simulação de cenários futuros de perdas de solo ratifica as tendências de mudanças no uso e ocupação observadas nas últimas décadas no Alto Curso do Descoberto, bem como identifica as áreas mais susceptíveis à erosão nos próximos anos. Conclui-se, portanto, que modelos dinâmicos, no caso deste estudo a modelagem no ambiente Dinamica EGO empregada, constitui uma potencial ferramenta para antecipar prováveis tendências passíveis de ocorrer numa bacia hidrográfica.

Diante do exposto, o modelo dinâmico proposto contribui com uma estimativa multitemporal de perdas de solo por erosão laminar que representa de forma mais real o caminho seguido pelo fluxo d'água e de sedimentos e sua acumulação. O modelo dinâmico possibilita, ainda, que as simulações de cenários colaborem com o planejamento estratégico de curto e médio prazo de uma área em expansão, como é o caso do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto. Dessa forma, os resultados fornecerão instrumentos relevantes a tomadores de decisão (*stakeholders*) em nível governamental e não-governamental. Ademais, os resultados deste estudo contribuem sobremaneira, para que modelos de simulação espacial deixem de ser apenas objeto de pesquisa acadêmica tornando-se de fato um instrumento aplicável ao suporte de decisões em ordenamento territorial.

O modelo dinâmico de perdas de solo elaborado poderá ser utilizado e aperfeiçoado em outras bacias hidrográficas, por exemplo, estendido ao DF, bem como a outras áreas que disponham de uma base de dados similar ou superior. Outro aspecto interessante seria obter um número de variáveis estáticas independentes que melhor justifiquem o fenômeno de perdas de solo. Além disso, também seria importante a utilização de imagens de satélite de alta resolução na geração dos mapas de uso e ocupação do solo.

No futuro, os resultados das estimativas tendenciais de perdas de solo poderão ser validados, por exemplo, com a realização de estudos batimétricos no reservatório do Rio Descoberto, bem como por uma análise detalhada do aporte de sedimentos no reservatório por sub-bacia, baseando-se em amostras coletadas em campo.

## Referências Bibliográficas

- Aciesp. 1987. *Glossário de ecologia*. ACIESP/CNPq/FAPESP, Secretaria de Ciência e Tecnologia, 57, São Paulo, 91 pp.
- Almeida, C.M. 2003. *Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 321 p.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. *In: SBG/NE, Simp. Geol. Nord., Campina Grande, 8: 363-391.*
- Alves, M. 2000. *Estimativa da perda de solo por erosão laminar na Bacia do Rio São Bartolomeu-DF usando técnicas de geoprocessamento*. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser300/trabalhos/mariza.pdf>. Acesso em: 14 de setembro de 2007.
- Apolinário, R.F., Valentin, E.F.D., De Souza, N.M., Walde, D.H.G. 2006. Erosion modeling in hydrographic pilot basins in Brasília (Federal District), Brazil. *In: 10<sup>th</sup> IAEG, Engineering Geology for Tomorrow's Cities, Nottingham, United Kingdom, Paper 427:1-11.*
- Araújo, E.P. 2006. *Aplicação de dados SRTM à modelagem da erosão em microbacias por geoprocessamento*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 88 p.
- Araújo Filho, J.O. 1981. Contribuição à estratigrafia e tectônica da região da Megainflexão dos Pirineus, Goiás Centro-Meridional. *In: SBG, Simp. Geol. Centro Oeste, Goiânia, Resumos, 1:24-26.*
- Araújo Filho, J.O. 2000. The Pirineus Syntaxis: an example of the intersection of two brasiliano fold-thrust belts in central Brazil and its implications for the tectonic evolution of western Gondwana. *Rev. Bras. Geoc., 30:144-148.*
- Ávila, V.B. 2005. *Relação entre o uso e manejo do solo em uma bacia rural e a contribuição de nitrogênio, fósforo e sedimentos a corpos hídricos*. Dissertação de Mestrado,

- Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 114 p.
- Baptista, G.M. 1997. *Diagnóstico Ambiental da perda laminar do solo, no Distrito Federal, por meio do Geoprocessamento*. Dissertação de Mestrado, Recursos Hídricos - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 112 p.
- Barreto Neto, A.A. 2004. *Modelagem Dinâmica de Processos Ambientais*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Campinas, 123 p.
- Bertoni, J. & Lombardi Neto, F. 1993. *Conservação do solo*. 3ª edição, Ícone Editora, São Paulo, 355 pp.
- Bloise, G.L.F., Carvalho Junior, O.A., Reatto, A., Martins, E.S., Carvalho, A.P.F. 2001. *Avaliação da suscetibilidade natural à erosão dos solos da Bacia do Olaria-DF*. Planaltina-DF, Embrapa-Cerrados, *Boletim Técnico* 14, 33 p.
- Bonham-Carter, G. F. 1994. *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Ontario: Pergamon, 305 pp.
- Braun, O.P.G. 1971. Contribuição à geomorfologia do Brasil Central. *Rev. Bras. Geogr.*, **32**:3-39.
- Brito, F.A. 1999. *Gestão Ambiental por resultados para a APA Bacia do Rio Descoberto*. Dissertação de Mestrado, Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, 110pp.
- Caesb. 1969. *Estudos Hidrológicos*. Geotécnica S.A. – Engenheiros e Consultores, Rio de Janeiro, 119 pp.
- Caesb. 1985. *Plano de proteção do Lago Descoberto*. Brasília, Relatório Interno.
- Caesb. 1995. *SOS Descoberto antes que seja tarde*. Brasília, 20 pp.
- Caesb. 2003. *Estudos de Concepção e de Viabilidade Técnica e Econômica para Elevação da Crista do Vertedouro da Barragem do Rio Descoberto*. Porto Alegre, Magna Engenharia Ltda, Levantamentos Topobatimétricos, **2**, 164 p.
- Câmara, G. & Monteiro, A.M.V. 2003. Introdução à modelagem dinâmica espacial. *In*: SBSR, Simp. Bras. Sens. Remoto. Belo Horizonte, *Tutorial*.

- Cardoso, E.A. 2003. *Relação solo-paisagem na Bacia do Alto Curso do Rio Descoberto Distrito Federal/Goiás*. Dissertação de Mestrado, Ciências Agrárias, Universidade Federal da Bahia.
- Carmelo, A.C. 2002. *Caracterização de aquíferos fraturados por integração de informações geológicas e geofísicas*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 153 p.
- Carmo, M.S. 2001. *Geoquímica de águas e sedimentos da corrente da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto, Brasília-DF*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 100 p.
- Carvalho, M.P., Lombardi Neto, F., Vasques Filho, J., Cataneo, A. 1989. Índices de erosividade da chuva correlacionados com as perdas de um Podzólico Vermelho-Amarelo eutrófico textura argilosa/muito argilosa de Mococa (SP): primeira aproximação do fator erodibilidade dos solos. *Rev. Bras. Cien. Solo*, **13**:237-242.
- Carvalho, N.O. 1994. *Hidrossedimentologia prática*. Brasil, Ministério de Minas e Energia, Cia Pesq. Rec. Minerais, Rio de Janeiro, 372 pp.
- Carvalho Jr., O.A., Carvalho, A.P.F.; Oliveira, A.L. 1997. Metodologia para a estimativa da distância horizontal do comprimento de rampa por meio de técnicas de geoprocessamento. *In: SBCS, Congr. Bras. Ciên. Solo, Rio de Janeiro-RJ, 26, Anais*.
- Carvalho Jr., O.A., Carvalho, A.P.F., Rodrigues, N.Q.N., Guimarães, R.F. 2001. Confecção do mapa de susceptibilidade à erosão a partir da USLE utilizando para estimar o fator topográfico o programa RAMPA. *In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia-GO, 7, Anais*.
- Carvalho Jr., O. A. & Guimarães, R.F. 2001. Implementação em ambiente computacional e análise do emprego da área de contribuição no cálculo do fator topográfico (LS) da USLE. *In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia-GO, 7, Anais*.
- Castro, F.V.F., Soares-Filho, B.S, Mendoza, E. 2007. Modelagem de cenários de mudanças na região de Brasília aplicada ao Zoneamento Ecológico Econômico do estado do Acre. *In: Simp. Bras. Sensoriamento Remoto, 13, Anais*, p. 5135-5142.
- Chaves, H.M.L. 1994. *Estimativa da erosão atual e potencial no Vale do São Francisco*. Brasília, Relatório Final de Consultoria, CODEVASF – FAO, 35 p.

- CPRM/Embrapa. 2003. *Zoneamento ecológico-econômico da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno: fase I*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil; Embrapa; MI/SCO, Rio de Janeiro.
- Codeplan. 1984. *Atlas do Distrito Federal*. Secretaria do Governo/Secretaria da Educação e Cultura/Codeplan, Brasília, 78 pp.
- Costanza, R., 1989. Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. *Ecological Modelling*, **47**:199-215.
- Denardin, J.E. 1990. *Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos*. Tese de Doutorado, Agronomia, ESALQ, USP, 81 p.
- Desmet, P.J.J. & Govers, G. 1996. *A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units*. Journal of Soil and Water Conservation, **51**(5):427-433.
- Dutra, M. 2003. *Caracterização do meio físico da região de Águas Lindas-GO: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 96 p.
- Eiten, G. 1994. Vegetação. In: Novaes-Pinto, M. (org.) *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Editora da Universidade de Brasília, Brasília, pp.: 17-74.
- Embrapa. 1978. *Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal*. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Boletim técnico **53**, 455 p.
- Embrapa. 1999. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Serviço de Produção de Informação. EMBRAPA-EPI. Brasília, 412 pp.
- Freitas, L.F., Gomes-Loebmann, D., Guimarães, R.F., Carvalho Jr., O.A., Gomes, R.A.T. 2005. Identificação dos fatores deflagradores da erosão em voçoroca a partir da simulação do fluxo acumulado em área urbana. In: Congr. Bras. Geogr. Física Aplicada, São Paulo, 11, *Anais*, p. 191-202.
- Freitas-Silva, F.H. & Campos, J.E.G. 1998. Geologia do Distrito Federal. In: IEMA/SEMATEC/UnB. *Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal*. Relatório Técnico, 1, Brasília, pp.: 1-87.



- Fuck, R.A., Jardim de Sá, E.F., Pimentel, M.M., Dardene, M.A., Pedrosa Soares, A.C. 1993. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos. *In: Dominguez, J.M.L. & MISI, A. (eds). O Cráton do São Francisco.* Salvador, SBG: SGM: CNPq, pp.: 161-185.
- Fujihara, A.K. 2002. *Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista com suporte de geoprocessamento.* Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 118 p.
- Galdino, S., Risso, A., Soriano, B.M.A., Vieira, L.M., Padovani, C.R., Pott, A., Melo, E., Almeida Júnior, N. 2003. *Perdas de solo na Bacia do Alto Taquari.* Corumbá-MS, Embrapa Pantanal, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 44, 38 p.
- Gameiro, M.G. 1997. *Avaliação de métodos para obtenção dos fatores "L" e "S" da EUPS numa microbacia, via geoprocessamento e banco de dados.* Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 116 p.
- Godoy, M.M.G. 2004. *Modelagem da dinâmica de ocupação do solo no bairro Savassi, Belo Horizonte, Brasil.* Dissertação de Mestrado, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, 84 p.
- Gonçalves, D.A., Sousa Júnior, W.C., Almeida, C.M. 2007. Modelagem de alteração de uso e cobertura da terra em uma porção do município de Mineiros-GO utilizando o método de pesos de evidência. *In: SBGFA – Simp. Bras. Geogr. Física Aplicada, Natal, 12, Anais.*
- Guerra, A.J.T. 1999. Início do Processo Erosivo. *In: Guerra, A.J.T., Silva, A.S., Botelho, R.G.M. Erosão e conservação dos solos. Conceitos, temas e aplicações.* Bertand Brasil, Rio de Janeiro, pp.17-56.
- Gunkel, G., Lange, U., Walde, D.H.G., Rosa, J.C. 2003. Environmental and operation impact of a reservoir in Amazon, Curuá-Una, Pará/Brazil. *Lakes & Reservoirs, Research and Management, Carlton, 8:201-216.*
- Hagen, A., 2003. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science, 17(3): 235–249.*
- Hutchinson, M.F. 1988. *Calculation of hydrologically sound digital elevation models.* Third International Symposium on Spatial Data Handling, Sydney. Columbus, Ohio: International Geographical Union.

- Hutchinson, M.F. 1989. *A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits*. Journal of Hydrology: **106**, 211-232.
- King, L.C. 1957. A geomorfologia do Brasil Central. *Rev. Bras. Geogr.*, **18**:147-265.
- Kreznor, W.R., Olson, K.R., Johnson, D.L. Field evaluation of methods to estimate soil erosion. *Soil Sci.*, **153**(1):69-81.
- Lea, N. L. 1992. An aspect driven kinematic routing algorithm. *In: Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics*, Edited by A. J. Parsons & A. D. Abrahams, Chapman & Hall, New York.
- Lombardi Neto, F. & Moldenhauer, W.C. 1992. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. *Bragantia*, Campinas, **51**(2): 189-196,
- Martins, E.S. & Baptista, G.M.M. 1998. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. *In: IEMA/UnB. Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal*. Relatório Técnico, 1, Brasília, pp.: 89-134.
- Meirelles, M.S.P., Camara, G., Almeida, C.M. 2007. *Geomática: modelos e aplicações ambientais*. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, DF, 593 pp.
- Moore, I. D. & Burch, G.J. 1986. Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, **50**(5):1294-1298.
- Moraes, L.L. 2004. *Estudo do rebaixamento de lagoas cársticas no Distrito Federal e Entorno: a interação hidráulica entre águas subterrâneas e superficiais*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 123p.
- Morais, R. 2003. *Integração de dados de geologia ambiental, de engenharia florestal e de política social aplicados ao estudo do assoreamento das represas do Descoberto e de Santa Maria, Distrito Federal*. Laboratório de Geofísica Aplicada, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Relatório Técnico, 24 p.
- Moreira, A.A. 2005. *Caracterização geoquímica do lodo da estação de tratamento de água da barragem do Rio Descoberto, Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado, Geoquímica e Meio Ambiente, Universidade Federal da Bahia.
- Morgan, R.P.C. 1995. *Soil Erosion and Conservation*. Longman, London, 298 pp.

- Novaes-Pinto, M. 1986. Superfícies de aplainamento na Bacia do São Bartolomeu, Distrito Federal/Goiás. *Rev. Bras. Geogr.*, **48**:237-257.
- Novaes-Pinto, M. 1994. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. *In*: Novaes-Pinto, M.N. (Org.). *Cerrado, caracterização, ocupação e perspectiva*. Brasília, pp.: 285-344,
- O'Callaghan, J.F. & Mark, D.M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Process.* , **28**(3), 323-344.
- Pedrosa, B.M. 2003. *Ambiente computacional para modelagem dinâmica espacial. TerraML*. Tese de Doutorado, Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 71 p.
- Pontius, R.G. Jr., 2002. Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* , **68**(10):1041-1049.
- Power, C., Simms, A., White, R., 2001. Hierarchical fuzzy pattern matching for the regional comparison of Land Use Maps. *International Journal of Geographical Information Science*, **15**(1):77-100.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., Planchon, O. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrol. Proc.*, **5**: 59–80.
- Ramos, V.M., Guimarães, R.F., Redivo, A.L., Carvalho Jr., O.A., Fernandes, F.N.E, Gomes, R.A.T. 2003. Avaliação de Metodologias de Determinação do Cálculo de Áreas de Contribuição. *Rev. Bras. Geomorfologia*, **4**:41-49.
- Reatto, A., Martins, E.S., Cardoso, E.A., Carvalho Jr., O.A., Guimarães, R., Silva, A.V., Farias, M.F.R. 2003a. *Levantamento de reconhecimento de solos de alta intensidade do Alto Curso do Rio Descoberto, DF/GO, escala 1:100.000*. Planaltina-DF, Embrapa-Cerrados, Boletim Técnico 111, 28 p.
- Reatto, A., Martins, E.S., Cardoso, E.A., Spera, S.T., Carvalho Jr., O.A., Guimarães, R., Farias, M.F.R., Silva, A.V. 2003b. *Relação entre as classes de solos e as principais fitofisionomias do Alto Curso do Rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás*. Planaltina-DF, Embrapa-Cerrados, Boletim Técnico 92, 55 p.
- Rêgo, M.C.A.M. 1997. *Mapeamento geotécnico da porção sul da Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio Descoberto*. Dissertação de Mestrado, Geotecnia, Faculdade

- de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 124 p.
- Reichardt, K., Angelocci, L.R., Bacchi, O.O.S., Pilotto, J.E. 1995. Daily rainfall variability at a scale (1.000 ha), in Piracicaba, SP, Brazil, and its implications on soil water recharge. *Scientia Agricola*, Piracicaba, 52(1):43-49.
- Rennó, C.D. 2003. *Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 158 p.
- Rodrigues, H.O., Soares-Filho, B.S., Costa, W.L.S. 2007. Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. In: Simp. Bras. de Sens. Remoto, Florianópolis, Brasil, INPE, 13, *Anais*, p. 3089-3096.
- Roig, H.L. 2005. *Modelagem e integração de dados aplicados à análise dos processos erosivos e de sedimentação – o caso da Bacia do Rio Paraíba do Sul – SP*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 223 p.
- Roig, H.L., Rêgo, A.P.M., Dantas, E., Meneses, P., Walde, D.H.G., Goia, S.C.L. 2005. Assinatura isotópica Sm-Nd de sedimentos em suspensão: implicações na caracterização da proveniência dos sedimentos do Rio Paraíba do Sul - SP. *Rev. Bras. Geoc.*, **35**: 503-514.
- Ruhoff, A.L. 2004. *Gerenciamento de recursos hídricos em bacias hidrográficas: modelagem ambiental com a simulação de cenários preservacionistas*. Dissertação de Mestrado, Geomática, Universidade Federal de Santa Maria, 93 p.
- Santos, A.D. 2003. *Estudo da distribuição de metais em sedimentos do Lago Descoberto-DF*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Química, Universidade de Brasília, 76 p.
- Santos, V.S., Oliveira, O.J., Moreira, M.A.A., Lorandi, R. 2006. Análise e espacialização das perdas médias de solo por erosão hídrica laminar na bacia hidrográfica do Tenente Amaral em Jaciara, Mato Grosso, Brasil. In: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Campo Grande, 1, *Anais*, p.247-256.
- Schiavetti, A. & Camargo, A.F.M. 2002. *Conceitos de bacias hidrográficas: teorias e aplicações*. Editus, Ilhéus, BA, 289 pp.

- Seduma. 2004. *Modelo de gestão estratégica do Território do Distrito Federal*. Governo do Distrito Federal/Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, Brasília-DF, 140 pp.
- Seduma. 2006. *Revisão do PDOT - Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal*. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Disponível em: <http://pdot.seduh.df.gov.br/sites/200/260/RevisaoPDOT/AudienciaRegionais/audienciaregionalEstruturaUrbana.pdf>. Acesso em: 10 de abril de 2006.
- Seduma. 2007a. *Minuta do Projeto de Lei Complementar do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal 2007*. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Disponível em: <http://pdot.seduh.df.gov.br/>. Acesso em: 10 de janeiro de 2008.
- Seduma. 2007b. *Documento Técnico do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal 2007*. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Disponível em: <http://pdot.seduh.df.gov.br/>. Acesso em: 10 de janeiro de 2008.
- Silva, V.C. 2001. *Erosão atual, erosão potencial e aporte de sedimento na Bacia do Rio Paracatu (MG/GO/DF)*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 108 p.
- Silva, A.M., Schulz, H.E., Camargo, P.B. 2004. *Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas*. RiMa, São Carlos, 140 pp.
- Soares-Filho, B.S., 1998. *Modelagem da dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 285 p.
- Soares-Filho, B.S., Araújo, A., Cerqueira, G.C. 2001. DINAMICA – Um software para simulação de dinâmica de paisagens. In: Workshop em Tratamento de Imagens, NPDI/DCC/UFGM, 2, *Anais*.
- Soares-Filho, B.S., Pennachin, C.L., Cerqueira, G. 2002. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, **154**: 217-235,
- Soares-Filho, B.S., Nepstad, D., Cerqueira, G., Alencar, A. 2003. System architecture of a spatially explicit model to simulate deforestation in the Amazon basin. In: Land Use and

- Land Cover Change, 7<sup>th</sup> LBA-ECO Science Team Business Meeting in Fortaleza, Fortaleza, 4 a 7 de novembro de 2003.
- Soares-Filho, B.S., Alencar, A., Nepstad, D., Cerqueira, G.C., Vera Diaz, M., Rivero, S., Solórzano, L., Voll, E. 2004a. Simulating the Response of Deforestation and Forest Regrowth to Road Paving and Governance Scenarios Along a Major Amazon Highway: The Case of the Santarém-Cuiabá Corridor. *Global Change Biology*, **10**: 745-764.
- Soares-Filho, B.S., Cerqueira, G.C., Araújo, W.L., Voll, E. 2004b. Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular. *In*: Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais. Albernaz A.L., Silva J.M.C. da, Valeriano, D.(editores) Editora Museu Paraense Emílio Goeldi.
- Soares-Filho, B.S., Nepstad, D., Curran, L., Voll, E., Cerqueira, G., Garcia, R.A., Ramos, C.A., McDonald, A., Lefebvre, P., Schlesinger, P. 2006. Modeling conservation in the Amazon basin. *Nature, London*, **440**: 520-523.
- Stein, D.P., Donzelli, P.L., Gimenez, A.F., Ponçano, W.L., Lombardi Neto, F. 1987. Potencial de erosão laminar, natural e antrópica, na Bacia do Peixe-Parapanema. Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 4, *Anais...* Marília, 1, p. 105-135.
- Steinke, V.A. 2003. *Uso integrado de dados digitais morfométricos (altimetria e sistemas de drenagem) na definição de unidades geomorfológicas no Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 104 p.
- Strahler, A.N. & Strahler, A.H. 1994. *Geografia física*. Omega, Barcelona.
- Tarboton, D.G. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, **33**(2): 309-319.
- Tarboton, D.G. 2003. Terrain Analysis using digital elevation models in hydrology. In: ESRI Users Conference, San Deigo, July 7-11.
- Terracap/Engea. 1991. EIA - Zona de expansão urbana da cidade satélite de Brazlândia, 2.
- Tomazoni, J.C. & Guimarães, E. 2005. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na Bacia do Rio Jirau. *Rev. Bras. Carto.*, **57**:235-244.

- Valentin, E.F.D., Rosa, J.W.C., Roig, H.L., Walde, D.H.G. 2008. Avaliação da influência do cálculo da direção e da acumulação de fluxo na estimativa de erosão laminar utilizando a Equação Universal de Perdas de Solo. *Rev. Bras. Rec. Hidr.* Submetido.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. 1958. Rainfall energy and its relationships to soil loss. *Trans. Am. Geoph. Union*, **39**: 285-291.
- Wischmeier, W.H., Johnson, C.B., Cross, B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, Ankeny, IA, **26**:189-193.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D. 1978. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Agricultural Handbook, 573, Washington: USDA/ARS, 58 pp.

**ANEXOS:**

**PUBLICAÇÕES**



## **ARTIGOS:**

- Valentin, E.F.D., Rosa, J.W.C., Roig, H.L., Walde, D.H.G. 2008. Avaliação da influência do cálculo da direção e da acumulação de fluxo na estimativa de erosão laminar utilizando a Equação Universal de Perdas de Solo. *Rev. Bras. Rec. Hidr.* Submetido.
- Apolinário, R.F., Valentin, E.F.D., De Souza, N.M., Walde, D.H.G. 2006. Erosion modeling in hydrographic pilot basins in Brasília (Federal District), Brazil. *In: 10<sup>th</sup> IAEG, Engineering Geology for Tomorrow's Cities, Nottingham, United Kingdom, Paper 427:1-11.*

## **RESUMOS:**

Valentin, E.F.D., Walde, D.H.G. 2007. Modelagem de Risco à Erosão Laminar do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto: Contribuição ao Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal. In: X SGCO, Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, Pirenópolis, Goiás, Resumo, 21 a 23 de outubro de 2007.

Valentin, E.F.D., Walde, D.H.G., Rosa, J.W.C., Roig, H.L. 2006. Proposta para avaliação e previsão de impactos ambientais no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto - DF/GO. In: XLIII CBG, Congresso Brasileiro de Geologia, Aracaju, Sergipe, Resumo Expandido, 3 a 8 de setembro de 2006.

# Avaliação da Influência do Cálculo da Direção e da Acumulação de Fluxo na Estimativa de Erosão Laminar Utilizando a Equação Universal de Perdas de Solo

Elenjuce Ferreira Dias Valentin, José Wilson Corrêa Rosa, Henrique Llacer Roig, Detlef Hans-Gert Walde  
Universidade de Brasília - Instituto de Geociências – Brasília, DF  
elenjuce@unb.br, jwfundsd@brturbo.com.br, roig@unb.br, detlef@unb.br

---

---

## RESUMO

Uma das limitações do Fator Topográfico (LS) da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) é ter origem em uma relação empírica derivada de um extenso banco de dados. Neste trabalho implementou-se um fator topográfico alternativo baseado na teoria da direção e da concentração de fluxo em uma bacia hidrográfica, a fim de descrever processos de erosão associados ao fluxo laminar sobre declives. Entre os métodos de determinação de direção de fluxo foram testados o D8 (fluxo restrito a oito direções de escoamento) e o  $D_{\infty}$  (um número infinito de direções de fluxo possíveis). Os testes foram realizados em base de dados correspondente ao Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto, área limítrofe entre o Distrito Federal e o Estado de Goiás que tem apresentado problemas vinculados à expansão demográfica desordenada e aos conseqüentes impactos ambientais na região. O método  $D_{\infty}$  ofereceu melhores resultados, quando comparado aos obtidos pelo tradicional D8, por representar e por quantificar de forma mais real o caminho seguido pelo fluxo d'água e de sedimentos e sua acumulação. Estima-se pelo método  $D_{\infty}$  que a perda de solo média anual da bacia do Rio Descoberto varia entre 0 e 386,34 t/ha.ano.

Palavras-chave: Erosão Laminar; Fator Topográfico; Direção de Fluxo; Acumulação de Fluxo; Métodos D8 e  $D_{\infty}$ .

---

---

## INTRODUÇÃO

A bacia do Rio Descoberto (Figura 1), assim como a maioria das bacias hidrográficas brasileiras em situação de uso e ocupação inadequados, em especial das áreas rurais de uso múltiplo e das áreas urbanas em expansão desordenada, apresenta uma acentuada perda da qualidade e da quantidade de água disponível.

De forma sucinta, o uso e a ocupação do solo sem planejamento e com infra-estrutura urbana muito precária na bacia do Rio Descoberto têm causado impactos ambientais relacionados à erosão hídrica e ao transporte de sedimentos. Esse cenário tem provocado o assoreamento do reservatório do Rio Descoberto, o qual é responsável pelo abastecimento de 2/3 do total de água produzida pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb). Este uso inadequado também tem comprometido a principal região produtora de hortifrutigrangeiros do Distrito Federal (DF). Reservatórios destinados à geração de energia hidroelétrica e sujeitos à pressão antrópica constante, tais como, a represa de Três Marias (MG) e a de Curuá-Una (PA), também apresentam sérios problemas de assoreamento relacionados à erosão hídrica e ao transporte de sedimentos (Gunkel et al., 2003).

A erosão hídrica pode ser expressa como a

relação entre a erosividade da chuva (fator ativo), ou seja, o potencial da chuva de causar erosão, e a erodibilidade do solo (fator passivo), que por sua vez é a suscetibilidade do solo à erosão (Silva et al., 2004). Entre os tipos de erosão hídrica o mais comum é a erosão laminar. Ela ocorre em grandes áreas com vegetação escassa, sendo imperceptível na maioria das vezes.

Este trabalho foi proposto com o objetivo de contribuir com uma metodologia de estimativa de perdas de solo por erosão laminar que represente de forma mais real o caminho seguido pelo fluxo d'água e de sedimentos e sua acumulação.

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

O Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto (Figura 1) abrange uma área de 437 km<sup>2</sup> (43.700 ha) da Bacia do Rio Paraná e localiza-se em área limítrofe entre o Distrito Federal e o Estado de Goiás, principalmente, com o município de Águas Lindas de Goiás, na Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio Descoberto (APA do Descoberto) (Reatto et al., 2003b). Esta bacia tem como enxutório a barragem do Descoberto, que é um lago artificial formado a partir do represamento de seus principais tributários. De acordo com a Caesb (2003), este reservatório possuía, em 1974, uma área superficial (espelho d'água) de 14,8 km<sup>2</sup> e em 2002,

após perda por assoreamento, passou a uma área de 12,55 km<sup>2</sup> em nível normal de funcionamento (cota 1030 da crista do vertedouro).

As condições climáticas encontradas na área de estudos são as mesmas do Distrito Federal. O clima, segundo a classificação de Köppen, enquadra-se entre o tipo "tropical de savana" e o "temperado chuvoso de inverno seco". Distinguem-se claramente duas estações: uma chuvosa e quente, que se prolonga de outubro a abril, e outra, fria e seca, de maio a setembro. Os meses mais chuvosos são novembro, dezembro e janeiro, com precipitação total anual média de 1.600 mm, já na estação seca praticamente não chove. A figura 2 apresenta totais de precipitação pluviométrica para estação do Descoberto, os quais retratam bem a situação na bacia.

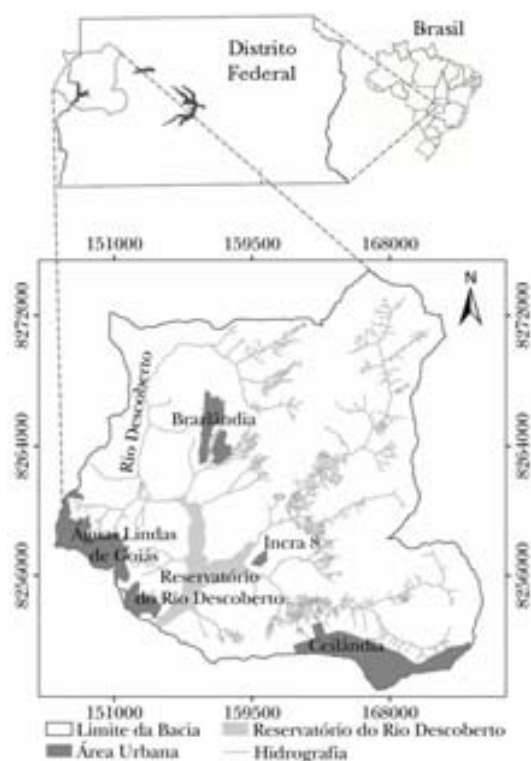


Figura 1 – Localização da área de estudos.

O Distrito Federal está totalmente inserido no domínio do bioma Cerrado. Conforme Reatto et al. (2003b), no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto ocorrem os percentuais de fitofisionomias apresentados no gráfico da figura 3.

Na área de estudos identificam-se 9 classes de solos (Figura 4), predominando-se latossolos e

cambissolos (Reatto et al., 2003a). Os latossolos são solos submetidos a intenso processo de lixiviação em sua formação e os cambissolos, por sua vez, são altamente susceptíveis a erosão.

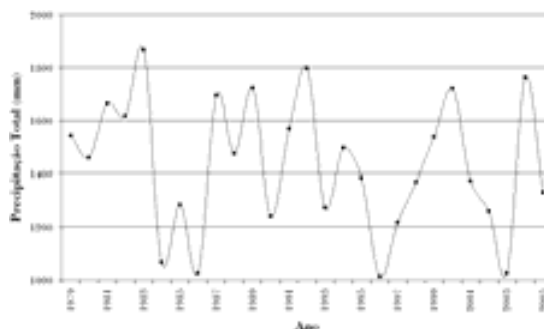


Figura 2 – Totais de precipitação pluviométrica na estação do Descoberto para o período de 1979 a 2005.

Fonte: Laboratório de Qualidade de Água da Caesb.

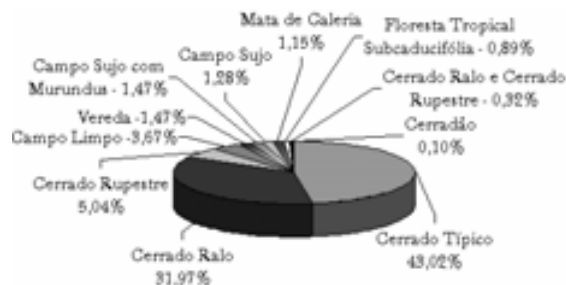


Figura 3 – Percentuais de fitofisionomias.

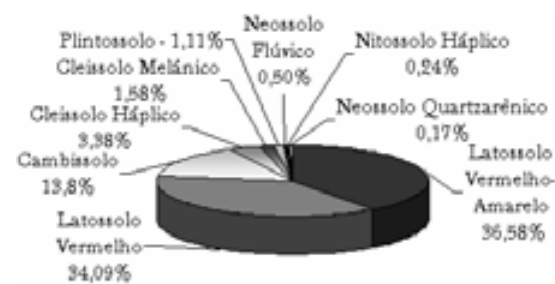


Figura 4 – Percentuais de solos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, para quantificação da erosão laminar, empregou-se a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS ou USLE – Universal Soil Loss Equation), cujas etapas para sua obtenção estão resumidamente esquematizadas na figura 5.

## EUPS

A EUPS é um modelo empírico desenvolvido pelo "National Runoff and Soil Loss Data Center" dos EUA para estimar a perda média anual de solo por erosão laminar (Equação 1).

$$A = R.K.LS.CP \quad (1)$$

onde, A = perda média de solo em t/ha.ano; R = erosividade das chuvas, em Mj.mm/ha.h; K = fator de erodibilidade do solo, em t.h/Mj.mm; LS = fator topográfico (adimensional), sendo: L = fator comprimento de rampa (m), e S = declividade (graus); e CP = formas de uso e ocupação do solo (adimensional), sendo: C = fator uso e manejo e P = fator práticas conservacionistas.



Figura 5 – Aplicação da EUPS.

Embora já tenham sido desenvolvidos outros modelos de avaliação de perdas de solo em analogia à EUPS, tais como, a MUSLE (USLE Modificada), a RUSLE (USLE Revisada), a WEPP (Water Erosion Prediction Project), a AGNPS (Agricultural Non-Point Source Pollution), a ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation) e o modelo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator), a EUPS ainda é a equação mais utilizada em pesquisas por geoprocessamento. Isto se deve ao menor número de variáveis necessárias ao seu cálculo, o que a deixa mais simples em relação aos demais modelos.

Para ser empregada no Brasil, a EUPS precisa de ajustes, uma vez que seus parâmetros apresentam limitações frente às peculiaridades intrínsecas do país. A equação necessita, ainda, de adaptações para reduzir sua forte característica empírica. De maneira geral, a maioria das aplicações da EUPS no Brasil foi realizada em áreas do Estado de São Paulo e as contribuições mais significativas a parâmetros do modelo relacionam-se a pesquisas em hidrologia, as quais envolvem o fator R.

Neste trabalho, como contribuição à EUPS, foi proposto e avaliado a utilização de um método de cálculo do fator LS, com testes realizados em

uma bacia hidrográfica que se encontra no bioma cerrado. A seguir são descritos e analisados os passos empregados no cálculo do fator LS modificado.

## Fator LS Modificado

Os parâmetros comprimento de rampa (L) e declividade do terreno (S) afetam substancialmente a taxa de perdas de solo por erosão laminar. É muito comum nos trabalhos de determinação destas variáveis da EUPS, por meio de geoprocessamento, integrá-las gerando uma única variável conhecida como LS (fator topográfico). Este fator é um dos mais importantes da EUPS, entretanto é o que apresenta maiores dificuldades na sua obtenção.

Nesta pesquisa, foi dada atenção especial ao cálculo do fator topográfico, deixando de empregar o fator LS original (Wischmeier e Smith, 1978), e adotando uma alternativa de cálculo que chamamos de "Fator LS Modificado". A figura 6 apresenta a seqüência de passos empregados no cálculo deste fator.

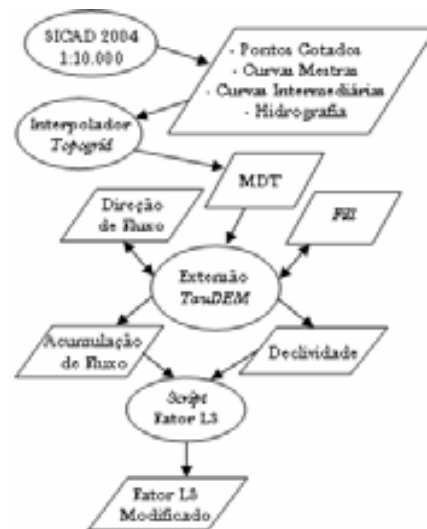


Figura 6 – Esquema do fator LS modificado.

De acordo com Moore e Burch (1986), o fator LS original é uma relação empírica derivada de um extenso banco de dados. Com o objetivo de reduzir limitações e restrições atribuídas ao fator topográfico, esses autores geraram um fator topográfico alternativo utilizando a teoria da concentração de fluxo a fim de descrever os processos de erosão associados ao fluxo laminar sobre declives.

Segundo Moore e Burch (1986), a produção de sedimentos por unidade de área é proporcional a 3 parâmetros: A = forma da bacia; L = comprimento

de rampa; e S = declividade. Assim, os parâmetros originais do fator topográfico são mantidos, mas, em adição, considera-se a forma da bacia.

O fator LS modificado foi obtido aplicando-se um script, contribuição do autor José Wilson Corrêa Rosa, com a equação de Moore e Burch (1986) dada por

$$LS = (aI/22,13)^{0,4}(s/0,0896)^{1,3} \quad (2)$$

onde, LS = fator topográfico modificado (adimensional); a = parâmetro da forma de represamento da água: a = 1, para represamento retangular; a < 1, para represamento divergente; a > 1, para represamento convergente; I = comprimento da vertente (m); e s = seno do ângulo da vertente com a horizontal; e de acordo com o padrão de referência: LS = 1 para I = 22,13, m e x = 9% (seno  $\theta$  = 0,0896).

Antes da aplicação do script, necessário se fez cumprir os passos apresentados na figura 6 a fim de obter os parâmetros a serem utilizados no cálculo do fator LS. Assim, para geração do MDT (Modelo Digital do Terreno), optou-se pelo algoritmo de interpolação Topogrid baseado em estudo de Hutchinson (1988, 1989). Este algoritmo é considerado por estudiosos em modelagem de bacias hidrográficas como um dos melhores modelos matemáticos para geração de um grid hidrologicamente consistente.

O Topogrid emprega uma interpolação com base na interação por diferenças finitas, combinando a eficiência de uma interpolação local (método IDW), com métodos de interpolação global (interpolador Kriging) que utilizam uma superfície de continuidade.

Os parâmetros fill, declividade, direção e acumulação de fluxo foram produzidos a partir da extensão TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models) para ArcGIS 9.x.

O fill, conhecido como preenchimento das depressões, é utilizado para corrigir o MDT. Quando uma depressão não corresponde a um lago, e sim resulta do processo de interpolação que gerou o MDT, então é necessário que essa depressão seja preenchida de modo a permitir a continuidade do fluxo para jusante. Esse processo automatizado consiste em soerguer a depressão até o menor valor do terreno circunvizinho de modo a permitir a manutenção do fluxo à jusante.

A declividade corresponde ao raio máximo de cada célula em relação as suas vizinhas com base na topografia da região.

Para o cálculo do fator LS adotando a

equação 2, também é preciso obter a rede de drenagem, a qual é gerada por analogia ao fluxo d'água sobre a superfície a partir do MDT. Em SIG (Sistema de Informação Geográfica), para executar este cálculo, o terreno é representado pelas células do MDT e o caminho percorrido pela água é traçado célula por célula utilizando-se uma função de modelagem hidrológica de direção de fluxo.

Na função de modelagem de direção de fluxo d'água, a área de contribuição A corresponde à área mais inclinada do terreno de um elemento de largura b (Figura 7). Já a descarga por unidade de largura q por b produzida por excesso de chuva constante e uniforme, i, é dada pela equação 3:

$$q = A(i/b) = Vy \quad (3)$$

onde A é a área parcial da bacia acima de b, V é a velocidade média do fluxo laminar sobre o elemento de contorno, e y é a intensidade do fluxo.

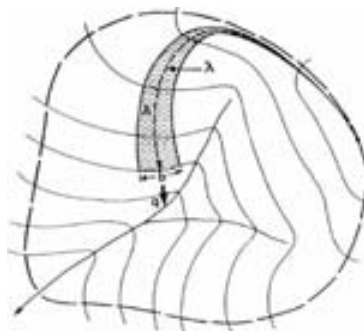


Figura 7 - Diagrama de fluxo d'água em uma bacia parcial. A = área parcial da bacia;  $\lambda$  = comprimento parcial da bacia; b = largura do elemento de contorno e q = descarga por unidade de largura. Fonte: Moore e Burch (1986).

Com relação ao cálculo da acumulação de fluxo, determinada pelo número de células que contribuem com o fluxo para cada célula, calculou-se em primeiro lugar a direção de fluxo. A seguir são descritos os dois métodos de determinação de fluxo avaliados neste estudo.

#### Método D8

Entre os métodos de determinação de direção de fluxo existentes, o mais comumente utilizado é o D8 (fluxo restrito a oito direções de escoamento). O D8, introduzido por O'Callaghan e Mark (1984) identifica o caminho mais íngreme para o fluxo considerando que a água escoará para uma única das 8 células circunvizinhas quando

movida por ação da gravidade (Figura 8-a). O chamado ponto de escoamento, ou fonte, é o local (célula) através do qual a água flui de uma célula a outra. Quatro das células vizinhas estão sobre os eixos principais (Norte, Sul, Leste e Oeste), e as outras quatro estão sobre as diagonais. As direções de fluxo são codificadas em SIG por 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ou 8, a partir de Leste no sentido horário.

O modelo D8 é uma simplificação do caminho verdadeiro do fluxo d'água que pode ocorrer em qualquer direção. Este método apresenta dificuldades na identificação da direção do fluxo quando existem depressões ou áreas planas no Modelo Digital do Terreno.

#### Método D $\infty$

Tarboton (1997) propôs o método D $\infty$  (um número infinito de direções de fluxo possíveis), tendo como principal motivação a tentativa de solucionar as inconsistências comuns produzidas por métodos tradicionais de cálculo de direção de fluxo d'água, tais como, D8 (O'Callaghan e Mark, 1984), Múltiplas Direções de Fluxo (Quin et al., 1991 e Freeman, 1991, in Tarboton, 1997), ou pelo algoritmo desenvolvido por Lea (1992).

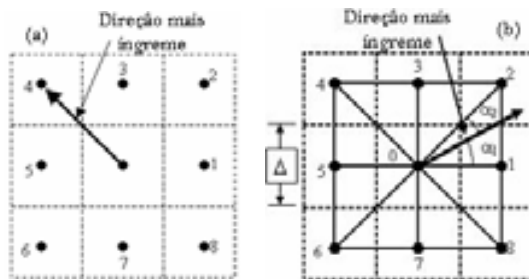


Figura 8 - Métodos de determinação de direção de fluxo. (a) D8; (b) D $\infty$ . Fonte: Tarboton (2003).

Na representação numérica, o fluxo pelo método D $\infty$  é particionado entre uma ou mais das 8 células vizinhas, como exemplificado na figura 8-b. A proporção de fluxo para vizinhança da célula 1 é dada por  $\alpha_2/(\alpha_1 + \alpha_2)$  e para a da célula 2 por  $\alpha_1/(\alpha_1 + \alpha_2)$ , com direção de fluxo medida como o ângulo anti-horário no sentido Leste, onde

$$\alpha_1 = \text{atan}\left(\frac{e_1 - e_2}{e_0 - e_1}\right) \quad (4)$$

e

$$s = \sqrt{\left(\frac{e_1 - e_2}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{e_0 - e_1}{\Delta}\right)^2} \quad (5)$$

Neste procedimento, a direção de fluxo (representada como uma quantidade contínua entre 0 e  $2\pi$ ) é determinada na direção mais íngreme do declive nas oito faces triangulares formadas em uma janela 3 x 3 centralizada no pixel de interesse. A direção de fluxo não segue uma das direções cardinais ( $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ ) ou diagonais ( $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ ), mas de acordo com o ângulo de fluxo do pixel central.

Segundo Tarboton (1997), ao considerar uma única face triangular (Figura 9), a declividade é representada pelos vetores  $(s_1, s_2)$ , dados pelas equações 6 e 7:

$$s_1 = (e_0 - e_1)/d_1 \quad (6)$$

$$s_2 = (e_1 - e_2)/d_2 \quad (7)$$

onde  $e_i$  e  $d_i$  correspondem a elevações e a distâncias entre pixels. Já a direção e a magnitude da declividade são dadas respectivamente pelas equações 8 e 9:

$$r = \tan^{-1}(s_2/s_1) \quad (8)$$

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2} \quad (9)$$

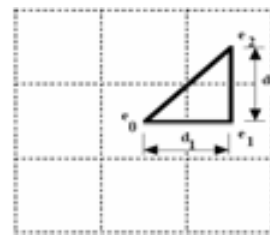


Figura 9 - Variáveis para o cálculo da declividade em uma face triangular simples. Fonte: Tarboton (1997).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste trabalho foram gerados na escala de 1:10.000. O cálculo do fator LS foi efetuado empregando-se os dois métodos de determinação de direção de fluxo d'água descritos. As figuras 10-a e 10-b apresentam a acumulação de fluxo utilizando respectivamente os métodos de determinação de direção de fluxo D8 e D $\infty$  e na tabela 1 encontra-se uma tabulação cruzada entre o número de células com mesma acumulação para cada um destes métodos. Estes resultados consideram a acumulação de fluxo distribuída nos intervalos de 8 classes (1 : 1 a 10; 2 : 10 a 100; 3 : 100 a 1.000; 4 : 1.000 a 10.000; 5 : 10.000 a 100.000; 6 :

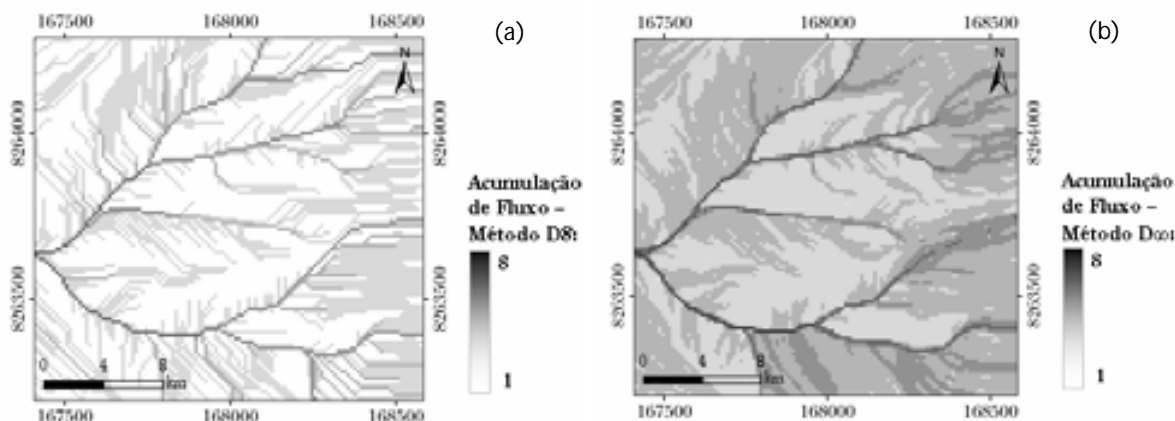


Figura 10 – Distribuição da acumulação de fluxo: (a) Método D8; (b) Método  $D_{\infty}$ .

Tabela 1 – Tabulação cruzada entre o número de células de acumulação de fluxo calculado pelo método D8 e pelo  $D_{\infty}$ .

| Classes Método $D_{\infty}$ ( $10^3$ ) | Classes Método D8 ( $10^3$ ) |           |          |         |       |       |       |      |
|--|------------------------------|-----------|----------|---------|-------|-------|-------|------|
|  | 1                            | 2         | 3        | 4       | 5     | 6     | 7     | 8    |
| 1                                      | 2.774,0                      | 0,0       | 0,0      | 0,0     | 0,0   | 0,0   | 0,0   | 0,0  |
| 2                                      | 80.408,3                     | 9.449,9   | 136,2    | 5,9     | 0,0   | 0,8   | 0,0   | 0,0  |
| 3                                      | 111.545,5                    | 137.991,4 | 23.767,4 | 885,8   | 4,3   | 1,2   | 0,0   | 0,0  |
| 4                                      | 13.989,5                     | 30.138,4  | 16.672,1 | 3.006,0 | 43,9  | 1,3   | 0,0   | 0,0  |
| 5                                      | 435,0                        | 1.128,4   | 573,1    | 1.591,5 | 180,8 | 2,1   | 0,0   | 0,0  |
| 6                                      | 81,9                         | 150,9     | 84,4     | 40,9    | 983,2 | 35,3  | 2,5   | 0,0  |
| 7                                      | 13,0                         | 22,2      | 13,0     | 5,0     | 7,3   | 187,4 | 1,6   | 0,0  |
| 8                                      | 12,5                         | 34,0      | 28,1     | 10,2    | 2,4   | 379,1 | 138,3 | 61,5 |

100.000 a 1.000.000; 7 : 1.000.000 a 2.000.000 e 8 : > 2.000.000).

Não só visualmente, mas também em termos quantitativos, podem-se observar as inconsistências relativas ao método D8 foram atenuadas com o  $D_{\infty}$ . Nota-se, com este método, uma melhor distribuição do fluxo d'água, mais próximo ao esperado para as situações topográficas da região, em especial, em relação à sua influência no cálculo da área de contribuição.

No método D8 (Figura 10-a), por não avaliar a contribuição da vizinhança, o resultado alcançado não permite uma clara distinção do modelo de fluxo em relação à configuração topográfica. Observa-se que em todas as situações geomorfológicas o fluxo d'água restringe-se a feições lineares. Um exemplo da não representatividade do modelo D8 em relação à realidade pode ser notado nas regiões que apresentam relevo suave, ou com encostas planas. Nestas situações, o fluxo calculado é definido predominantemente por um conjunto de linhas paralelas, fora do contexto real, o que muitas vezes leva a representação do fluxo d'água a caminhos inexistentes. Estas características restringem a

definição da área de contribuição e das rampas do relevo (fator L), acarretando uma subestimativa do fator topográfico (LS) calculado pela equação 2, como pode ser observado na figura 11-a e nas tabelas 2 e 3.

No que concerne aos resultados pela aplicação do método  $D_{\infty}$ , observa-se nas regiões de relevo suave uma grande área de contribuição, representando o espalhamento do escoamento superficial e a acumulação de fluxo. Entretanto, nas regiões mais íngremes o fluxo encontra-se claramente concentrado ao longo dos vales. Estas características colaboram como uma definição mais representativa da área de contribuição e das rampas do relevo (fator L), acarretando a estimativa do fator LS de forma mais próxima à realidade topográfica da bacia. Os resultados do fator LS utilizando o modelo  $D_{\infty}$  estão disponíveis na figura 11-b e nas tabelas 2 e 4.

Os resultados da tabulação cruzada do fator LS (Tabela 2) calculados pelos métodos estudados foram distribuídos em 8 classes (1: 0,00 a 0,02; 2: 0,02 a 0,05; 3: 0,05 a 0,10; 4: 0,10 a 0,20; 5: 0,20 a 0,50; 6: 0,50 a 1,00; 7: 1,00 a 2,00 e 8: > 2,00).



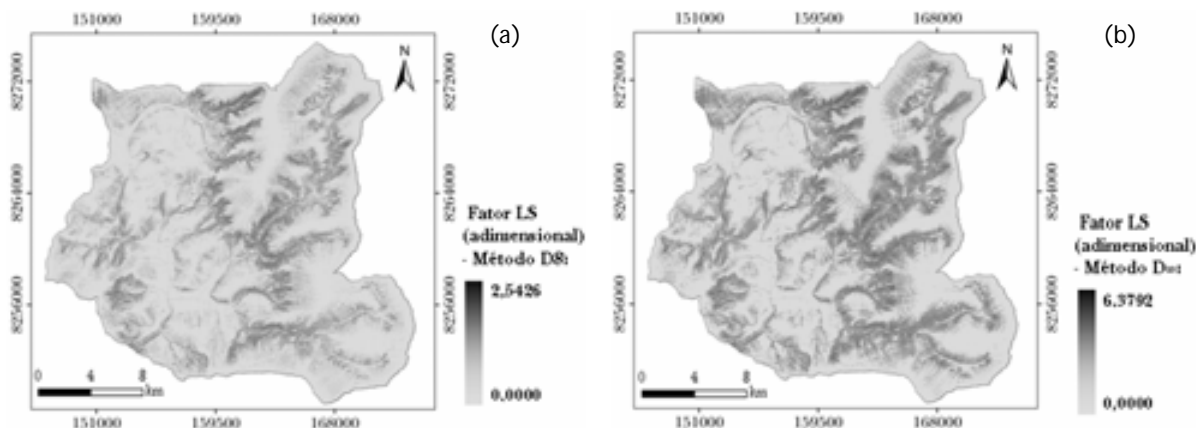


Figura 11 – Distribuição do fator LS modificado: (a) Método D8; (b) Método  $D_{\infty}$ .

Tabela 2 – Tabulação cruzada entre o número de células para o fator LS calculado pelo método D8 e pelo  $D_{\infty}$ .

| Classes Fator LS Método $D_{\infty}$ ( $10^3$ ) | Classes Fator LS Método D8 ( $10^3$ ) |          |         |         |       |      |     |     |
|---|---------------------------------------|----------|---------|---------|-------|------|-----|-----|
|   | 1                                     | 2        | 3       | 4       | 5     | 6    | 7   | 8   |
| 1   | 212.957,1                             | 410,8    | 4,2     | 0,0     | 0,0   | 0,0  | 0,0 | 0,0 |
| 2   | 132.795,4                             | 10.177,8 | 246,5   | 6,1     | 0,4   | 0,0  | 0,0 | 0,0 |
| 3   | 30.213,9                              | 21.708,4 | 1.875,8 | 93,6    | 3,2   | 0,0  | 0,0 | 0,0 |
| 4   | 4.405,3                               | 9.375,6  | 5.485,3 | 589,7   | 25,9  | 0,0  | 0,0 | 0,0 |
| 5   | 429,3                                 | 1.396,7  | 2.066,4 | 1.680,8 | 250,7 | 2,5  | 0,0 | 0,0 |
| 6   | 9,2                                   | 52,7     | 104,5   | 135,2   | 292,3 | 14,4 | 0,0 | 0,0 |
| 7   | 0,8                                   | 2,6      | 5,6     | 2,5     | 21,8  | 19,5 | 0,3 | 0,0 |
| 8   | 0,0                                   | 0,3      | 0,0     | 0,1     | 0,0   | 1,8  | 1,7 | 0,2 |

Tabela 3 – Fator topográfico (Fator LS) pelo método D8.

| Fator LS(adimensional) | Área (ha) | %       |
|------------------------|-----------|---------|
| 0,0000 – 0,0095        | 30.355,7  | 69,464  |
| 0,0095 – 0,0121        | 2.948,2   | 6,746   |
| 0,0121 – 0,0215        | 5.318,3   | 12,170  |
| 0,0215 – 0,0569        | 4.071,3   | 9,316   |
| 0,0569 – 0,1897        | 934,6     | 2,139   |
| 0,1897 – 0,6861        | 70,9      | 0,162   |
| 0,6861 – 2,5426        | 1,1       | 0,002   |
| Total                  | 43.700,0  | 100,000 |

Tabela 4 – Fator topográfico (Fator LS) pelo método  $D_{\infty}$ .

| Fator LS(adimensional) | Área (ha) | %       |
|------------------------|-----------|---------|
| 0,0000 – 0,0238        | 24.505,5  | 56,077  |
| 0,0238 – 0,0302        | 4.117,5   | 9,422   |
| 0,0302 – 0,0539        | 7.870,2   | 18,010  |
| 0,0539 – 0,1429        | 5.879,8   | 13,455  |
| 0,1429 – 0,4759        | 1.250,4   | 2,861   |
| 0,4759 – 1,7212        | 76,0      | 0,174   |
| 1,7212 – 6,3792        | 0,7       | 0,002   |
| Total                  | 43.700,0  | 100,000 |

O fator LS calculado pelo método D8 apresentou média de 0,007 e pelo  $D_{\infty}$  de 0,023, sendo o desvio padrão de 0,020 e de 0,052, respectivamente. Tanto na análise comparativa da tabela 1 quanto da tabela 2, que trazem tabulações cruzadas entre os resultados da acumulação de fluxo e entre o fator LS calculado pelos dois métodos estudados, nota-se que há maior concentração de células pelo D8 nas classes menores e praticamente zero nas classes iguais ou próximas da classe 8. Ao contrário, pelo  $D_{\infty}$  o número de células em classes

com maior acumulação de fluxo, bem como com valores mais elevados para o LS são distribuídos ao longo das 8 classes. Isto enfatiza a influência da área de contribuição no cálculo do fator LS, em especial, quando calculado pelo modelo  $D_{\infty}$ .

A média anual de perdas de solo (A) encontra-se entre 0 e 147,8 t/ha.ano com o D8 (Figura 12-a) e entre 0 e 386,4 t/ha.ano com o  $D_{\infty}$ (Figura 12-b). Por sua vez, o potencial médio de perdas de solo (Ap) com o método D8 encontra-se entre 0 e 315,65 t/ha.ano (Figura 13-a) e entre 0 e

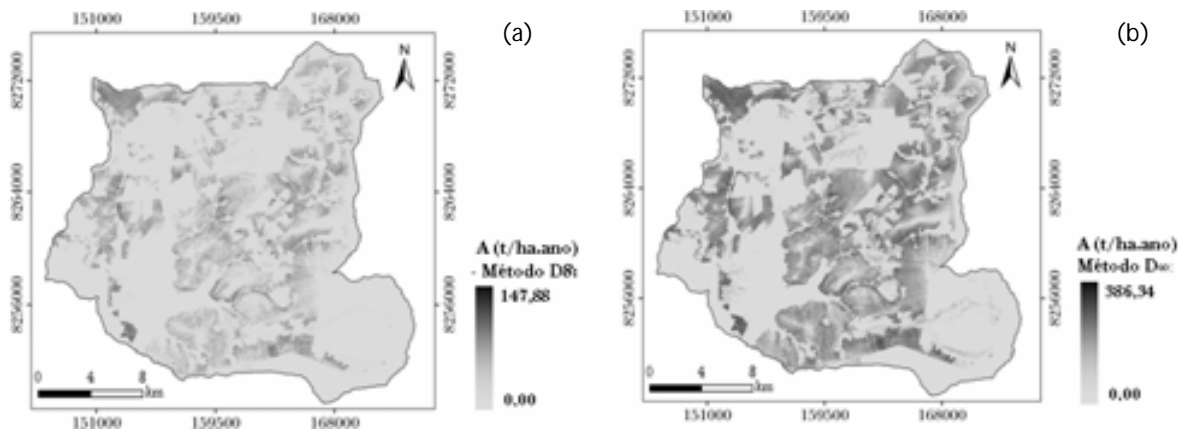


Figura 12 – Distribuição de perdas de solo (A): (a) Método D8; (b) Método D $\infty$ .

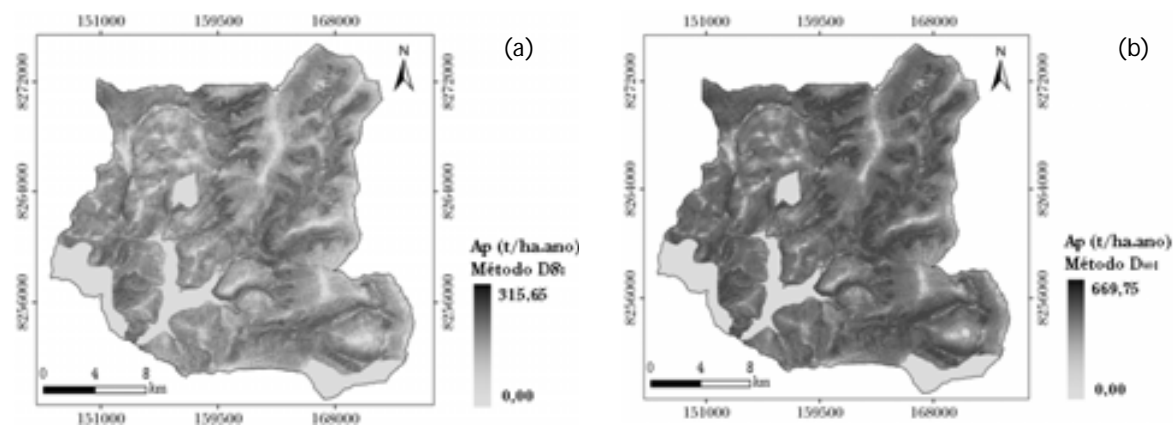


Figura 13 – Distribuição do potencial de perdas de solo (Ap): (a) Método D8; (b) Método D $\infty$ .

Tabela 5 – Média anual de perdas de solo (A): método D8 versus D $\infty$ .

| A<br>(t/ha.ano) | D8           |              | D $\infty$   |              |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                 | Área<br>(ha) | % da<br>área | Área<br>(ha) | % da<br>área |
| 0,0 – 0,1       | 31.679       | 72,49        | 24.064       | 55,07        |
| 0,1 – 0,25      | 6.372        | 14,58        | 4.933        | 11,29        |
| 0,25 – 0,5      | 3.186        | 7,29         | 4912         | 11,24        |
| 0,5 – 1,0       | 1.642        | 3,76         | 4884         | 11,18        |
| 1,0 – 2,0       | 606          | 1,39         | 3063         | 7,01         |
| 2,0 – 5,0       | 189          | 0,43         | 1553         | 3,55         |
| 5,0 – 10,0      | 22           | 0,05         | 242          | 0,55         |
| > 10            | 3            | 0,01         | 49           | 0,11         |
| Total           | 43.700       | 100,00       | 43.700       | 100,00       |

Tabela 6 – Potencial médio de perdas de solo (Ap): método D8 versus D $\infty$ .

| Ap<br>(t/ha.ano) | D8           |              | D $\infty$   |              |
|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                  | Área<br>(ha) | % da<br>área | Área<br>(ha) | % da<br>área |
| 0,0 – 0,1        | 6.370        | 14,58        | 4.473        | 10,24        |
| 0,1 – 0,25       | 5.428        | 12,42        | 1.049        | 2,40         |
| 0,25 – 0,5       | 7.861        | 17,99        | 2.200        | 5,03         |
| 0,5 – 1,0        | 9.323        | 21,34        | 4.670        | 10,69        |
| 1,0 – 2,0        | 7.306        | 16,72        | 8.053        | 18,43        |
| 2,0 – 5,0        | 5.237        | 11,98        | 12.641       | 28,93        |
| 5,0 – 10,0       | 1.525        | 3,49         | 6.296        | 14,41        |
| > 10             | 649          | 1,48         | 4.319        | 9,88         |
| Total            | 43.700       | 100,00       | 43.700       | 100,00       |

669,75 t/ha.ano com o  $D_{\infty}$  (Figura 13-a). As tabelas 5 e 6 apresentam uma comparação entre os resultados alcançados utilizando os dois métodos estudados para A e para  $A_p$ , respectivamente. A perda média de solo com o D8 foi de 0,045 t/ha.ano e o desvio padrão de 0,31 e a perda média de solo de 0,16 t/ha.ano e desvio padrão de 0,86 com o  $D_{\infty}$ . Por sua vez, o potencial de perdas de solo pelo modelo D8 teve valor médio de 0,89 t/ha.ano e desvio padrão de 2,79, contra 3,25 t/ha.ano e desvio padrão de 7,48 calculados pelo método  $D_{\infty}$ .

Diante dos resultados avaliados, observa-se que o método  $D_{\infty}$  traz uma mudança significativa nas estimativas atual e potencial de perdas de solo por erosão laminar, como visualizado na comparação entre os resultados obtidos pelos dois modelos de determinação de fluxo d'água.

## CONCLUSÕES

Entre os modelos de predição de erosão hídrica, a EUPS é um dos mais aceitos e utilizados, apresentando grande aceitação também no Brasil, em particular, devido ao menor número de parâmetros necessários ao seu cálculo. Entretanto, por tratar-se de um modelo empírico, há limitações inerentes que podem gerar predições incorretas, além da necessidade, em muitos casos, de adaptar alguns dos fatores para a região em estudo e de refinar o cálculo destas variáveis.

Uma das maiores limitações da EUPS está no cálculo original do fator LS, o que motivou o emprego da metodologia de cálculo proposta neste trabalho chamada de fator LS modificado. Entre algumas das razões para o uso potencial do fator LS modificado na EUPS destacam-se: redução de inconsistências produzidas na aplicação do fator LS original; possibilidade de ser aplicado em terrenos com geometrias de rampa complexas; e representação mais adequada da acumulação de fluxo d'água e de sedimentos.

A metodologia proposta permitiu estimar a erosão do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto. Os resultados expostos ao longo deste trabalho evidenciam que o cálculo do fator LS modificado, utilizando o método de determinação de fluxo d'água D8, subestima as perdas anuais e potências de solo em uma bacia hidrográfica. Dessa forma, os resultados do fator LS obtidos com o modelo  $D_{\infty}$  são mais significativos, pois retratam e quantificam as perdas de solo por erosão laminar de forma mais próxima à realidade topográfica da bacia.

Concluindo, o fator LS tem participação significativa no processo erosivo do Alto Curso da

Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto. As taxas estimadas de perdas de solo por erosão laminar pelo método  $D_{\infty}$ , com média anual variando entre 0 e 386,34 t/ha.ano, ratificam os impactos ambientais na região como consequência de problemas relacionados ao crescimento demográfico desordenado.

A combinação dos fatores da EUPS determina o ritmo do processo erosivo. Logo, além do fator LS, os demais fatores também são expressivos na estimativa de perdas de solo e necessitam de melhorias no cálculo. No que tange à erosividade das chuvas (fator R), existem contribuições recentes tais como Barreto Neto (2004) e Rennó (2003). Em relação à erodibilidade dos solos (fator K), há uma grande carência de estudos que considerem na modelagem, não apenas as classes de solos, mas também outros atributos, por exemplo, a textura.

Ademais, para o cálculo dos fatores K e CP, a grande maioria dos trabalhos baseiam-se em equações resultantes de pesquisas na região sudeste do país, principalmente no estado de São Paulo, o que pode prejudicar uma estimativa representativa destes fatores em outras regiões do Brasil empregando estas mesmas equações. Nestas situações, via de regra, verifica-se a necessidade de saídas de campo para validar se os resultados obtidos correspondem à realidade.

No caso do fator CP, para resultados mais significativos na EUPS, é indicado que as variáveis antrópicas sejam tratadas separadamente. Além disso, recomenda-se especial atenção na seleção do método de classificação e que se evite a generalização das classes de uso e ocupação.

Por fim, as opiniões dos autores deste trabalho levam a concluir sobre a importância de utilização de um método mais realista no cálculo da área de contribuição na estimativa do fator LS, bem como sobre a redução das limitações da EUPS observadas adotando fatores empíricos. Deste modo, conclui-se que os resultados fornecem instrumentos relevantes à elaboração de planos diretores de ordenamento territorial, principalmente de áreas em expansão e a tomadores de decisão, em nível governamental e não-governamental.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de doutorado à primeira autora.

## REFERÊNCIAS

- BARRETO NETO, A. A. 2004. Modelagem dinâmica de processos ambientais. Tese de Doutorado. Universidade de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas-SP. 123 p.
- CAESB. 2003. Estudos de concepção e de viabilidade técnica e econômica para elevação da crista do vertedouro da barragem do Rio Descoberto. Porto Alegre, Magna Engenharia Ltda, Levantamentos Topobatimétricos, 2, 164 p.
- GUNKEL, G., LANGE, U., WALDE, D. H. G., ROSA, J. C. 2003. Environmental and operation impact of a reservoir in Amazon, Curuá-Una, Pará/Brazil. *Lakes & Reservoirs, Research and Management*, Carlton, 8, p. 201-216.
- HUTCHINSON, M. F. 1988. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. Third International Symposium on Spatial Data Handling, Sydney. Columbus, Ohio: International Geographical Union.
- HUTCHINSON, M. F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*: 106, p. 211-232.
- LEA, N. L. 1992. An aspect driven kinematic routing algorithm. In: *Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics*, Edited by A. J. Parsons & A. D. Abrahams, Chapman & Hall, New York.
- MOORE, I. D. e BURCH, G. J. 1986. Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Sci. Soc. Am. Journal*, 50(5): p. 1294-1298.
- O'CALLAGHAN, J. F. e MARK, D. M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Process.*, 28(3), p. 323-344.
- REATTO, A., MARTINS, E. S., CARDOSO, E. A., SPERA, S. T., CARVALHO JR., O. A. GUIMARÃES, R., SILVA, A. V., FARIAS, M. F. R. 2003a. Levantamento de reconhecimento de solos de alta intensidade do Alto Curso do Rio Descoberto, DF/GO, escala 1:100.000. Planaltina-DF, Embrapa-Cerrados, Boletim Técnico 111, 28 p.
- REATTO, A., MARTINS, E. S., CARDOSO, E. A., SPERA, S. T., CARVALHO JR., O. A. GUIMARÃES, R., FARIAS, M. F. R., SILVA, A. V. 2003b. Relação entre as classes de solos e as principais fitofisionomias do Alto Curso do Rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás. Planaltina-DF, Embrapa-Cerrados, Boletim Técnico 92, 55 p.
- RENNÓ, C. D. 2003. Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP. 158p.
- SILVA, A. M., SCHULZ, H. E., CAMARGO, P. B. 2004. Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas. RiMa, São Carlos, 140 p.
- TARBOTON, D. G. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2): p. 309-319.
- TARBOTON, D. G. 2003. Terrain Analysis using digital elevation models in hydrology. In: *ESRI Users Conference*, San Diego, July 7-11.
- WISCHMEIER, W. H. e SMITH, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Agricultural Handbook*, 573, Washington: USDA/ARS, 58 p.

Evaluation of the Influence of the Calculation of the Flow Direction and Accumulation in the Prediction of Laminar Erosion Using the Universal Soil Loss Equation

## ABSTRACT

The topographic factor (LS) as one fundamental parameter for the Universal Soil Loss Equation (USLE) is based upon an extensive database and the deduction of empirical relationships from that. To resolve this database problem, an alternative factor is implemented. It uses the theory of flow direction and concentration in a hydrographic watershed in order to describe the processes of erosion associated with the laminar flow on slopes. Among the methods for the determination of flow directions, the models D8 (8 flow directions) and  $D_{\infty}$  (infinite flow directions) were tested. These tests were performed on the database from the upper course of the Descoberto Basin, an area of the State of Goiás adjacent to the west of the Federal District. This region presents an uncontrollable population expansion and many consequent environmental impacts. The algorithm  $D_{\infty}$  offers better results compared to those obtained by the traditional D8 algorithm. It represents and quantifies in a more realistic model the path that is followed by the flow of water and by the flow of sediment as well as its accumulation. It is predictable by the  $D_{\infty}$  algorithm that the average annual loss of soil in the Descoberto Basin varies between 0 and 386.34 ton/ha.year.

Key-words: Laminar Erosion; Topographic Factor; Flow Direction; Flow Accumulation; D8 and  $D_{\infty}$  Algorithms.

## Erosion modeling in hydrographic pilot basins in Brasília (Federal District), Brazil

RENATO APOLINÁRIO FRANCISCO<sup>1</sup>, ELENJUCE F. D. VALENTIN<sup>2</sup>,  
NEWTON MOREIRA DE SOUZA<sup>3</sup> & DETLEF H. G. WALDE<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Universidade de Brasília. (e-mail: renatoaf@unb.br)*

<sup>2</sup> *Universidade de Brasília. (e-mail: elenjuce@unb.br)*

<sup>3</sup> *Universidade de Brasília. (e-mail: nmsouza@unb.br)*

<sup>4</sup> *Universidade de Brasília. (e-mail: detlef@unb.br)*

**Abstract:** Brasília was inaugurated in 1964 as the new capital of Brazil. Brasília was defined by a restricted area (Federal District) and hence a limited population. This young capital is not yet a megacity, however it already displays characteristics that point to a rapid growth in population. The satellite towns and neighborhood of Brasília have grown up to three million inhabitants within the last three decades. The area shows uncontrolled growth with a deficiency in water supply and illegal extraction of raw materials for construction.

Current data shows that the Federal District consumes large amounts of water. This consumption is the result of the great migratory process and the increase of the agricultural activities. These activities have provoked a series of environmental (or ecological) problems, such as: pollution of the water bodies, deforestation and the consequences of the intensive geodynamic phenomena. The intensification of the anthropic activities causes the loss (or erosion) of the soils and sedimentation of the water bodies, which reduces the capacity of storage and agricultural production.

This GIS –based research makes use of spatial analytical tools. Using the GIS, data can be manipulated quickly and precisely. The estimate of soil loss, which will be further elaborated, has been approached from the perspective of static and dynamic models applied to hydrographic pilot basins in the Federal District. This study supports the socioeconomic and environmental planning in the short and medium period, as well as being able to model future sceneries of the geodynamic phenomena. This study also demonstrates the consolidation of public politics, administration and sustainable development in the Federal District.

**Résumé:** Brasília a été inauguré en 1964 comme la nouvelle capital de Brésil. Brasília a été défini par une région restreinte (District Fédéral) et, donc, pour une population limitée. Ce jeune capital n'est pas encore un mégapole, mais il affiche déjà caractéristiques qui pointent à une augmentation rapide de population. Cependant, les villes du satellite et voisinage de Brasília ont grandi trois million d'habitants dans les trois décennies dernières. Cette région montre l'augmentation incontrôlée avec une déficience dans provision de l'eau et extraction illégale de matières premières pour construction.

Données courantes montrent que le District Fédéral consomme grands montants d'eau. Cette consommation est le résultat du grand processus migrateur et le développement des activités agricoles. Ces activités ont provoqué une série de problèmes environnementales (ou écologiques), comme: pollution des corps de l'eau, déboisement et les conséquences des phénomènes géodynamiques intensifs. L'intensification des activités humaines occasionnent la perte (ou l'érosion) des sols et la sédimentation des corps de l'eau et cela réduit la capacité de stockage et production agricole.

Cette recherche avec GIS utilise des outils d'analyse spatiale. Dans le travail avec GIS les données peuvent être manipulées de forme rapide et précise. L'estimation de la perte de sols sera élaborée dans la perspective des modèles statiques et avec modèles dynamiques appliqués aux cuvettes hydrographiques pilote dans le District Fédéral. Cette étude assiste la planification socio-économique et environnemental dans la période courte et moyenne, ainsi que c'est capable de modeler décors futurs des phénomènes géodynamiques. Cette étude démontre aussi la consolidation des politiques publiques, administration et développement soutenable dans le District Fédéral.

**Keywords:** environmental impact, environmental geology, erosion, geographic information systems, models, sediments

## INTRODUCTION

As societies have developed, the uses of the land and its elements have become indispensable for the maintenance of life conditions. Agricultural development has opened space to other activities such as industry, generation of energy, transport and the growth of new towns. These alterations in land-use have modified the natural balance of the elements, which comprise the environment, such as the soil itself, water, wind, vegetation and water bodies (streams, rivers, lakes and seas), thus generating environmental impacts. The encroachment on the natural environment has been justified by Brazil's recently acquired position as a grain exporter. However, it has resulted in the unchaining of environmental imbalance of great proportions. Such imbalance affects engineering works and the water quality of rivers, lakes and reservoirs, as a result of the influx of sediments resulting from the intensification of mechanized agriculture in the Brazilian Savannah area. Erosion constitutes the start of all of the problems resulting from the

sediment in the environment. Besides producing harmful sediment, it may also cause serious environmental damage, such as the gradual loss of soil fertility and the reduction of a water reservoir capacity, provoked by the silting up of its riverbed.

Thus, knowledge of the erosive processes in the source basin of a reservoir is a fundamental tool for understanding the generation and movement of sediments in the basin. For the characterization of the erosion phenomena, knowledge of the main attributes of the basin, such as the type and thickness of soil covering, geology, geomorphology, topography, precipitation regimes, wind conditions and the conservation practices adopted is necessary. Such characterization is necessary to plan remedial intervention in the dynamics of such erosive processes. However, the dispersed nature of the necessary information for the characterization of the physical, biotic and anthropogenic environment demands a tool capable of automating manual activities and limiting any subjectivism from different interpretations. The geographical information systems possess these resources, in addition to enabling the quick and precise manipulation of data from several sources.

The use of mathematical models capable of predicting how much material is eroded in a basin, greatly facilitates basin use planning and the verification of the environmental consequences provoked by erosion. Models such as the ones introduced by Meyer & Wischmeier (1969) and Morgan *et al.* (1984), have been used extensively in recent years and have shown excellent results when adapted to specific areas.

The applicability of erosion and silting prediction models to Geographical Information Systems (GIS) is not a recent development, but it has increased considerably in recent years. Several studies have emphasized the importance of its application in the development of new support techniques to the planning and administration of environmental resources. There are a great variety of applications using mathematical models integrated with GISs in different parts of the world. The objective of this research was to compare different methods of erosion modeling in the Federal District: Universal Soil Loss Equation (USLE) applied by Baptista (1997) and Morgan, Morgan & Finney (MMF) applied by Francisco *et al.* (2002). In addition to the application of the models to the area of the Federal District, in a future phase, the models will be validated and calibrated in two pilot basins of the area, namely: in the hydrographic basin of the Descoberto river and in the Jardim river basin. Another objective of this research is to model future scenarios in the hydrographic basins of the Federal District, thereby assisting in the environmental planning in the short and long term.

## STUDY AREA

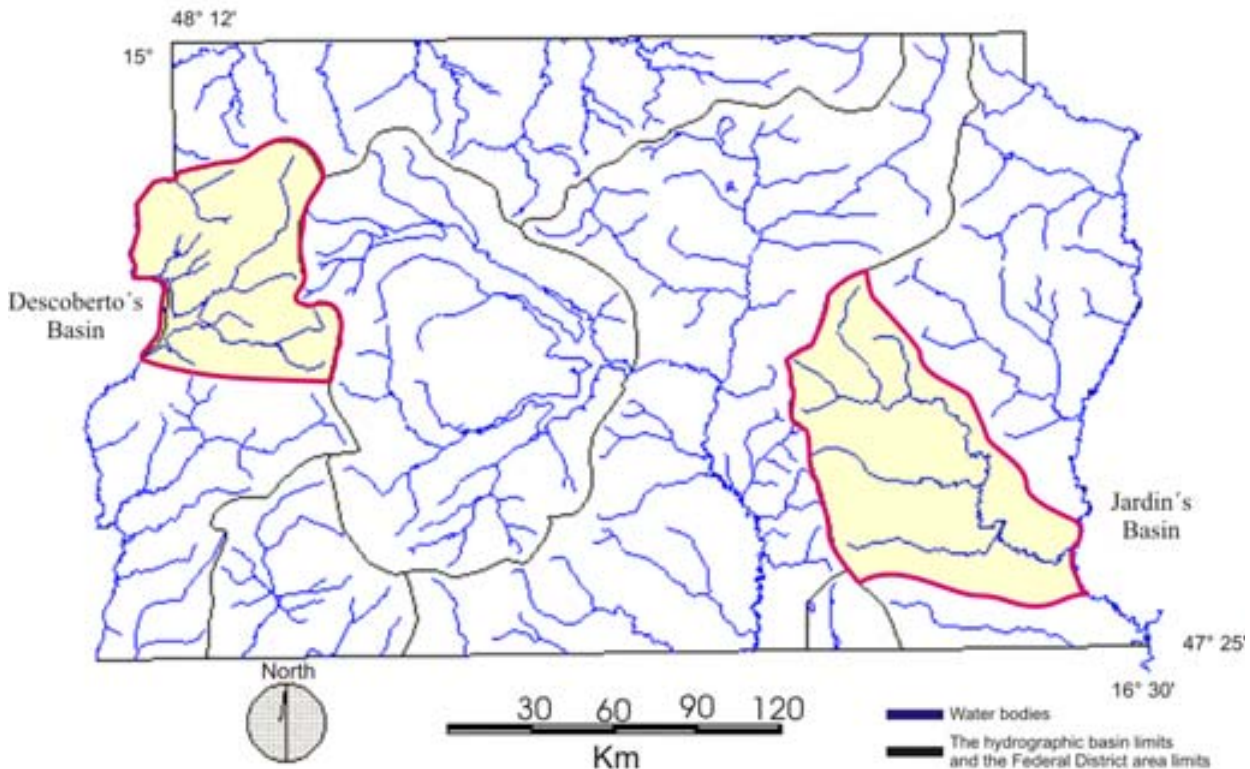
Brasilia, the Federal capital, was planned in the centre of the country with the strategic purpose of promoting the development of the interior and national integration. Brasilia, nowadays, has been quickly expanding over the 5,814 km<sup>2</sup> of the Federal District (DF). Intense population migration and growth of agriculture have placed pressure on the environment and they threaten to deform the original city planning (Historic Patrimony of Humanity-UNESCO). The wide scale mechanization of agriculture, particularly since the early 70's, has altered the natural landscape of central Brazil. The scale of agriculture began to have a larger significance during the 80's, with introduction of crops such as soybean, irrigated and extensive cultivation, today concentrating in the eastern part of DF, in the aisle formed between the hydrographic basins of the Rivers Preto and São Bartolomeu. It is estimated that the remaining area with lesser anthropogenic influence represents only 40% of the total area of the Savannah, in other words, 120 million hectares have already been converted to urban and rural activities. With a demographic density of 22 inhabitants per km<sup>2</sup>, and an agricultural business policy encouraging rapid substitution of the natural landscape with mechanized monocultures, the area is being characterized by a concentration of population in urban conglomerates. The DF and surrounding areas are migrant attraction poles, predominantly attracting Northeasterners, who have continued to migrate into the area since the foundation of Brasilia. The figured panorama is the conversion of the Savannah into a vastly altered area with significant environment and bio-diversity losses. The hydro, resources, which are characterized by medium and small-sized wide streams and streams, are strongly threatened in this context.

In this perspective, the areas selected for the study within the Federal District, were the basins of the Rivers Descoberto and Jardim (Figure 1), once these areas possess individual geomorphologic characteristics, but have been undergoing a period of increased urbanization, resulting in the construction of impermeable cover over large areas and consequently triggering hydro erosion processes. Besides the urbanization process, the rural areas have been going through intensification processes and agricultural mechanization, resulting in scenarios which favor hydro erosion, thus sterilizing the soil, reducing the capacity of water storage and in addition to the great production of sediments, provoking the silting up of the fluvial channels and reservoirs.

### **Problem**

The mechanisms of the erosive process are very complex, due to a number of contributory factors, such as the geology, geomorphology, climate, precipitation regime, type of soil, position of the water shed and the vegetation, besides the anthropogenic activities. The internal erosion also depends on how these factors intervene in the environment and also on the percolation fluid and the direction and magnitude of the hydraulic gradient. The erosive processes are characterized by two phases. A first phase of disaggregation of the solid particles, which can be analyzed in relation to the plasticity, activity, cohesion, structure, aggregation and the characteristic foundation of the soil. The second phase consists of the transportation of the solid particles, which may be studied knowing the granulometry and the density of these particles.

In the tropical areas, humid conditions and temperature favour the action of physiochemical processes, such as oxidation, reduction, dissolution, rain, temperature variations and the seasonal variation in the temperature and rainfall (the dry and rainy seasons).



**Figure 1.** Location of the pilot basins in the Federal District

In the Savannah, erosion appears more intense in the urban areas and its surroundings than in the essentially rural areas. Human activities, along with pluvial erosion and the erosion of underground water, have been fundamental in the intensification of the changes that have occurred in the natural environment. Among the several activities, which accentuate the erosive processes, one can highlight the loss of protection as a consequence of the loss of the soil, the divisions into land parcels, artificial canalization, road construction over steep hillsides, inadequate cultivation in steep-sloping areas and the irrational use of the soil in urban areas (Novaes-Pinto 1990). Analysis of the presence of deep furrows in several hillsides areas of the Savannah, demonstrated that, man's indiscriminate intervention leads to the appearance of linear cave-ins, due to road buildings, deforestation, artificial canalization, etc. The cave-ins partially destroy areas of pasture and cultivation, as well as affecting highways and even reach some housing located in urban and suburban areas. The most serious consequences of erosion in the Savannah are the imbalances provoked in the environment, not only through the silting up in water courses, but also in the water and aquatic fauna quality, in the soil structure and productivity, in the underground water regime, in the hillside stability, in the development of vegetation and the terrestrial fauna, and also in the risk to the populations' lives (Novaes-Pinto 1990).

### ***Physiographical Aspects***

The DF is located in the eastern part of the Brasília Area, underlain by groups of rocks, such as the Canastra, Paranoá, Araxá and Bambuí Groups. The Canastra Group comprises varied phyllites with quartzite, calciphyllites, fine marbles and carbon phyllites. The Bambuí Group, which dominates in the basin of the Jardim River, is characterized by an essentially pelitic sequence with metagrits and clayey metasilts, with a presence of arkose and silt sediments (Freitas-Silva & Campos 1998).

The DF is located in one of the highest areas of the Central Plateau, corresponding to remnants from planation during the Sulamericanas and Velhas erosion cycles, which developed between the Late and Middle Tertiary, and between the Middle and Recent Tertiary, respectively (Braun 1970; Novaes-Pinto 1986; Novaes-Pinto 1987; Novaes-Pinto 1988). The geomorphological features of the Federal District and surrounding areas are characterized by dominant forms of relief, such as remnants from planation, represented by plateaus. They take the form of flat or plane topography to slightly wavy or ramps, covered with vesicular, pisolitic or nodular laterite and latosols. In inter-plateau areas peripheral lowering resulting from pediplanation processes has resulted in long fluvial valleys, whose hillsides suffer alternate dissection and pedimentation processes (Novaes-Pinto 1993).

Novaes-Pinto (1994) subdivided the landscape of the DF into 13 geomorphologic areas, which have been grouped by morphologic and genetic similarities, into the three great macro units, which were used in this work:

- Plateau Areas: occupy 34% of the DF area, characterized by flat and slightly wavy, but flat topography and low drainage density.
- Intermediate Dissection Areas: occupy 31% of the DF area and are areas of weak dissection, drained by small streams.
- Valley Dissected Region: occupies 35% of the DF area and comprise areas dissected by the main rivers in the region; it presents larger drainage density than the previous areas.

The climate in the DF is considered to be of Tropical Savannah type and dry winter rainy Temperate type, characterized, according to Novaes-Pinto & Neves (1985), by the clear and real existence of two seasons:

- The rainy: which is prolonged from October to March, coinciding with the hot season and with maximum temperature of 32°C. The largest rain concentration is in December and the average precipitation varies from 1,500 to 1,750mm.
- The drought: corresponding to the cold season, with average temperature ranging from 16°C to 18°C between the months of April to September, and strongly accentuated in June and July. The precipitation index can be null.

The dominant vegetation covering the area is the Savannah. It is characterized by small to medium sized woody trees with a thick bark and usually developed leaves, appearing isolated or in groups (Silva 2003). Although largely altered by agricultural development, there remain some areas of preserved native vegetation, where Savannah habitats may be identified, often varying according to the humidity and fertility of the soil. Therefore, we have: the Savannah, Savannah field and the thin Savannah, occupying the highest parts of the relief, where these factors are weaker, and forests, along with the great Savannah in the lowest parts, where the soil thickness and humidity is more expressive. In the humid or flooded valleys, there are strips of gallery or ciliar forests.

According to the Technical Bulletin of EMBRAPA (1978), the soils, which are dominant in the DF are: dark red Latosol, yellow red Latosol and Cambisol. According to a more recent study (Silva 2003) in the area, four classes of soils were developed, as described below:

- Latosols: these include those, in which the main elements responsible for their formation are: the climate and the relief. They are well formed soils, with well developed A, B and C-horizons. They possess a dark-reddish to purple color, clayey texture, and are characterized as being deep and well drained.
- Hydromorphic soils: these occur in very humid areas or in flooded lands, such as meadows and paths. They possess yellowish to dark grey color, and well-defined horizons. They are eutrophic, humic, sometimes organic, well drained, fertile and with an average thickness of 1 to 1.5m.
- Litosol: recent and lacking horizon. They are shallow, immature with horizons A and C or just A, weakly developed over the main rock. They occur in areas with rough or mountainous relief.
- Concretions: soils, which support the highest content (more than 50%) of rough rocky material in decomposition, quartz fragments of varied sizes and forms, and nodules of rusted concretions. They present variable thickness and occupy extensive areas; often related to the latosol.

The basins of the Rivers Corumbá, São Bartolomeu, Maranhão, Preto, São Marcos and Verde drain the area. The rivers are important, both in terms of the area that they occupy, as well as the role they have in the regional economy. In general, the rivers demonstrate several characteristics, which are influenced by the geological nature of the land, being therefore, aligned to the structure, lithology and relief forms and presenting strongly aligned valleys.

The hydrography of the area is influenced by perennial rivers, which drain in various directions, including drainage that belongs to the three great hydrographic Brazilian basins. The River Preto belongs to the São Francisco Basin; the Rivers Maranhão and Verde to the Tocantins Basin, while the other water courses occupy the Paranaíba Basin, forming the Paraná River, fed by a drainage network of rivers, including: Corumbá, São Bartolomeu and São Marcos. The Corumbá River Basin is the main hydrographic basin of the area (Silva 2003).

## METHODOLOGY

This research considered two erosion models for the calculation of soil loss in Federal District. We used the USLE - Universal Soil Loss Equation (Wischmeier & Smith 1978) and MMF - Morgan, Morgan and Finney (Morgan 1995). The diagram shown in the figure 2 presents the methodology applied in this research.



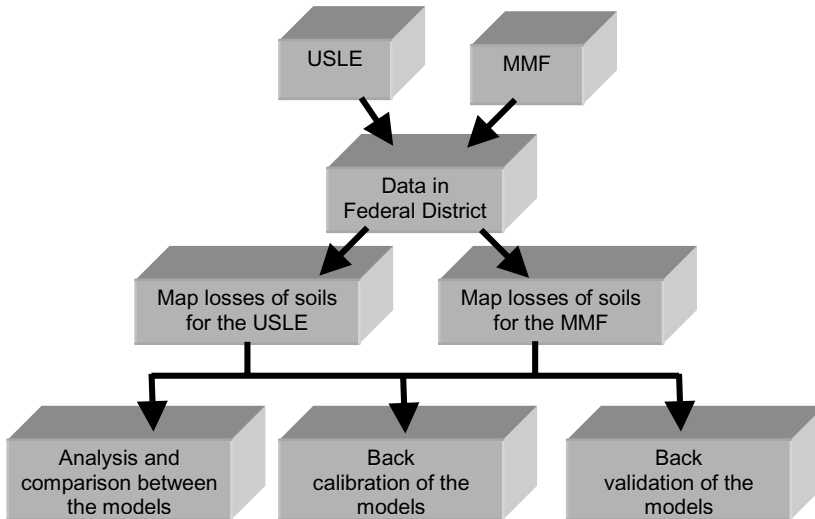


Figure 2. Diagram of the used methodology.

## USLE

USLE is one of the more broadly used equations for the calculation of soil losses. It was projected as a method for the prediction of the annual average of soil loss caused by sheet erosion. The equation is defined below:

$$A = R.K.L.S.CP$$

where,

- A = Soil Erosion Rate, in t/(ha.annum);
- R = Factor-Rainfall Intensity, in MJ.mm/(ha.h.annum);
- K = Factor-Soil Erodibility, in t.h/(MJ.mm);
- L = Factor-Slope Length, based on the values, in meters, of the slope length;
- S = Factor-Slope Percent, based on the values, in percentage, of the slope;
- C = Factor-Cover Management; and
- P = Factor-Supporting Practices.

### Factor R - Rainfall Intensity

The erosivity of the rain can be understood as a numeric evaluation of the capacity of a storm or of a rainfall to erode the soils of an unprotected area (Wischmeier 1959).

The medium value of the erosivity index was determined through the relationship between the monthly average and the annual average of rainfall. Firstly the simple arithmetic average (historical) was calculated for all the pluviometric stations of CAESB (Company of Environmental Sanitation of Federal District) in Federal District and after the value of R was calculated through of the equations below:

$$EI_{30} = 67.355(r^2/P)^{0.85}$$

where,

- EI30 = monthly average of the erosivity index, in MJ.mm/(ha.h);
- r = average of the monthly total of rainfall, in mm;
- P = average of the annual total of rainfall, in mm,

and for the determination of R it was necessary to add the 12 monthly values of the erosivity index, in each pluviometric station for the formula:

$$R = \sum_{j=1}^{12} EI30j$$

### Factor K - Soil Erodibility

The factor K aims to quantify the “erosion intensity for unit of index of erosion of the rain for a specific soil that it is maintained continually without covering, but suffering normal cultural operations” (Carvalho 1994). It can simply be understood as the susceptibility of the soil to erosives process (Bertoni & Lombardi Neto 1993).

The erodibility of the soils of Federal District was determined through of the Bulletin Technical number 53 (EMBRAPA 1978) which was grouped in 94 profiles of soils.

Fator K's determination was based on the physical-chemical parameters used by the nomogram of Wischmeier *et al.* (1971) by the equation of Roloff & Denardin (1994):

$$K = 0.004X_1 + (Mm)^{0.5}$$

where,

$M_m = \% \text{ lime} \times (\% \text{ lime} + \% \text{ very fine sand})$ ;

$X_1$  = permeability coded by Wischmeier *et al.* (1971);

for the equation of Denardin (1990):

$$K = 6.08 \times 10^{-3}(\text{PERM}) + 8.34 \times 10^{-3}(\text{OM}) - 1.16 \times 10^{-3}(\text{OAL}) - 3.78 \times 10^{-4}(\text{AR})$$

where,

PERM = permeability coded by Wischmeier *et al.* (1971);

OM = percentage of organic matter;

OAL = percentage of oxide of aluminum, extracted by sulfuric acid;

AR = percentage of sand (2 and 0.5 diameter mm).

and for the equation of Chaves (1994):

$$K = 2.47 \times 10^{-3} \text{SIL} - 5.23 \times 10^{-3} \text{OAL} + 8.89 \times 10^{-3} (\text{CO})^2 + 1.15 \times 10^{-2} (\text{OFE})^{-1} + 1.42 \times 10^{-4} (\text{OSI} + \text{OSI}^2) - 1.89 \times 10^{-2} \text{OSI} / (\text{OFE} + \text{OAL})^2$$

where,

SIL = lime percentage in the soil;

CO = percentage of organic carbon;

OAL = percentage of oxide of aluminum;

OFE = percentage of oxide of iron; and

OSI = percentage of silicon oxide.

### *Factor LS - Slope Length and Slope Percent*

The factor slope length (L) impacts directly on the soil loss since very extensive ramps can generate run-off with high velocities.

The slope percent (S) is understood as the angle or the percentage of the inclination of the land, and it is important in the prediction of soil loss. Sheet erosion is associated to the increase of the speed of overland flow.

The topographical factor (LS) was determined from the digital elevation model (DEM) generated from the topographical map in the scale 1:100 000 of SICAD (Cartographic System of Federal District), interpolated with the kriging method.

For the calculation of the ramp length the index of medium extension of the rainfall was used on the lands by hydrographic basin. This index was obtained by the method of the equivalent rectangle modified by Vilella & Mattos (1975) and determined by the following equation:

$$L = A/4l$$

where,

L = factor slope length and/or medium extension of the flow on the lands (m);

A = area of the basin (m<sup>2</sup>); and,

l = sum of the length of all the courses of water of the basin (m).

After those procedures, the equation was used below for determination of LS:

$$LS = 0.00984l^{0.63} \cdot s^{1.18}$$

where,

l = slope length (m);

s = slope percent (%).

### *Factor CP - Factor Cover Management and Supporting Practices*

The factors C and P consider the anthropogenic influences on the process. The value of C is given by the sum of all calculated values of C for periods of the cycle of development of the culture. The variation of C ranges between 0.00004 for the areas covered by native forest and 1 for the areas of exposed soils lacking vegetation.

Bengtson & Sabbagh (1990) defined P as the rate of soil loss among the supporting activities used and the loss occurring in the plantations installed in the sense of the slope.

The factor CP was determined from the use and occupation of the soil of DF using the Stein *et al.* (1987) proposal which integrated the anthropogenic factors of USLE: cover management (factor C) and supporting practices (factor P). After the determination of the values of CP for each use and occupation of the soil they were attributed to the classes of the Map of Use and Occupation of the Soil of Federal District (IEMA/CODEVASF 1994).

## **MORGAN, MORGAN & FINNEY (MMF)**

The model Morgan, Morgan and Finney was originally developed to predict the annual loss of soils due to sheet erosion and in gullies in small agricultural areas. However in a generalized attempt to model larger areas the MMF was later applied, using resources of remote sensing and geoprocessing, to a larger area of Indonesia (Jong & Riezebos 1992 in Morgan 1995).

The model separates the erosive processes into an aqueous phase and sediment production phase (Figure 3). The sedimentary phase considers the erosion of the soil as a result of the detachment of particles of the soil due to the

impact of the raindrop (rain splash) and the subsequent transport of the released particles by superficial flow (overland flow). The sedimentary phase is represented by two equations: one to evaluate the detachment rate, the effect of the raindrops (splash) and another to evaluate the transport capacity for overland flow. In these equations, the input of the energy of the fall of the raindrops and the volume of superficial flow are obtained from the aqueous phase.

The model uses six operational functions that require the calculation of fifteen physical parameters. As final result the model compares the detachment prediction for raindrop (F) and the transport capacity for superficial flow (G), utilizing the lower of the two values in the calculation of the annual rate of soil loss.

#### Phase Water

$$E = R(11.9 + 8.7 \log_{10}^{-1})$$

$$Q = R \exp(-R_c/R_0)$$

where

$$R_c = 1000 M_s \cdot B_D \cdot R_D (E_r/E_0)^{0.5}$$

$$R_0 = R/R_n$$

#### Phase Sediment

$$F = K(E_0^{-aA})^b \cdot 10^{-3}$$

$$G = C \cdot Q^d \cdot \sin S \cdot 10^{-3}$$

where,

E = kinetic energy of rainfall (J/m<sup>2</sup>)

Q = volume of overland flow (mm)

F = rate of soil detachment by raindrop impact (Kg/m<sup>2</sup>)

G = transport capacity of overland flow (Kg/m<sup>2</sup>)

Values of exponents: a=0.05; b=1.0; d=2.0

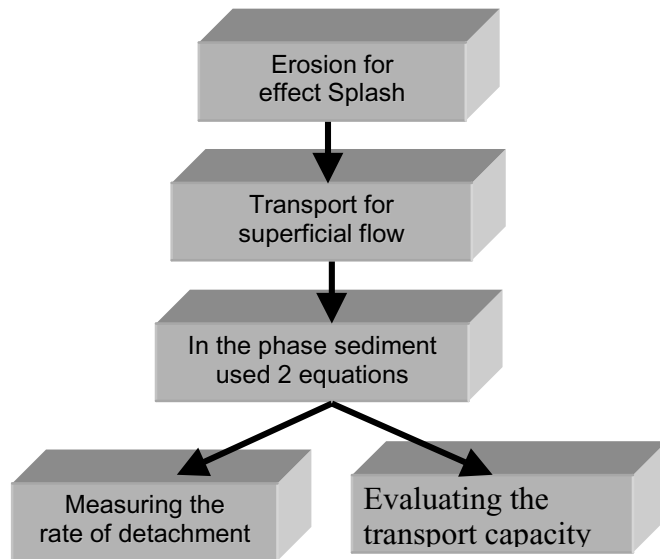


Figure 3. Illustrating the diagram of the model of MMF.

- $M_s$  = Field capacity (% w/w);
- $B_D$  = Bulk density (Mg/m<sup>3</sup>);
- $R_D$  = Top soil rooting depth (m);
- $S_D$  = Soil depth (m);
- $K$  = Detachability (g/J);
- $W$  = Rate of increase in soil depth by weathering at the rock-soil interface (mm/y);
- $V$  = Rate of increase in the top soil rooting layer (mm/y) and the natural breakdown of vegetative matter into humus;
- $S$  = Slope angle;
- $R$  = Annual rainfall (mm);
- $R_n$  = Number of rain days in the year;
- $I$  = Value for intensity of erosive rain (mm/h);
- $A$  = Percentage rainfall contributing to permanent interception and stemflow;

- $E/E_o$  = Ratio of actual to potential evaporation;
- C = Crop cover management factor;
- N = Number of year for which the model is to operate.

## RESULTS AND DISCUSSION

The application of the models USLE and MMF in Federal District showed coherence. The USLE model presented a soil loss of approximately 7,725.74 t/ha.year while the model of MMF presented 5,444.40 t/ha.year. Figures 4 and 5 are the results of the application of the models USLE and MMF respectively. Figure 4 confirms that of the input factors to the USLE model the LS factor (slope length and slope percent) contributed most significantly to the overestimate of the total loss of soils modeled in relation to the results obtained using MMF. This is observed in the class 0-1, since in field in spite of corresponding to the highlands these area also possess the susceptibility to the erosion processes by virtue of the wide agricultural use. For example, for the soil loss of approximately 7,725.74 t/ha.year it would be necessary that at least a point of the land would possess the characteristics more critical soil loss. This is not seen in the Federal District, indeed a pixel placed in the edge of Contagem plateau in the direction of the dissected valley of Maranhão presented the value of 3,454 t/ha.year, which was the largest value found. However as the calculated absolute values were not calibrated by field experiments they cannot be compared with the reality. On the other hand, in Figure 5 it can be seen that in the areas with intensive land-use higher values of soil loss comprise scenarios with a tendency for soil loss to be dominated by sheet erosion. It has been verified that the agricultural practices adopted in field increase the potential of the erosive processes, which confirm in a qualitative way the modeled losses of soils.

Using the MMF model a total loss of about 5,444.40 t/ha.year was calculated, however empirical models like the USLE and MMF models present problems related to wide-scale application, because they were created for small areas with strong empirical controls on the acquisition of data and ideally they should not be extrapolated beyond the sampled area. Similarly, these models rarely supply satisfactory results when applied in other areas (Morgan 1995). Therefore, it is necessary to compare and calibrate the results of each of the models to improve the reliability of the results. This component of the work is on-going. Thus the attributes that contribute to the problem are being investigated and the models are being tested to assess the parameter sensitivity by defining the boundary of natural variation of each of the attributes and consequently the boundaries of variation in the model outputs. Based on this information, modifications to the structure of the mathematical models can be proposed in order to more accurately represent the actual observed conditions. Modification to the weighting of the attributes will be necessary and, in extreme cases, the incorporation of new attributes that better represent the conditions will be incorporated in the models. Having made the proposed modifications to the mathematical models of erosion it will be possible to model future scenarios that achieve an understanding of the evolution of the phenomena, as well as the provision of an understanding of the future behavior of the processes of the sedimentation in the basins.

The results obtained from the calibrated models will provide an estimation of the amount of sediments being deposited in the reservoir of the basin of the Descoberto River. These results will be compared with actual reservoir sedimentation data, which takes the form of bathymetry data. The comparative process will give a direct comparison of the calculations from the models of the basins with relation to the initial conditions of the problem.

A back calibration process and final adjustment of the models of soil loss and sedimentation will be accomplished for the two hydrographic basins of the Federal District. The final models will have as input information fixed attributes, such as geology, geomorphology, soil types and variable attributes, such as uses of the soil and hydrology.

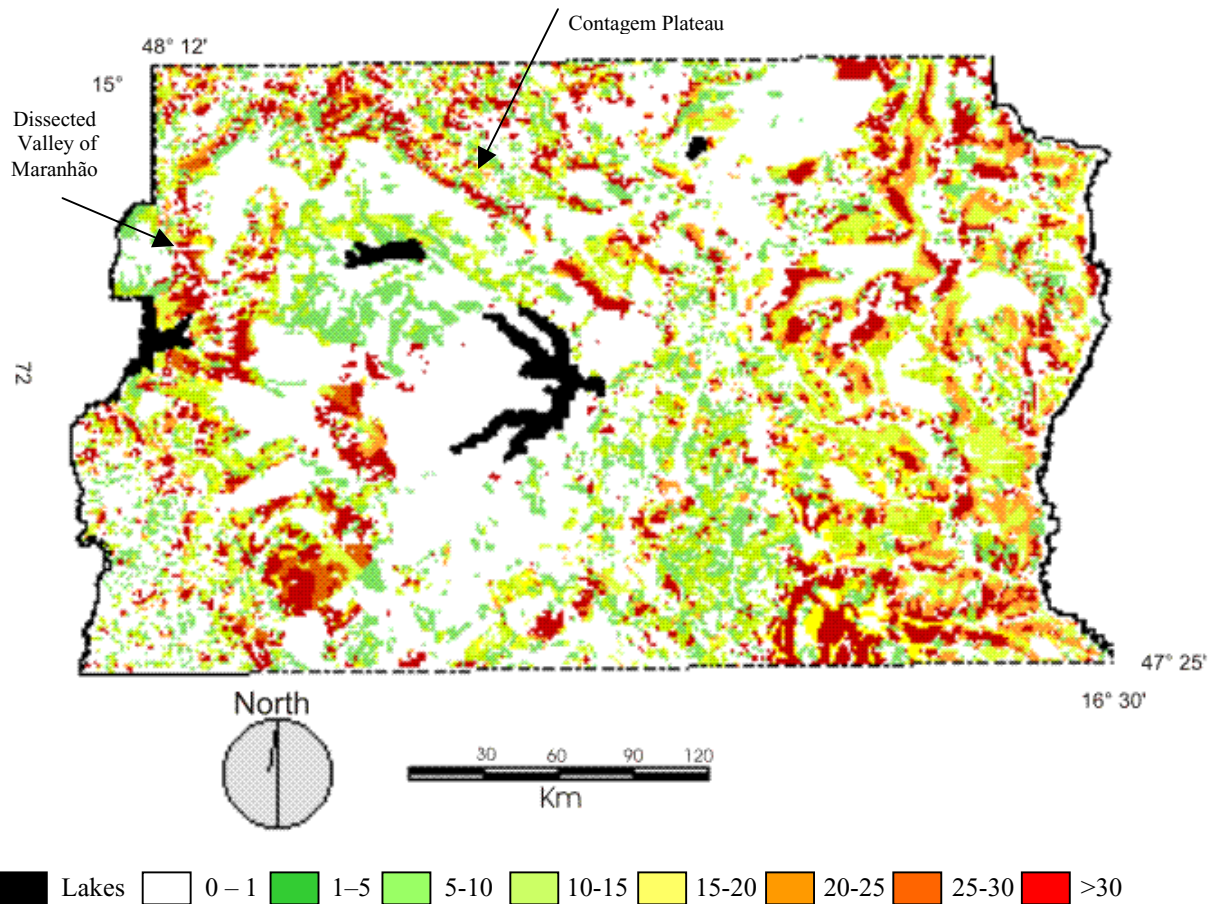


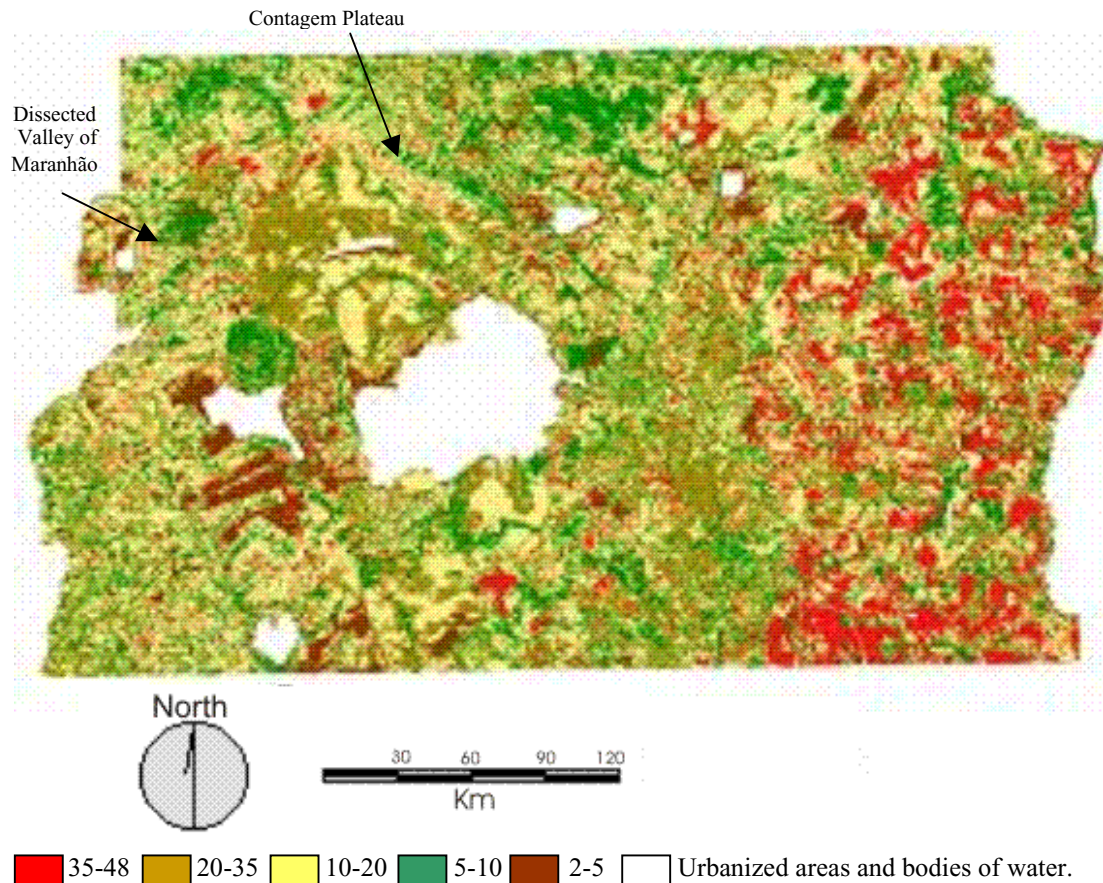
Figure 4. Application of the model USLE for the Federal District (Baptista 1997).

## CONCLUSIONS

In spite of their limitations in the quantitative aspect when used in large areas the application of the USLE and MMF models enable the identification of the soil losses that are caused by the present occupation. They also enable simulations of future sceneries. The parameters have to pass through several stages of refinement to improve the precision of the estimate of soil erosion in countries of tropical climate.

It was verified in the Figures 4 and 5 that the modeling highlighted the potential areas susceptible to sheet erosion. Modeling carried out using the USLE overestimated soil losses in the areas with high dissection of the relief and that in the areas with low slope angles values were underestimated. At the same time, modeling using MMF verified that areas with larger erosion values are in the areas dominated by agricultural land-use. It is also noticed that although the values are high (detachment values) they were below the values found by USLE.

In addition, it has been identified that there is no possibility of using of the quantitative data without field validation. For this reason the analysis was based on qualitative aspects, then in the case of Federal District it was necessary both to carry out field studies and to calibrate the model. This work will allow a better adjustment of each of the parameters of the USLE and MMF models, aligning the model with the tropical soils and the larger areas, thus enabling quantitative determination of the soil loss. Nevertheless it was not developed in the ambit of this article so the results obtained cannot yet be aligned with actual erosional losses.



**Figure 5.** Application of the model MMF for the Federal District (Francisco *et al.* 2002).

Return visits to the study place will allow further validation of the results, as well as to enabling final fittings to improve the precision of the models. It is important to note that rarely does the calibration of the models allow applicability to other practical cases, for instance the applicability may be limited to the reservoir for which the data was measured.

**Acknowledgements:** The authors wish to thank their institutions (Brasília University-UnB, Nacional Council of Scientific and Technological Development-CNPq) for supporting various research projects related to gully erosion in Federal District, Brazil.

**Corresponding author:** Mr Renato Apolinário Francisco, Universidade de Brasília, SQN 210 Bloco A Apartamento 605 Ed. Espanha, Brasília, Federal District, 70.862-010, Brazil. Tel: +55 61 32020450. Email: renatoaf@unb.br.

## REFERENCES

- BAPTISTA, G. M. M. 1997. *Environmental diagnostic of laminar soil loss in Federal District using Geoprocessing*. Thesis, Department of Civil Engineering, Brasília, DF, 102 (in Portuguese).
- BENGTSON, R.L. & SABBAGH, G. 1990. USLE P factors for subsurface drainage on low slopes in a hot, humid climate. *Journal of Soil and Water Conservation*. July - August, 480-482.
- BERTONI, D. & LOMBARDI NETO, F. 1990. *Conservation of the Soil*. Publishing Icon, 335 (in Portuguese).
- BRAUM, O. P. 1970. Contribution to the geomorphology of Central Brazil. *Brazilian Magazine of Geography*, **32**(3), 3-29 (in Portuguese).
- CARVALHO, N.O. 1994. *Hidrossedimentology Practice*. Company of Research of Mineral Resources - CPRM. Rio de Janeiro, 372 (in Portuguese).
- CHAVES, H.M.L. 1994. *Estimate of the Current and Potential Erosion in the Valley of San Francisco*. CODEVASF/FAO, Technical Report, Brasília (in Portuguese).
- DENARDIN, J.E. 1990. *Erodibility of the soil esteemed by means of physical and chemical parameters*. Thesis, ESALQ, USP- São Paulo University, São Paulo, SP, 124 (in Portuguese).
- EMBRAPA. 1978. *Rising of Recognition of the Soils of the Federal District*. National Service of Rising and Conservation of Soils. Technical Bulletin 53, Rio de Janeiro, 455 (in Portuguese).
- FRANCISCO, R.A., BORGES, A.C., NETO, J.P.S. & SOUZA, N.M. 2002. Modeling of soil loss for laminar erosion in Federal District applying Morgan & Finney (MMF) model. *Annals of the IV National Symposium of Geomorphology*. São Luis, MA, 45-52 (in Portuguese).
- FREITAS-SILVA, F.H. & CAMPOS, J.E.G. 1998. Geology of Federal District. In: *Inventory Hydrogeologic and of the Resources Superficial Hydric of the Federal District*. Technical Report, Brasília, **1** (in Portuguese).
- IEMA/CODEVASF. 1994. *Map of use and occupation of the soil of Federal District*. 1<sup>a</sup> edition, GDF, Brasília (in Portuguese).

- MAYER, L.D. & WISCHMEIER, W.H. 1969. Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **12**(6), 754-758.
- MORGAN, R.P.C., MORGAN, D.D.V & FINNEY, H.J. 1984. A Predictive model for the assessment of soil erosion risk. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **30**, 245-253.
- MORGAN, R.P.C. 1995. *Soil Erosion and Conservation*. Longman, London, 298.
- NOVAES-PINTO, M. 1986. Units geomorphologic of Federal District. *Geography*, **11**(2), 97-109 (in Portuguese).
- NOVAES-PINTO, M. 1987. Surfaces of leveling of Federal District. *Brazilian Magazine of Geography*, **49**(2), 9-26 (in Portuguese).
- NOVAES-PINTO, M. 1988. Leveling in the tropics - a conceptual revision. *Geography*, **13**(26), 119-129 (in Portuguese).
- NOVAES-PINTO, M. 1990. *Cerrado: Characterization, Occupation and Perspectives*. Brasília: Publishing Brasília University, 657 (in Portuguese).
- NOVAES-PINTO, M. 1994. *Characterization Geomorphologic of the Federal District*. In: Pinto, M.N. (Org.). *Cerrado: Characterization, Occupation and Perspectives*. Brasília: Publishing UnB/SEMATEC, 2ª edition, 285-320 (in Portuguese).
- NOVAES-PINTO, M. & Neves, R.R. 1985. Geomorphology of the River Alagado Basin – Federal District – Goiás. *Geosciences*, São Paulo, **4**, 127-138 (in Portuguese).
- ROLOFF, G. & DENARDIN, J.E. 1994. Simplified estimate of the erodibility of the soil. *X Brazilian Meeting of Handling and Conservation of the Soil and of the Water*, Summaries, Florianópolis, SC (in Portuguese).
- SILVA, C.R. 2003. *Zoneamento Ecológico-Econômico da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno*- Fase I. CPRM-Geologic Service of Brasil; Embrapa; MI/SCO, Rio de Janeiro, **1**, 1-7 (in Portuguese).
- STEIN, D.P., DONZELLI, P.L., GIMENEZ, A.F., PONÇANO, W.L. & LOMBARDI NETO, F. 1987. Erosion potential to laminate, natural and anthropic, in the basin of the “Peixe-Parapanema”. *Annals of the IV National Symposium of Control of Erosion*. Marília, SP, 105-135 (in Portuguese).
- VILLELA, S.M. & MATTOS, A. 1975. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill of Brasil Ltda. São Paulo, 245 (in Portuguese).
- WISCHMEIER, W.H. 1959. A rainfall index for a universal soil loss equation. *Soil Science Society of America Proceedings*, **23**, 246-249.
- WISCHMEIER, W.H., JOHNSON, C.B. & CROSS, B.V. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, Ankeny, **26**(5), 189-193.
- WISCHMEIER, W.H. & SMITH, D.D. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A guide to conservation planning*. Supersedes Agriculture Handbook. Science and Education Administration United States Department of Agriculture, (282), 58.

## **MODELAGEM DE RISCO À EROSÃO LAMINAR DO ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DESCOBERTO: CONTRIBUIÇÃO AO PLANO DIRETOR DE ORDENAMENTO TERRITORIAL DO DISTRITO FEDERAL**

Elenjuce Ferreira Dias Valentin ([elenjuce@unb.br](mailto:elenjuce@unb.br)); Detlef Hans-Gert Walde ([detlef@unb.br](mailto:detlef@unb.br))

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília

O Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto localiza-se parte na região oeste do Distrito Federal e parte no Estado de Goiás, próximo a Brazlândia. Na porção que se encontra no lado do DF, situa-se o Projeto Integrado Alexandre Gusmão (PICAG), com áreas rurais produtoras de hortifrutigranjeiros e áreas urbanas em processo de consolidação. Já no outro lado, situa-se a cidade de Águas Lindas de Goiás, região que tem apresentado expressivo crescimento demográfico nesta década e no fim da década passada, com planejamento urbano e com infra-estrutura precários. Esta situação contribui consideravelmente com o risco de aceleração dos processos erosivos nesta bacia hidrográfica.

A bacia do Descoberto destaca-se por abastecer de forma significativa o DF com cerca de 2/3 do total de água produzida pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb) captada do reservatório do Rio Descoberto. No entanto, a qualidade e a quantidade de água fornecida estão sendo comprometidas pelo uso e ocupação indevidos da região, em especial nas áreas rurais de uso diversificado e nas áreas urbanas em expansão desordenada. Nestas áreas observam-se significativos impactos ambientais por ações antrópicas praticadas, principalmente o aumento da erosão laminar e de sedimentos nos corpos d'água.

Este trabalho foi proposto com o intuito de estudar os processos erosivos na bacia do Descoberto, bem como colaborar com o planejamento de uma área em expansão, contribuindo com o Plano de Ordenamento Territorial do Distrito Federal (PDOT-DF), a partir da modelagem de risco à erosão laminar da região. Neste sentido foram gerados diversos mapas da bacia, entre eles o de uso e ocupação do solo e o de risco anual médio de erosão laminar. O primeiro mapa foi elaborado com base na classificação de uma imagem de satélite Spot, com posterior interpretação e validação em saída de campo. O segundo mapa resultou da aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS). Por último, foi realizada uma tabulação cruzada com base nos dados destes mapas.

Os resultados demonstram que na bacia do Descoberto predominam formas de uso que pouco protegem o solo, como áreas rurais de uso diversificado e áreas urbanas em processo de consolidação. Estas áreas abrangem quase 50% da bacia e influenciam de forma relevante no aumento da exposição do solo à erosão, com risco potencial chegando ao valor médio de 669,75 t/ha.ano.

A modelagem propiciou uma possível contribuição para o PDOT-DF ao estimar áreas de maior risco potencial à erosão no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto. Em síntese, o presente estudo demonstra a importância da gestão ambiental integrada, ao incorporar instrumentos como o plano diretor e a modelagem de impactos ambientais, que auxiliam não só no processo decisório de planejamento de áreas em expansão, como também contribui com ações de prevenção e de controle no uso e ocupação do solo.



# PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO E PREVISÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS NO ALTO CURSO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DESCOBERTO - DF/GO

*E.F.D. Valentin, D.H.G. Walde e J.W.C. Rosa*

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília - DF - Brasil, [elenjuce@unb.br](mailto:elenjuce@unb.br), [detlef@unb.br](mailto:detlef@unb.br), [jwfundsd@brturbo.com.br](mailto:jwfundsd@brturbo.com.br)

## ABSTRACT

O Distrito Federal tem apresentado problemas vinculados à expansão demográfica semelhantes aos que afetam áreas urbanas de grande a médio porte no Brasil. Cerca de 43% do território do Distrito Federal está inserido em Área de Proteção Ambiental. Estas restrições à ocupação contribuem com o crescimento desordenado do entorno e conseqüentes impactos ambientais às bacias hidrográficas, provocando sensíveis reduções nos níveis de água dos reservatórios por assoreamento. O reservatório da Bacia do Rio Descoberto abastece significativamente o Distrito Federal, mas a qualidade e a quantidade de água fornecida estão comprometidas pelo uso e ocupação indevidos da região. Este trabalho propõe avaliação e previsão de impactos ambientais no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto por meio de uma ferramenta de modelagem multitemporal e de simulação de cenários que será desenvolvida como forma de auxílio ao planejamento ordenado de áreas em crescimento, considerando alterações físicas e espaciais na região.

**Palavras-chave:** assoreamento de reservatório, expansão urbana, modelagem multitemporal, simulação de cenários, planejamento.

## INTRODUÇÃO

O Distrito Federal (DF), apesar de ter menos de meio século de existência, tem apresentado um conjunto de problemas semelhantes, mas diferentes em intensidade, que afetam as demais áreas urbanas de grande e médio porte do país (Seduh, 2004). Tais problemas vinculam-se à singular expansão demográfica da capital e do entorno em locais sem critérios definidos para a ocupação do solo e infraestrutura precária, com conseqüentes prejuízos às áreas ambientais sensíveis.

O processo de crescimento dos municípios e aglomerações próximas ao DF está sendo calcado em uma ocupação sem planejamento, conduzida, em sua maior parte, por loteamentos esparsos que tiram proveito da proximidade do DF como fator de valorização fundiária e da falta de regulamentação do parcelamento de terras para fins urbanos, refletindo na ocupação caótica do entorno. A especulação imobiliária também é alimentada por uma demanda habitacional originada na migração de uma população sem recursos e sem condições de se fixar no DF (Seduh, 2004).

Ações antrópicas nas bacias hidrográficas do DF têm provocado sensíveis reduções nos níveis de água dos principais reservatórios e pontos de captação que abastecem a região. Assim, a escassez de fontes de abastecimento capazes de responder à demanda crescente para o atendimento em longo prazo é uma das questões mais críticas sobre o adensamento populacional do DF e do entorno com base nos impactos ambientais ligados aos recursos hídricos.

Dentre as ações mais comuns estão: a utilização indiscriminada de recursos naturais, principalmente das águas subterrâneas; condições precárias de esgoto sanitário com riscos de contaminação; a retirada da cobertura vegetal (provocando erosão e o assoreamento de corpos hídricos); e a impermeabilização do solo (reduzindo a capacidade de áreas de recarga). Com essas ações aumenta-se a probabilidade de comprometimento, não só dos mananciais que abastecem o DF, mas também dos corpos hídricos que alimentam estes mananciais (Seduh, 2004).

## OBJETIVOS

O objetivo principal da proposta de avaliação e previsão de impactos ambientais no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto é contribuir com o planejamento ordenado de uma área em expansão, por intermédio de modelagem multitemporal, considerando alterações físicas e espaciais na região.

Com esse propósito serão aperfeiçoados modelos de cálculo de saturação de solos e evapotranspiração, de evolução do uso e ocupação do solo e modelos de erosão/deposição de sedimentos.

Na conclusão do trabalho proposto será apresentada uma ferramenta de modelagem dinâmica, que integrará estes modelos aperfeiçoados e permitirá simular cenários para a bacia.

As simulações de cenários para regiões em crescimento serão úteis aos especialistas em diagnósticos e aos tomadores de decisão na análise e na avaliação das causas e dos danos de impactos

ambientais na bacia e no reservatório do Rio Descoberto. Além disso, auxiliará na definição de diretrizes a respeito do uso/ocupação do solo de regiões em expansão urbana, por exemplo, ao Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal (PDOT/DF) em revisão.

### ÁREA DE ESTUDO

O local selecionado para avaliação e previsão de impactos ambientais foi o Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto (Fig. 1), área limítrofe na direção oeste entre o Distrito Federal e o Estado de Goiás. A área situa-se no quadrante de S 15°35'00" a 15°48'00" latitude Sul e de W 48°03'00" a 48°15'00" longitude Oeste, abrangendo uma área de 452 km<sup>2</sup>, pertencente à Bacia do Rio Paraná (Reatto *et al.*, 2003b).

A região de estudo pertencente à Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás (APA do Descoberto). É uma área de abastecimento de água às populações urbanas do DF e de produção de hortifrutigranjeiros, no Projeto Integrado de Colonização Alexandre Gusmão (PICAG) pertencente à Região Administrativa de Brazlândia (Fig. 1).

### Hidrografia

A área de estudo está situada na porção superior da Bacia do Rio Descoberto e vai desde a sua montante até a barragem do Rio Descoberto, compreendendo o equivalente a 54,79% do total da Bacia do Descoberto (Reatto *et al.*, 2003b).

O reservatório do Descoberto (Fig. 1) localiza-se na latitude 15°52' S e na longitude 48°10' W no limite ocidental do Distrito Federal com o Estado de

Goiás. Ele é um lago artificial formado a partir do represamento das águas do seu principal contribuinte, o Rio Descoberto com leito quase totalmente em terreno do DF, e dos demais tributários: córregos Barrocão, Capão Comprido, Capão da Onça, Coqueiro, Lajinha, Olaria e Rocinha; e os ribeirões das Pedras e Rodeador.

O estudo da área para construção do reservatório teve início em 1969 (Caesb, 1969) e foi formado em 1974. Este reservatório faz parte do Sistema Integrado Rio Descoberto, o qual abastece significativamente a população do DF com cerca de 66% do total de água produzida pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – CAESB (Caesb, 2003).

### Clima

O DF está incluído no Domínio Morfoclimático do Cerrado. A média anual das precipitações oscila entre 1200 e 1750 mm. As mesmas condições climáticas são encontradas no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto.

A estação seca é bastante rigorosa e se estende, aproximadamente, de maio a setembro, chegando a ocorrer ausência total de chuvas nesse período, nos anos de seca extrema. A estação chuvosa vai de outubro a abril e apresenta maior pluviosidade no verão (dezembro a março) quando se concentram mais de 80% do total anual de chuvas (Codeplan, 1984).

### Vegetação

A vegetação predominante do DF é o cerrado, cobrindo cerca de 90% de sua área. Segundo Eiten (1994), encontram-se todos os tipos de



Figura 1 - Visualização da área de estudo em cena de uma imagem SPOT de 2003.

vegetação comumente englobados sob o termo cerrado, que vão desde árvores de porte elevado até ervas esparsas, formando um mosaico com a vegetação de matas galerias em torno das drenagens.

Conforme Reatto *et al.* (2003 b), no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto ocorrem os percentuais de vegetação apresentados no gráfico da figura 2.

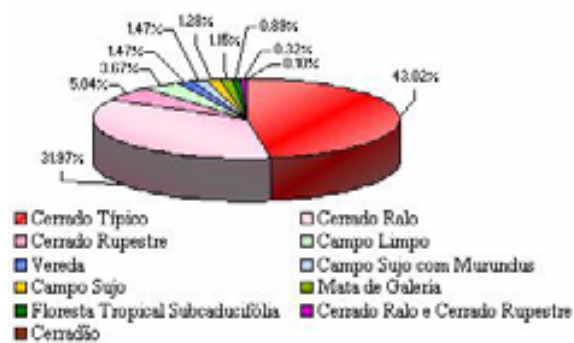


Figura 2 - Percentual de vegetação do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto.

### Geologia

A região do DF e entorno abrange os limites entre os segmentos Norte e Sul e/ou entre as zonas Externa e Interna da Faixa de Dobramentos Brasília, o que lhe confere uma estruturação bastante complexa (Freitas-Silva & Campos, 1998).

Os grandes conjuntos litoestratigráficos da região são os grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí, os quais têm suas unidades litoestratigráficas superpostas por sistemas de falhas de empurrão e cavalgamentos formados durante a Orogênese Brasileira (Fuck *et al.*, 1993).

O Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto tem seu contexto geológico local relacionado ao Grupo Paranoá. Esse grupo consiste em uma seqüência de rochas psamo-pelito-carbonatadas, de idade Meso/Neoproterozóica e baixo grau metamórfico.

Ademais, no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto ocorrem as coberturas sedimentares: Detrito-lateríticas Terciário-Quaternárias e Aluviões Holocênicas (CPRM/Embrapa, 2003).

### Geomorfologia

O estudo geomorfológico local possui grande importância para trabalhos de análise ambiental, pois facilita considerações sobre a precipitação pluviométrica, pedogênese, recarga dos aquíferos e a relação entre a forma do relevo, geologia e hidrogeologia (Dutra, 2003). A importância do estudo da topografia, nesta pesquisa, está na sua influência na bacia, por exemplo, na direção e na acumulação de fluxo de água.

Neste trabalho foi adotada a compartimentação geomorfológica do Distrito Federal definida por

Martins & Baptista (1998) em função da altimetria e declividade do relevo. Os autores evidenciam 5 compartimentos: Chapadas Elevada ou Planaltos, Rebordos, Escarpas, Planos Intemediários e Planícies. Esta compartimentação possui um forte controle lito-estrutural, onde as relações de paisagens apresentam relação com as estruturas tectônicas brasileiras.

### Solos

Os solos do DF representam bem os solos da região do cerrado. Neste trabalho foi adotado como fonte de informações sobre os solos da Bacia do Rio Descoberto o levantamento realizado pela Embrapa (Reatto *et al.*, 2003a), de onde se obteve o mapa pedológico do Alto Curso da Bacia do Descoberto, na escala 1:100.000. A figura 3 apresenta os percentuais das unidades mapeadas na área.

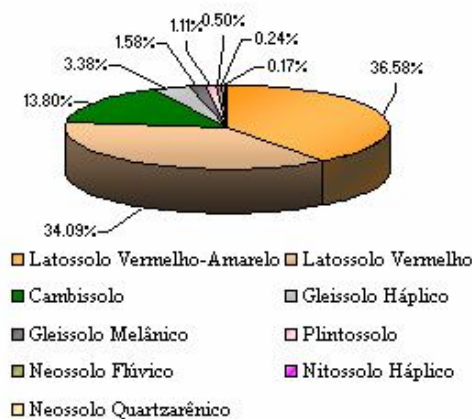


Figura 3 - Percentual das classes de solos do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto.

### Aspectos Sócio-Econômicos

A ocupação territorial do entorno do DF tem apresentado altas taxas de crescimento a partir da década de 90. O caso de expansão demográfica mais preocupante é o da cidade de Águas Lindas de Goiás (Fig.1), na direção oeste, considerada a maior cidade do entorno do DF. Há dez anos, era um distrito com 5 mil moradores e hoje a prefeitura calcula 200 mil, por estar vivenciado um período de altas taxas de urbanização. Além disso, foi feita uma estimativa preocupante pela prefeitura, que a população pode chegar a um milhão de pessoas em apenas 25 anos.

Do lado do DF, na Bacia do Descoberto, está a cidade satélite de Brazlândia (Fig. 1), onde está o PICAG (Fig. 1), que se destaca, sobretudo, pela expansão das atividades agrícolas na área.

O PICAG, projeto agrícola implantado a partir de 1966, pelo INCRA, ocupa 54% da Região Administrativa - RA de Brazlândia

(TERRACAP/ENGEA, 1991) e 57% da APA do Descoberto. Ele abastece boa parte do Distrito Federal com hortifrutigranjeiros, e ainda, exporta para diversos estados brasileiros (GDF/SEMATEC/IEMA, 1994).

### IMPACTOS AMBIENTAIS NO ALTO CURSO DA BACIA DO RIO DESCOBERTO

Os processos de uso e ocupação do solo sem planejamento e infra-estrutura urbana muito precária têm provocado impactos ambientais no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto (Figs. 4 e 5).

A expansão urbana de Águas Lindas apresenta notórios problemas sociais, econômicos, políticos e ambientais, tais como: falta de abastecimento de água regular, saneamento básico, extração irregular de material para construção (areia e cascalho) com conseqüentes erosões. Além desses fatores, há perigo de contaminação do lençol freático e da água superficial.

A porção sul da bacia apresenta intensa ação antrópica, por exemplo: desmatamento indiscriminado, exploração contínua de areais e cascalheiras, reflorestamento e criação de colônias agrícolas e assentamentos rurais. A água do reservatório fica comprometida pelo carreamento de sedimentos para as drenagens, pela disposição inadequada do lixo doméstico, além do esgotamento dos pequenos mananciais e pela utilização de agrotóxicos e fertilizantes.

Alguns dos lotes do PICAG foram parcelados irregularmente, surgindo núcleos urbanos, onde muitas casas foram construídas em Área de Preservação Permanente (APP). Entre esses núcleos urbanos está o INCRA 8 (Fig. 6), localizado bem próximo ao reservatório do Rio Descoberto. Esta figura mostra plantações que ultrapassam a faixa de proteção mínima de 125 m e avançam até o reservatório.

Nos últimos anos, na Bacia do Descoberto, em especial próximo a Águas Lindas de Goiás, nos compartimentos Chapadas Elevadas e Planos Intermediários, existem pequenas minerações, em geral, clandestinas (de areia, cascalho laterítico e argila) que utilizam técnicas inadequadas de exploração e que elevam o potencial de erosão.

Atente-se que as conseqüências destas ações são refletidas no reservatório do Rio Descoberto, ameaçando a quantidade e a qualidade d'água fornecida ao DF pela Caesb (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal).

Este reservatório possuía, em 1974, uma área superficial (espelho d'água) de 14,8 km<sup>2</sup> e em 2002, uma área de 12,55 km<sup>2</sup> em nível normal de funcionamento (cota 1030 da crista do vertedouro)

(Caesb, 2003). Atualmente é captada uma vazão de cerca de 3,50 m<sup>3</sup>/s, contra a previsão de vazão captável em torno de 5,00 m<sup>3</sup>/s (Caesb, 2003).



Figura 4 - Benfeitorias junto ao bosque de eucaliptos e solo preparado para plantação próximo ao reservatório do Rio Descoberto, no PICAG-DF.

Foto: Milton da Costa Araújo Filho (2003).



Figura 5 - Assoreamento do reservatório do Rio Descoberto e retrabalhamento do sedimento.

Foto: Caesb (2003).



Figura 6 - Núcleo Urbano INCRA 8.

Fonte: Seduh (2005).

## MÉTODOS

A pesquisa proposta seguirá o esquema apresentado na figura 7, consistindo nas etapas de levantar dados existentes, alimentar a base de dados, aperfeiçoar modelos existentes e simular cenários utilizando SIG (Sistema de Informação Geográfica). Etapas da pesquisa:

- reunir, organizar e interpretar os dados levantados;
- gerar o modelo digital do terreno;
- aplicar a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS);
- calcular o aporte de sedimentos do reservatório;
- avaliar o nível de assoreamento do reservatório do Rio Descoberto entre 1969 (levantamento para construção da barragem) e 2002 (último levantamento topobatimétrico do reservatório);
- aperfeiçoar modelos dinâmicos que considerem alterações físicas e/ou espaciais de uma região pelo uso e ocupação do solo;
- aperfeiçoar modelos hidrológicos de cálculo de saturação de solos e evapotranspiração;

- aperfeiçoar modelos de simulação de erosão/deposição de sedimentos;
- gerar uma ferramenta de modelagem multitemporal incorporada a SIG, que integrará os diferentes modelos aperfeiçoados;
- produzir mapas temáticos, tais como: de erosão atual e potencial do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto; de assoreamento do reservatório e tendência de expansão urbana na região;
- simular situações críticas de uso e ocupação da Bacia do Descoberto a partir de diferentes interesses na região, a fim de prever cenários futuros;
- avaliar as causas e os danos de impactos ambientais na bacia e no reservatório do Rio Descoberto, tendo por base as simulações de cenários e os mapas temáticos produzidos;
- validar os resultados de áreas suscetíveis a erosão/deposição de sedimentos detectadas pela modelagem proposta, com saídas de campo na época de seca e de chuvas no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto.

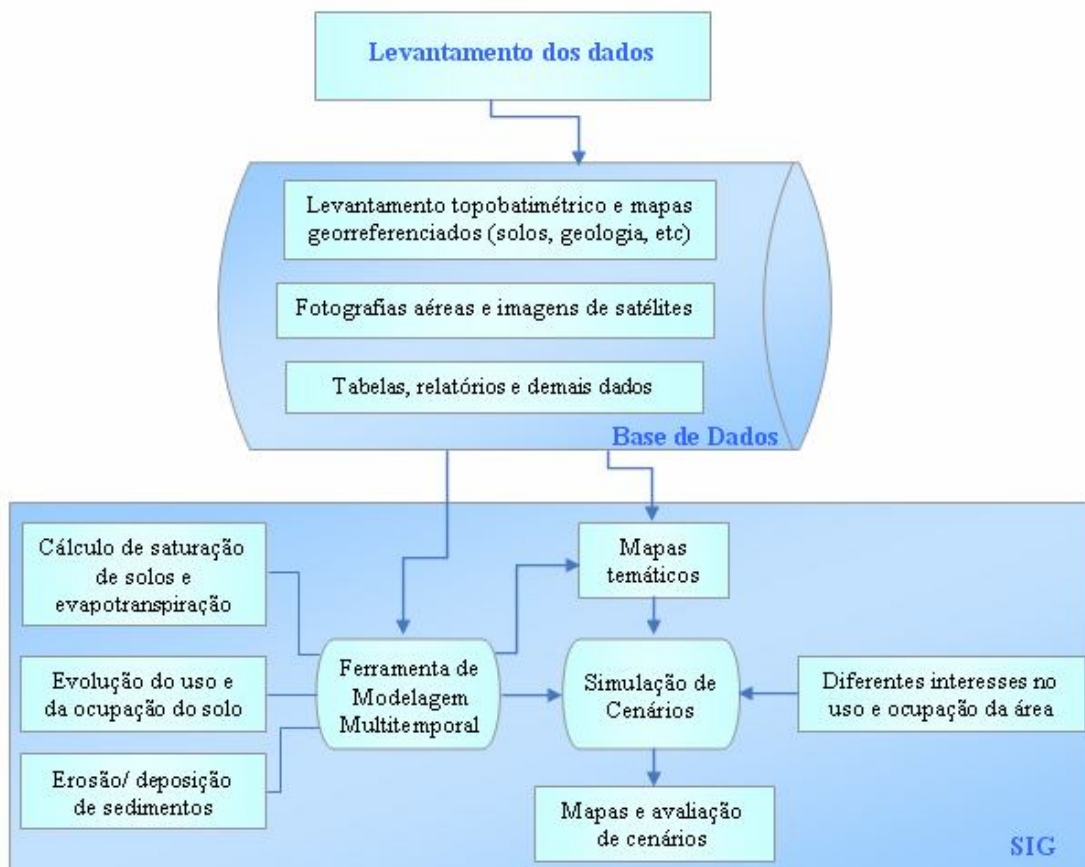


Figura 7 - Esquema com a seqüência de métodos propostos.

## DISCUSSÃO

Uma das relevâncias desta proposta está no esforço em obter, organizar e integrar o grande número de trabalhos realizados por diversos órgãos e por universidades na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto em diferentes áreas do conhecimento.

Outro fator importante da proposta está na multidisciplinariedade, que se justifica pela necessidade de se estabelecer a integração dos fatores, vez que a análise isolada de um único fator, normalmente explica pouco da complexidade temática da pesquisa.

A avaliação integrada dos diversos elementos influentes e, principalmente, as relações que eles possuem entre si, fornecerão subsídios para a compreensão do processo de impactos ambientais, além de servir de base para as futuras simulações de cenários.

Cabe salientar que a maior contribuição desta pesquisa está na ferramenta que será implementada, a qual elaborará cenários prováveis de ocorrer com base nas tendências de ocupação territorial e nas alterações físicas e espaciais de uma determinada área.

Por fim, outro aspecto relevante a se destacar é o fato que os testes serão realizados em uma bacia que tem vivenciado expansão desordenada, com expressivos impactos ambientais. Neste sentido, a ferramenta que será gerada poderá ser útil aos estudos e as decisões do PDOT/DF relativos à ocupação da área Oeste do Distrito Federal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Caesb. 1969. *Estudos Hidrológicos*. Geotécnica S.A. – Engenheiros e Consultores, Rio de Janeiro, 119 pp.
- Caesb. 2003. *Estudos de Concepção e de Viabilidade Técnica e Econômica para Elevação da Crista do Vertedouro da Barragem do Rio Descoberto*. Porto Alegre, Magna Engenharia Ltda, Levantamentos Topobatimétricos, 2, 164 p.
- Codeplan. 1984. *Atlas do Distrito Federal*. Secretaria do Governo/Secretaria da Educação e Cultura/Codeplan, Brasília, 78 pp.
- CPRM/Embrapa. 2003. *Zoneamento ecológico-econômico da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno: fase I*. CPRM - Serviço Geológico do Brasil; Embrapa; MI/SCO, Rio de Janeiro.
- Dutra, M. 2003. *Caracterização do meio físico da região de Águas Lindas–GO: subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 96 p.
- Eiten, G. 1994. Vegetação. In: Novaes-Pinto, M. (org.) *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. Editora da Universidade de Brasília, Brasília, pp.: 17-74.
- Freitas-Silva, F.H. & Campos, J.E.G. 1998. Geologia do Distrito Federal. In: IEMA/SEMATEC/UnB. *Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal*. Relatório Técnico, 1, Brasília, pp.: 1-87.
- Fuck, R.A., Jardim de Sá, E.F., Pimentel, M.M., Dardene, M.A., Pedrosa Soares, A.C. 1993. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese dos conhecimentos. In: Dominguez, J.M.L. & MISI, A. (eds). *O Cráton do São Francisco*. Salvador, SBG: SGM: CNPq, pp.: 161-185.
- GDF/SEMATEC/IEMA. 1994. *Rezoneamento ambiental da Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio Descoberto*. Produto 3.
- Martins, E.S. & Baptista, G.M.M. 1998. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In: IEMA/UnB. *Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal*. Relatório Técnico, 1, Brasília, pp.: 89-134.
- Reatto, A., Martins, E.S., Cardoso, E.A., Carvalho Jr., O.A., Guimarães, R., Silva, A.V., Farias, M.F.R. 2003 a. *Levantamento de reconhecimento de solos de alta intensidade do Alto Curso do Rio Descoberto, DF/GO, escala 1:100.000*. Planaltina-DF, Embrapa-Cerrados, Boletim Técnico 111, 28 p.
- Reatto, A., Martins, E.S., Cardoso, E.A., Spera, S.T., Carvalho Jr., O.A., Guimarães, R., Farias, M.F.R., Silva, A.V. 2003 b. *Relação entre as classes de solos e as principais fitofisionomias do Alto Curso do Rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás*. Planaltina-DF, Embrapa-Cerrados, Boletim Técnico 92, 55 p.
- Seduh. 2004. *Modelo de gestão estratégica do Território do Distrito Federal*. Governo do Distrito Federal/Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação do DF, Brasília, 140 pp.
- Seduh. 2005. *Avaliação do atual PDOT – Lei Complementar nº 17, de 28 de janeiro de 1997*. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação, Brasília.