



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências

Modelagem Dinâmica de Perdas de Solo: o
Caso do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do
Rio Descoberto-DF/GO

Tese de Doutorado

Nº 86

Elenjuce Ferreira Dias Valentin

Brasília – DF

Março de 2008



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências

Modelagem Dinâmica de Perdas de Solo: o Caso do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto-DF/GO

Elenjuce Ferreira Dias Valentin

Tese de doutorado apresentada junto ao curso
de Pós-Graduação em Geologia – Área de
Concentração Processamento de Dados em
Geologia e Análise Ambiental – para
obtenção do título de Doutora em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Detlef Hans-Gert Walde

Brasília – DF

Março de 2008



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências

Modelagem Dinâmica de Perdas de Solo: o Caso do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto-DF/GO

Elenjuce Ferreira Dias Valentin

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Detlef Hans-Gert Walde (Orientador) – UnB

Prof. Dr. Éder de Souza Martins – Cpac-Embrapa

Prof. Dr. Gustavo Macedo de Mello Baptista – UCB

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig – UnB

Prof. Dr. José Elói Guimarães Campos – UnB

"O difícil leva um tempinho;
o impossível é o que leva um pouquinho mais."
Fridtjof Nansen

Aos meus pais e
ao meu marido,
dedico.

Agradecimentos

Uma tese é resultado do esforço de um grupo de pessoas que auxiliam, direta ou indiretamente, fazendo sugestões, indicando caminhos, apontando erros ou simplesmente torcendo pelo êxito do trabalho. Ao final da tese, há um receio de não se lembrar de agradecer alguém que tenha colaborado. Portanto, previamente, meus mais sinceros e profundos agradecimentos a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão desta tese.

Algumas pessoas merecem ser lembradas de forma especial. A estas pessoas dedico as linhas a seguir, sem a preocupação com uma ordem específica. Minha gratidão em especial:

A Deus por ter me concedido perseverança durante o programa de doutorado, não permitindo que eu desistisse deste projeto de vida, mesmo diante das inúmeras adversidades que surgiram ao longo do caminho e pela graça de conceder-me uma gravidez, que marcará o final do doutorado e o início de uma nova fase de vida.

Ao meu marido, José Roberto Valentin, pelo imensurável apoio, pela tolerância e por compreender a importância da conclusão desta tese para mim. Acima de tudo meu profundo agradecimento pelo seu amor, afinal não é uma tarefa simples suportar uma pessoa falando sobre o mesmo assunto durante longos quatro anos. Também o agradeço pela leitura atenta e observações gramaticais ao texto da tese.

À minha mãe, Sirléi Pereira Dias, pelo seu amor, pelo constante apoio sem restrições aos meus projetos de vida e pelas orações dedicadas ao êxito desta tese. Ao meu afilhado Breno Henrique, por apesar de não entender, suportar a ausência da madrinha durante o doutorado.

Ao Prof. Dr. Detlef Hans-Gert Walde, pela orientação, revisão e sugestões em todas as etapas desta pesquisa, e principalmente pela paciência e por acreditar não só em meu potencial, como também em meu compromisso em desenvolver e concluir esta tese, apesar de minha graduação e mestrado em Ciência da Computação.

Ao Prof. Dr. Henrique Llacer Roig, pelo auxílio em todas as fases da pesquisa. Agradeço-o pelas valiosas dicas ainda na época de doutorando e depois já como professor da UnB, pela paciência, apoio e orientação. “Henrique, você é um excelente profissional!”

À Caesb, na pessoa do geógrafo Milton da Costa Araújo Filho, pela presteza com que me auxiliou na obtenção de inúmeros dados e por planejar e nos acompanhar em uma das saídas de campo na área de estudos.

Ao Centro de Sensoriamento Remoto da UFMG, na pessoa do analista de sistemas Hermann de Oliveira Rodrigues, pela colaboração, pela paciência em esclarecer minhas incontáveis dúvidas e, principalmente, pelas valiosas aulas virtuais sobre modelagem dinâmica. “Hermann, sem a sua ajuda seria impossível concluir a segunda etapa desta pesquisa!”

Ao Prof. Dr. José Wilson Correia Rosa, pela co-orientação e pelos dados fornecidos na primeira etapa da pesquisa. Aos professores membros da banca do meu exame de qualificação (Prof. Dr. José Elói Guimarães Campos, Prof. Dr. Marco Ianniruberto, Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses e Prof. Dr. Éder de Souza Martins) pelas valiosas observações e contribuições para a conclusão deste trabalho.

À geóloga Adriana Chatack Carmelo, pela amizade, apoio e auxílio.

Aos colegas do Instituto de Geociências, especialmente ao Renato Apolinário, à Verônica dos Santos, ao Ricardo Cosme, à Tati Almeida e à Laiza Leal, pelos conhecimentos compartilhados.

Ao corpo docente e aos funcionários do Instituto de Geociências que de uma forma ou de outra contribuíram para realização deste trabalho, especialmente: Serjão e Francisca.

Ao Prof. Dr. Hermann Kux e à Maria Helena Gonzaga pelas ajudas prestadas na reta final desta tese, respectivamente com a tradução do resumo e com a revisão das referências bibliográficas.

Por fim, mas sem diminuir a importância, à Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão de bolsa de pesquisa, possibilitando minha dedicação exclusiva durante a maior parte do programa de doutorado, e à Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, por conceder-me a oportunidade de aperfeiçoamento técnico-científico.

Resumo

Este trabalho propõe-se a contribuir com uma estimativa multitemporal 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, empregando modelagem dinâmica. Além disso, os resultados desta pesquisa têm o intuito de colaborar com o planejamento ordenado de uma área em expansão para prognósticos de curto e médio prazos, por meio da simulação de cenários. Neste sentido, optou-se pela base de dados correspondente ao Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto para aplicação dos métodos propostos.

No Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto, área limítrofe entre o Distrito Federal e o Estado de Goiás, assim como na 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, observa-se impactos ambientais relacionados à erosão hídrica e ao transporte de sedimentos. Esse cenário tem provocado assoreamento e acentuada perda da qualidade e da quantidade de água disponível no 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).

A primeira etapa deste trabalho foi dedicada à proposta de um fator topográfico alternativo (fator LS modificado) para a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) baseado na teoria da direção e da acumulação de fluxo em uma bacia hidrográfica, a fim de descrever processos de erosão associados ao fluxo laminar sobre declives. O fator LS modificado permitiu estimar com maior representatividade este parâmetro na EUPS e identificar as áreas mais susceptíveis à erosão, adotando o método D_{∞} (infinitas direções de fluxo possíveis) na determinação de direção de fluxo d'água e de sedimentos na bacia.

Na segunda etapa da pesquisa dedicou-se à modelagem dinâmica de mudanças no uso e ocupação do solo de uma das sub-bacias do Rio Descoberto, a sub-bacia do Ribeirão Rodeador. O modelo dinâmico baseou-se nas tendências históricas de transição do uso e ocupação da sub-bacia, bem como nas variáveis estáticas disponíveis que poderiam servir de pesos de evidência para justificar o fenômeno analisado. As tendências foram avaliadas a partir de 1984 e em seguida passou-se à simulação de cenários tendenciais pessimistas e otimistas para os anos de 2003, 2008, 2013 e 2017. Os resultados da modelagem foram calibrados e validados não apenas pela simples percepção humana, mas também por medidas quantitativas do grau de similaridade entre a realidade observada e as simulações. Por fim, para geração de prognósticos de perdas de solo na sub-bacia do Rodeador aplicou-se aos mapas resultantes desta fase a EUPS com o fator LS modificado proposto na primeira etapa.

Os estudos aqui realizados e seus resultados demonstram que a modelagem dinâmica constitui uma potencial ferramenta para antecipar prováveis tendências passíveis de ocorrer numa bacia hidrográfica. Dessa forma, os resultados podem constituir um instrumento relevante para planejamento estratégico e para tomadores de decisão em nível governamental e não-governamental.

Palavras-chave: modelagem dinâmica, erosão laminar, fator topográfico, direção de fluxo, acumulação de fluxo, método D_{∞} , simulação de cenários.

Abstract

This study contributes with a multi-temporal estimation of soil losses by sheet erosion which represents the most probable path of water flow, sediments and its accumulation, using dynamic modeling. Besides that, the results of this study are a contribution to regional planning for medium and long term prognosis, in an area of population growth, simulating different scenarios. In this frame we chose the database from the upper course of the *Rio Descoberto* basin to apply the proposed methods.

At the upper section of the *Rio Descoberto* basin, bordering the Federal District and the State of Goiás, as well as at most Brazilian river basins with inappropriate land use and occupation, referring specially to those rural sections with multiple use and chaotic urban expansion areas, one observes environmental impacts related to water erosion and sediment transport. Such conditions caused both silting and an accentuated quality and quantity loss of water availability in the *Rio Descoberto* reservoir, which is responsible for the supply of 2/3 of water for the Federal District produced by CAESB, the Environmental Sanitation Company of the Federal District.

The first phase of this study was the proposition of an alternative topographic factor (the modified Length of Slope – LS – factor) for the Universal Soil Loss Equation (USLE), based on the theory of flow direction and accumulation in a river basin, in order to describe erosion processes associated to the sheet flow over slopes. The modified LS factor allowed a more precise estimation of this parameter at USLE as well as the identification of those sections most susceptible to erosion, using method D_{∞} (infinite possible flow directions), to determine the direction of the water flow and sediments within the basin.

The second phase of the work consisted of modeling the dynamics of changes from land use/occupation at one of the sub-basins from *Rio Descoberto*, the *Ribeirão Rodeador*. The dynamic model was based on the historical tendencies of land use/occupation within this sub-basin, as well as on the static variables available, that could be considered as evidence weights to justify the phenomenon analyzed. These tendencies were evaluated from 1984 on, followed by the simulation of pessimistic and optimistic tendency scenarios for the years 2003, 2008, 2013 and 2017. The results of modeling were calibrated and validated not only by simple human perception, but also by quantitative measurements of the similarity degree between the reality observed and the simulations. Finally, in order to generate a prognosis of soil losses within the *Rodeador* sub-basin, we applied the modified LS factor at USLE to the maps obtained during this phase.

These studies and the results obtained show that the dynamic modeling is a potential tool to anticipate probable tendencies to occur in a river basin. Therefore the results could be a relevant instrument for strategic planning and for stakeholders at governmental and non-governmental level.

Keywords: dynamic modeling, sheet erosion, topographic factor, flow direction, flow accumulation, method D_{∞} , scenario simulation.

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vi
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tabelas	xiv
CAPÍTULO 1 - Introdução.....	1
1.1 - Localização da Área de Estudos.....	3
1.2 - Objetivos	5
1.3 - Justificativas	5
1.4 - Estrutura da Tese	6
CAPÍTULO 2 - Área de Estudos	8
2.1 - Descrição Fisiográfica.....	8
2.1.1 - <i>Hidrografia</i>	8
2.1.2 - <i>Clima</i>	11
2.1.3 - <i>Vegetação</i>	14
2.1.4 - <i>Geologia</i>	17
2.1.5 - <i>Geomorfologia</i>	22
2.1.6 - <i>Solos</i>	26
2.2 - Caracterização Sócio-Econômica	31
2.2.1 - <i>Aspectos Demográficos e Sociais</i>	31
2.2.2 - <i>Aspectos Econômicos</i>	35
2.3 - Infra-Estrutura Básica	38
CAPÍTULO 3 - Impactos Ambientais no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto e Diretrizes do PDOT/2007 para Região.....	39
3.1 - Erosão, Transporte e Deposição de Sedimentos.....	39

3.2 - Impactos Ambientais no Alto Curso do Rio Descoberto.....	42
3.3 - Diretrizes do PDOT/2007 para o Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto.....	48
CAPÍTULO 4 - Trabalhos Anteriores.....	50
CAPÍTULO 5 - Materiais e Métodos.....	57
5.1 -Primeira Etapa.....	58
5.1.1 - Base de Dados.....	58
5.1.2 - Modelo Digital do Terreno.....	59
5.1.3 - Equação Universal de Perdas de Solo - EUPS.....	60
5.1.4 - Fator LS - Fator Topográfico.....	62
5.1.5 - Fator LS Modificado.....	64
5.1.6 - Métodos de Determinação de Direção de Fluxo: D8 e D∞.....	68
5.1.7 - Demais Parâmetros da EUPS.....	71
5.1.8 - Erosão Atual (A) e Potencial (Ap).....	76
5.2 -Segunda Etapa.....	78
5.2.1 - Ambiente de Modelagem Dinâmica.....	78
5.2.2 - Entrada de Dados.....	82
5.2.3 - Análise Multitemporal.....	83
5.2.4 - Modelagem Dinâmica de Perdas de Solo.....	83
5.2.5 - Calibração e Validação.....	92
5.2.6 - Prognósticos.....	95
CAPÍTULO 6 - Resultados e Discussão.....	96
6.1 -Aplicação da EUPS.....	96
6.1.1 - Modelo Digital do Terreno.....	96
6.1.2 - Fator LS Modificado.....	98
6.1.3 - Fator R.....	104
6.1.4 - Fator K.....	105

6.1.5 - Fator CP.....	106
6.1.6 - Erosão Atual (A) e Potencial (Ap).....	110
6.2 - Modelagem Dinâmica de Perdas de Solo	116
6.2.1 - Entrada de Dados.....	117
6.2.2 - Análise Multitemporal	117
6.2.3 - Modelagem, Calibração e Validação	122
6.2.4 - Prognósticos.....	127
CAPÍTULO 7 - Conclusões	137
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	139
ANEXOS: PUBLICAÇÕES	

Índice de Figuras

1.1 – Localização do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto – DF/GO.....	4
2.1 – Mapa Hidrográfico do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto, DF/GO	9
2.2 – Reservatório do Rio Descoberto	10
2.3 – Cartograma do Distrito Federal em milímetros	12
2.4 – Análise de frequência de precipitação pluviométrica média do Distrito Federal e da Bacia do Rio Descoberto entre 1980 e 2005	13
2.5 – Totais de precipitação pluviométrica na estação do Descoberto para o período de 1980 a 2005	13
2.6 – Gráfico com os respectivos percentuais das fitofisionomias que ocorrem no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto.....	14
2.7 – Mapa das Classes Fitofisionômicas do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás	15
2.8 – Mapa Geológico do Distrito Federal e Entorno modificado.....	19
2.9 – Coluna estratigráfica do Grupo Paranoá no Distrito Federal.....	20
2.10 – Compartimentação geomorfológica do Distrito Federal	24
2.11 – Mapa de distribuição de padrões de relevo do Distrito Federal.....	25
2.12 – Gráfico com os respectivos percentuais das classes de solos do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto.....	27
2.13 – Mapa de Solos do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás	28
2.14 – Evolução da ocupação no Distrito Federal e no Entorno.....	32
2.15 – Área correspondente ao Projeto Integrado de Colonização Alexandre Gusmão - PICAG	34
2.16 – Conflitos de ocupação na APA do Descoberto	35

2.17 – Extração de material ao longo de uma estrada no Alto do Descoberto	36
3.1 – Esquema Geral de Erosão	41
3.2 – Contorno do reservatório do Descoberto	43
3.3 – Contorno do reservatório do Descoberto	44
3.4 – Processo erosivo na sub-bacia do Córrego da Cachoeira	46
3.5 – Desequilíbrio no leito do Córrego da Cachoeira.....	46
3.6 – Impactos ambientais na sub-bacia do Córrego da Cachoeira	47
3.7 – Foz do Córrego da Cachoeira no reservatório do Rio Descoberto em período de seca e de chuvas.....	47
3.8 – Zona Rural de Uso Controlado III.....	49
5.1 – Seqüência de métodos propostos na pesquisa.....	57
5.2 – Aplicação da EUPS	61
5.3 – Geometria e declividade em encostas retilínea, convexa e côncava	63
5.4 – Esquema do fator LS modificado	65
5.5 – Diagrama de fluxo d’água em uma bacia parcial	68
5.6 – Métodos de determinação de direção de fluxo.....	69
5.7 – Variáveis para o cálculo da declividade em uma face simples	71
5.8 – Nomograma para estimar a erodibilidade (K).....	74
5.9 – Síntese da modelagem dinâmica de perdas de solo.....	78
5.10 – Autômato celular	81
5.11 – Diagrama de transição de autômatos celulares	82
6.1 – Exemplo de dados vetoriais utilizados na geração do MDT.....	97
6.2 – MDT do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto (TOPOGRID) e curvas de nível.....	97
6.3 – Seqüência de parâmetros utilizados no cálculo do fator LS modificado.....	99
6.4 – Acumulação de fluxo.....	100
6.5 – Distribuição do fator LS modificado pelo método D8	103

6.6 – Distribuição do fator LS modificado método D_{∞}	103
6.7 – Distribuição do fator R.	105
6.8 – Distribuição do fator K.....	107
6.9 – Distribuição do fator CP e classes de uso e ocupação do solo em 2003	109
6.10 – Distribuição do fator CP e classes de uso e ocupação do solo em 1994	109
6.11 – Distribuição do fator CP e classes de uso e ocupação do solo em 1984	110
6.12 – Distribuição da estimativa de perdas de solo pelo método D8 para 2003	112
6.13 – Distribuição da estimativa de perdas de solo pelo método D_{∞} para 2003	112
6.14 – Distribuição do potencial de perdas de solo pelo método D8.....	113
6.15 – Distribuição do potencial de perdas de solo pelo método D_{∞}	113
6.16 – Distribuição da estimativa de perdas de solo pelo método D_{∞} para 1984	114
6.17 – Distribuição da estimativa de perdas de solo pelo método D_{∞} para 1994	114
6.18 – Localização da sub-bacia do Ribeirão Rodeador e classes de uso e ocupação do solo na sub-bacia em 2003	118
6.19 – Classes de uso e ocupação do solo na sub-bacia do Ribeirão Rodeador.....	119
6.20 – Mapas estáticos da sub-bacia do Ribeirão Rodeador. (a) Hidrografia. (b) Área Protegida (Flona).....	120
6.21 – Mapas estáticos da sub-bacia do Ribeirão Rodeador. (a) Altitude. (b) Classes de texturas agregadas.....	121
6.22 – Mapas dinâmicos de estimativa de perdas de solo da sub-bacia do Rodeador. (a)1984. (b)1994.....	131
6.23 – Mapas dinâmicos de estimativa de perdas de solo da sub-bacia do Rodeador. (a) 2003. (b) Simulação para 2003	132
6.24 – Simulação do uso do solo da sub-bacia do Rodeador para 2008 e validação visual com imagem do Google Earth em 06/02/2008	133

6.25 – Mapas dinâmicos de simulação da estimativa de perdas de solo da sub-bacia do Rodeador. (a) 2008. (b) 2013	134
6.26 – Mapas dinâmicos de simulação da estimativa de perdas de solo da sub-bacia do Rodeador. (a) 2017. (b) 2017 otimista	135
6.27 – Mapas dinâmicos de estimativa de perdas de solo da sub-bacia do Rodeador. (a) Simulação 2017 pessimista. (b) Erosão Potencial.....	136

Índice de Tabelas

2.1 – Disponibilidade e demanda hídrica no Distrito Federal e entorno imediato	9
2.2 – Totais médios mensais de precipitação pluviométrica em milímetros, da estação Descoberto, de responsabilidade da Caesb, para o período de 1980 a 2005	14
2.3 – Ocorrências de recursos naturais na Bacia do Rio Descoberto.....	37
2.4 – Cobertura da rede de água, rede de esgoto e coleta de lixo nos domicílios particulares permanentes do município de Águas Lindas de Goiás e RA-Brazlândia em 2000.....	38
5.1 – Fator P em função das práticas adotadas	75
5.2 – Integração de CP em função das classes de uso e ocupação do solo	77
5.3 – Valores de perdas de solo para o parâmetro potencial de erosão.....	78
5.4 – Classes de interpretação para o parâmetro estimativa de perda de solo.....	78
6.1 – Tabulação cruzada entre o número de células de acumulação de fluxo calculado pelo método D8 e pelo D_{∞}	98
6.2 – Tabulação cruzada entre o número de células para o fator LS calculado pelo método D8 e pelo D_{∞}	101
6.3 – Fator topográfico (Fator LS) pelo método D8	101
6.4 – Fator topográfico (Fator LS) pelo método D_{∞}	102
6.5 – Erosividade das chuvas (Fator R).....	104
6.6 – Erodibilidade dos Solos (Fator K).....	106
6.7 – Uso, manejo e práticas conservacionistas (Fator CP)	107
6.8 – Média anual de perdas de solo (A): método D8 versus D_{∞}	111
6.9 – Potencial médio de perdas de solo (A_p): método D8 versus D_{∞}	115
6.10 – Modelo conceitual com as possíveis transições de uso do solo observadas na sub-bacia do Rodeador no período de 1984-2003	122

6.11 – Transições observadas na sub-bacia de 1984 para 1994 em hectares	123
6.12 – Transições observadas na sub-bacia de 1984 para 1994 em percentuais	123
6.13 – Transições observadas na sub-bacia de 1994 para 2003 em hectares	123
6.14 – Transições observadas na sub-bacia de 1994 para 2003 em percentuais	123
6.15 – Matriz de transição anual de 1994 para 2003.....	124
6.16 – Correlação espacial entre as variáveis selecionadas como pesos de evidência	125
6.17 – Pesos de evidência na transição da classe Vegetação/Regeneração para a classe Área Rural de Uso Diversificado	126
6.18 – Pesos de evidência na transição da classe Área Rural de Uso Diversificado para a classe Vegetação/Regeneração	126
6.19 – Parâmetros estabelecidos nas três melhores simulações.....	127
6.20 – Comparação entre os resultados dos prognósticos de perdas de solo	129

Capítulo 1

Introdução

O Distrito Federal (DF), como é de conhecimento geral, 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 médio e grande porte do país (Seduma, 2004). Tais problemas vinculam-se à singular expansão demográfica da capital e da região do entorno em locais sem critérios definidos para a ocupação do solo e infraestrutura precária, com conseqüentes prejuízos às áreas ambientais sensíveis.

Por essa razão, as questões ambientais estão no centro das discussões sobre a ocupação do DF. Esse fato torna-se evidente quando se observa que cerca de 93% de todo o território do DF está protegido na forma de diversas categorias de unidades de conservação e enfrenta algum tipo de restrição à sua ocupação. A ampliação do percentual de áreas protegidas, que anteriormente era de apenas 45% para a percentagem atual, deve-se à criação, em 2001, por meio de Decreto Presidencial, da Área de Proteção do Planalto Central, cuja delimitação compreende terras do Estado de Goiás e do Distrito Federal (Seduma, 2007b).

Em face dessa condição especial de proteção a que se encontra submetida a maior parte do DF, a gestão territorial assume característica peculiar pela forte interação com a gestão ambiental. Assim, há que se interpretar as diretrizes de ocupação territorial expressas no Plano Diretor em conjunto com as restrições de ocupação em função das unidades de conservação. O quadro se torna mais complexo pelo fato de que a criação e gestão de unidades de conservação, ao contrário do que ocorre com os planos diretores urbanos, são de competência concorrente entre União, Estados e Municípios (Seduma, 2007b).

Apesar das restrições à ocupação que a maior parte das bacias hidrográficas do Distrito Federal se submetem, ações antrópicas nestas bacias têm provocado sensíveis reduções nos níveis de água dos principais reservatórios e pontos de captação que abastecem a região. Dessa forma, levando-se em conta os impactos ambientais ligados aos recursos hídricos, a escassez de fontes de abastecimento capazes de responder à demanda crescente para o atendimento no médio e no longo prazo é um dos pontos mais críticos sobre o adensamento populacional do DF e do entorno.

O sistema de água do Distrito Federal é constituído por 5 sistemas produtores: Descoberto, Santa Maria/Torto, São Sebastião, Brazlândia e Sobradinho/Planaltina (Seduma, 2007b). O Sistema Descoberto abastece atualmente cerca de 65% da população urbana do Distrito Federal em áreas regularizadas, sendo composto pelas captações da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb) na barragem do Rio Descoberto (maior manancial utilizado para o abastecimento do DF, correspondendo a 96% da produção do sistema Descoberto) e em outros 7 mananciais.

As captações do Sistema Descoberto estão localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto. Assim como a maioria das bacias hidrográficas brasileiras em situação de uso e ocupação do solo sem planejamento e com infra-estrutura urbana muito precária, principalmente das áreas rurais de uso múltiplo e das áreas urbanas em expansão desordenada, na bacia do Rio Descoberto tem sido observados impactos ambientais relacionados à erosão hídrica e ao transporte de sedimentos. Esses impactos ambientais têm reflexo direto no reservatório do Rio Descoberto, provocando assoreamento e redução acentuada da qualidade e da quantidade de água, em especial, como efeito das grandes pressões oriundas das atividades agrícolas no PICAG (Projeto Integrado de Colonização Alexandre Gusmão) localizado na Região Administrativa de Brazlândia (DF) e da expansão urbana no município goiano de Águas Lindas (GO), localizado em área limítrofe ao DF e distante 47 km de Brasília.

Em função dessa problemática, o Distrito Federal como um todo, bem como a Bacia do Rio Descoberto têm sido objeto de vários estudos no campo das ciências do meio ambiente. Com isso, tem sido gerado um rico acervo de informações que tem contribuído para a formulação de políticas urbanas buscando o ordenamento territorial.

Via de regra, o ordenamento territorial é realizado por meio de planos e normas legais que regulam o uso e a ocupação do solo. Podem ser realizados, ainda, por processos mais dinâmicos de gestão estratégica do território, de forma contínua e permanente (Seduma, 2004), por exemplo, auxiliado por modelos matemáticos.

Neste contexto, segundo Câmara & Monteiro (2003), o emprego de modelos matemáticos em estudos ambientais gera importantes contribuições científicas ao planejamento ordenado de uma área, vez que ajudam a entender o impacto das mudanças no uso e cobertura da terra e a prever alterações futuras nos ecossistemas.

Em termos conceituais, um modelo pode ser entendido como uma abstração ou simplificação do mundo real e os modelos dinâmicos são abstrações capazes de representar adequadamente fenômenos ambientais dinâmicos. A modelagem dinâmica espacial, por sua vez, é usada, entre outras finalidades, para o entendimento das alterações do uso e cobertura da terra (Gonçalves *et al.*, 2007), possibilitando, ainda, a realização de simulações de mudanças de uso do solo como potencial ferramenta para antecipar prováveis tendências passíveis de ocorrer numa região. De acordo com Soares-Filho *et al.* (2004b), modelos espaciais de simulação, que realisticamente reproduzem padrões espaciais de mudanças, são hoje requisito para o entendimento e avaliação de complexas questões ambientais em escalas local, regional e global.

Esta tese de Doutorado se insere na temática de modelagem dinâmica, buscando contribuir com uma estimativa multitemporal 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. Ademais, a pesquisa foi proposta com o intuito de colaborar com o planejamento ordenado de uma área em expansão.

Nesse sentido, este trabalho apresenta um estudo de caso, utilizando esse tipo de modelagem, em base de dados correspondente ao Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto – Distrito Federal/Estado de Goiás. Na estimativa de perdas de solo será aplicada a EUPS (Equação Universal de Perdas de Solo) com uma proposta que modifica o cálculo original do fator topográfico. Já nas simulações de mudanças de uso e ocupação do solo na bacia do Rio Descoberto para elaboração de mapas de tendências de perdas de solo na região, será adotado o Dinamica EGO (*Environment for Geoprocessing Object*) na versão 1.0.6 concebido e mantido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (CSR-UFMG) (Rodrigues *et al.*, 2007).

1.1 - Localização da Área de Estudos

O local selecionado para aplicação dos métodos propostos neste estudo foi o Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto (Figura 1.1), pertencente à Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás (APA do Descoberto).

A APA do Descoberto foi criada pelo Decreto Federal Nº 88.940, de 7 de novembro de 1983, abrangendo área de 39.100 ha, com finalidade de assegurar condições ecológicas satisfatórias aos mananciais (Brasil, 1983 *in* Reatto *et al.*, 2003b). 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 (Figura 1.1).

O Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto 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 437 km² (43.700 ha), pertencente à Bacia do Rio Paraná (Reatto *et al.*, 2003b).

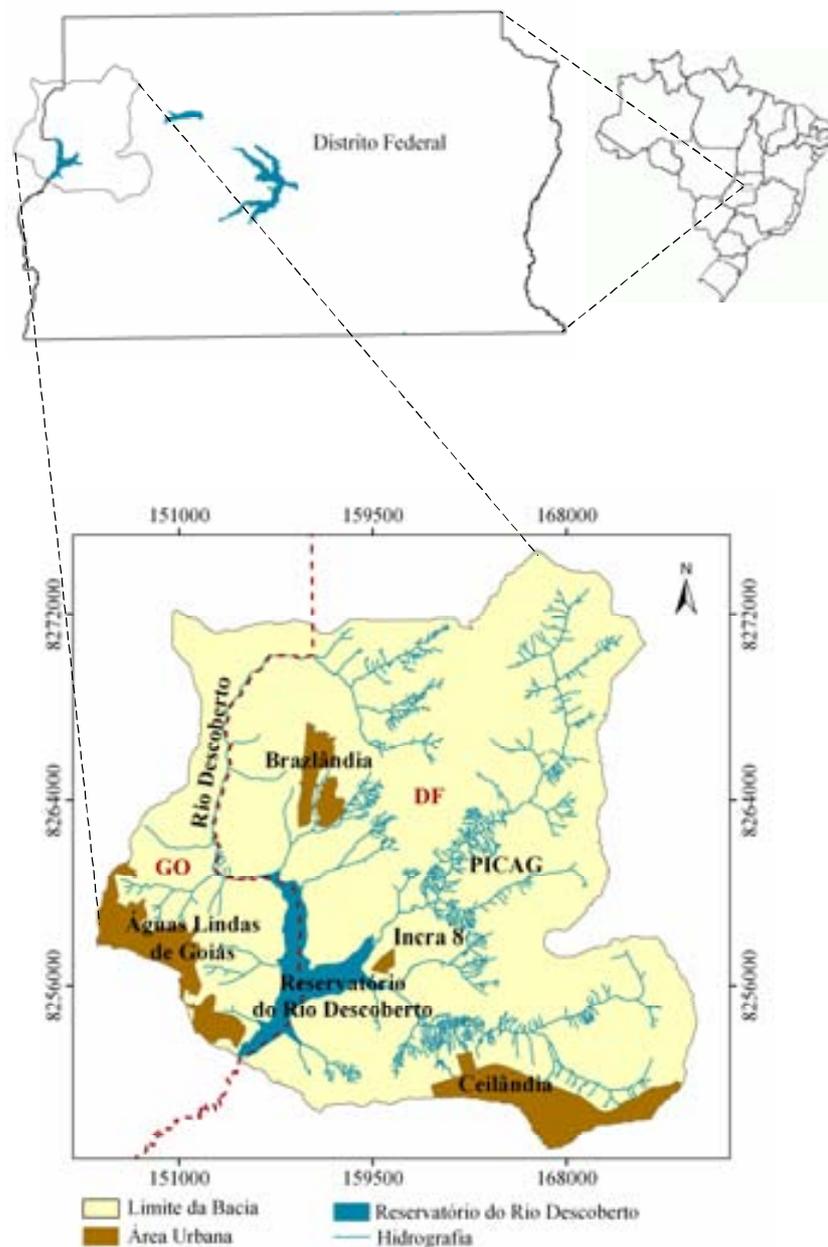


Figura 1.1 – Localização do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto – DF/GO.

1.2 - Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é contribuir com uma estimativa multitemporal 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, empregando modelagem dinâmica.

Este trabalho também foi proposto com o intuito de gerar prognósticos de curto e médio prazos, por meio da simulação de cenários. Espera-se que os resultados obtidos com as simulações colaborem com o planejamento ordenado de uma área em expansão, fornecendo instrumentos relevantes à elaboração de planejamentos estratégicos e a tomadores de decisão (*stakeholders*), em nível governamental e não-governamental.

Enumeram-se, ainda, como objetivos específicos:

- Reunir, organizar, integrar, avaliar e interpretar a grande quantidade de dados existentes sobre a região do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto, os quais se encontram dispersos ou que ainda não foram organizados ou sistematizados;
- Simular cenários tendenciais e hipotéticos otimistas e pessimistas de erosão de sedimentos no Alto Curso do Rio Descoberto por intermédio do modelo dinâmico de perdas de solo;
- Gerar mapas temáticos do Alto Curso do Rio Descoberto, em especial: mapa de erosão atual e mapa de potencial de erosão;
- Calibrar e validar o modelo dinâmico para uma das sub-bacias do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto;
- Gerar mapas de tendências de erosão em uma sub-bacia da área de estudos, a partir das simulações resultantes do modelo dinâmico de perdas de solo.

1.3 - Justificativas

Um dos pontos relevantes deste trabalho está no esforço em obter, organizar e integrar o grande número de trabalhos realizados em diferentes áreas do conhecimento por diversos órgãos públicos e por universidades na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto. Dentre os importantes trabalhos, destacam-se os realizados pela Caesb (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal), pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais

Renováveis), por pesquisas na Universidade de Brasília em áreas como geociências, geografia, geotecnia, recursos hídricos, engenharia florestal, agronomia, biologia; e pela engenharia ambiental da Universidade Católica de Brasília.

A multidisciplinariedade deste trabalho justifica-se pela necessidade de se estabelecer a integração dos fatores, uma vez que a análise isolada de um único fator, em regra, explica pouco ante a complexidade temática da pesquisa. A avaliação integrada dos diversos elementos correlatos e, em especial, as relações que eles possuem entre si, fornecem não só subsídios para a compreensão dos processos erosivos, como também servem de base para simulações de cenários.

Destacam-se como as maiores contribuições desta pesquisa: a proposta de um método para o cálculo do fator topográfico (fator LS modificado) da EUPS (Equação Universal de Perdas de Solo) com base numa metodologia que represente de forma mais real o caminho seguido pelo fluxo d'água e de sedimentos e sua acumulação; a proposta de um modelo dinâmico de estimativas de perdas de solo seguindo a tendência de modelos dinâmicos independentes, ou seja, não acoplados a SIG (Sistema de Informações Geográficas); e o aperfeiçoamento do modelo proposto com calibração e validação utilizando base de dados referentes a uma bacia hidrográfica que se encontra no bioma cerrado.

Por fim, outro aspecto relevante a se destacar é o fato de que os testes serão realizados em uma bacia hidrográfica complexa que tem apresentado expansão desordenada, com expressivos impactos ambientais e com relevante importância no abastecimento de água do DF. Neste sentido, a modelagem será útil aos estudos e às decisões que se referem à ocupação do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto.

1.4 - Estrutura da Tese

O capítulo 1 apresenta a contextualização introdutória dos tópicos da tese, a localização da área de estudos e a exposição dos objetivos e das justificativas. O Capítulo 2 aborda a descrição da área de estudos. Esta descrição engloba aspectos do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto, tais como: hidrografia, clima, vegetação, geologia, geomorfologia, solos, características sócio-econômicas e infra-estrutura básica (cobertura da rede de água, rede de esgoto e coleta de lixo).

O Capítulo 3 apresenta os impactos ambientais no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto correlacionados com perdas de solo na bacia, bem como as diretrizes do PDOT/2007 para a região.

O Capítulo 4 destina-se a apresentar uma revisão bibliográfica de trabalhos relevantes realizados sobre o Distrito Federal e sobre a Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto. Nesse capítulo, também são apresentados trabalhos realizados em outras localidades do Brasil, focando assuntos correlatos aos materiais e aos métodos empregados nesta pesquisa.

Aspectos de materiais e métodos são abordados no Capítulo 5, o qual foi organizado em duas etapas. A primeira etapa, em síntese, trata da base de dados, da geração do modelo digital do terreno, de um método proposto para o cálculo do fator topográfico (fator LS) na EUPS, de uma proposta de avaliação da influência de dois métodos de cálculo da direção e da acumulação de fluxo na estimativa do fator LS na EUPS e do esquema de aplicação da EUPS e da geração de mapas temáticos de erosão atual e potencial do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto. A segunda etapa, por sua vez, versa a respeito dos passos empregados na geração, calibração e validação do modelo dinâmico elaborado para simular e avaliar tendências de mudanças no uso e ocupação no solo no Alto da Bacia do Descoberto. Ao final do Capítulo 5 aborda-se o produto da modelagem dinâmica: a concepção de cenários otimistas e pessimistas para a geração de prognósticos de perdas de solo para a bacia.

No Capítulo 6, enfatiza-se a comparação, a avaliação e a discussão sobre os resultados obtidos nas duas etapas em que foi dividido este trabalho. Finalmente, no Capítulo 7, sintetiza-se e conclui-se os tópicos, os resultados e os questionamentos levantados nos capítulos precedentes.

Capítulo 2

Área de Estudos

2.1 - Descrição Fisiográfica

A seguir são descritos aspectos fisiográficos característicos do Distrito Federal e, de forma mais específica, do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto.

2.1.1 - Hidrografia

A grande maioria dos rios do Distrito Federal é perene e de planalto devido ao escoamento superficial durante todo o ano e pela existência de corredeiras e quedas d'água (Baptista, 1997). Como padrões de drenagem têm-se o retilíneo e o dendrítico. O retilíneo é controlado pelas falhas/fraturas de direção NW. O dendrítico, por sua vez, ocorre nas regiões mais dissecadas, em maior densidade e com elevada sinuosidade dos canais. De forma geral, os rios do DF são cobertos por Mata de Galeria e os rios maiores, pelas Matas Ciliares.

No DF estão as seguintes bacias hidrográficas: do Rio Preto, Rio Maranhão, Rio São Bartolomeu, a do Alagado/Ponte Alta, Ribeirão Samambaia (afluente do Rio São Marcos) e a do Rio Descoberto (Reatto *et al.*, 2003b). A Bacia do Rio Descoberto, que compreende área de 825 km², encontra-se na região de limite entre o Distrito Federal e os municípios goianos de Águas Lindas de Goiás e Santo Antônio do Descoberto (Reatto *et al.*, 2003b).

A área objeto desta pesquisa 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). A figura 2.1 apresenta a hidrografia da área de estudos, bem como os principais afluentes do reservatório.

De acordo com os valores da tabela 2.1, a disponibilidade hídrica da Bacia do Descoberto é de 11,2 m³/s para uma demanda de 5,21 m³/s, contra uma demanda prevista para 2025 da ordem de 6,33 m³/s. Estes valores podem ser comparados com a disponibilidade e a demanda hídrica de outras bacias hidrográficas do DF e do entorno na tabela 2.1.

O reservatório do Descoberto (Figura 2.2) é um lago artificial formado a partir do represamento das águas do seu principal contribuinte, o Rio Descoberto e dos demais tributários. O estudo da área para construção do reservatório teve início em 1969 (Caesb,

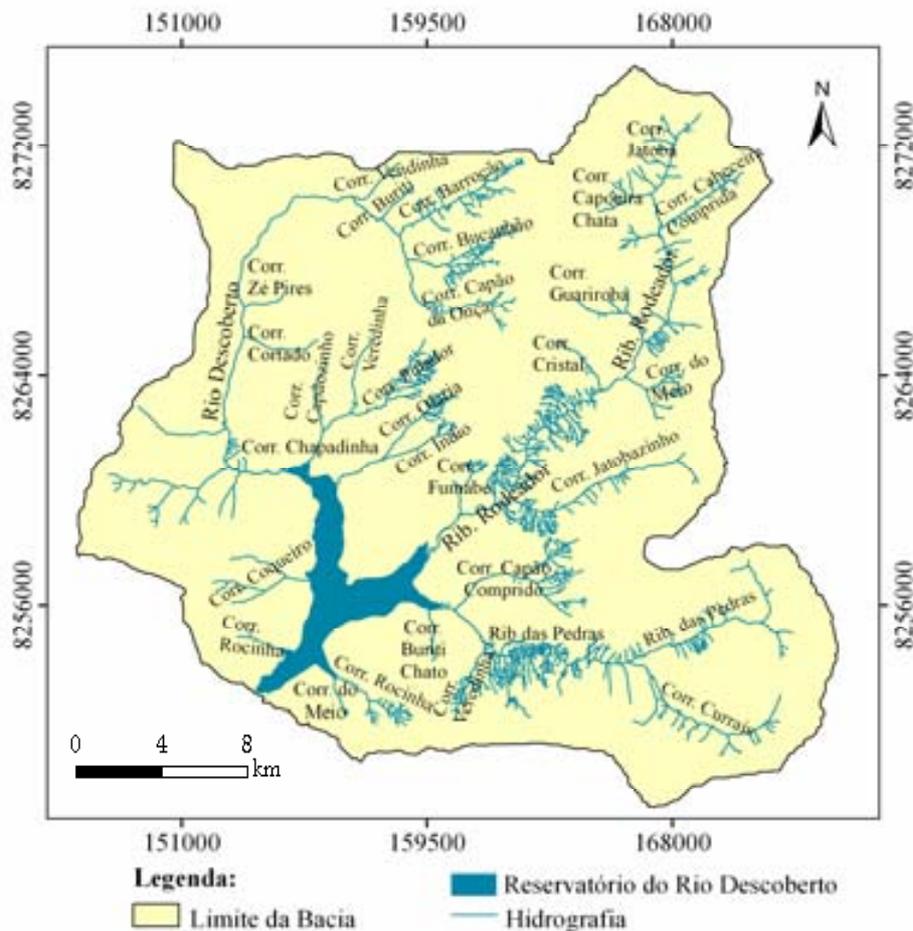


Figura 2.1 – Mapa Hidrográfico do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto, DF/GO.

Tabela 2.1 - Disponibilidade e demanda hídrica no Distrito Federal e entorno imediato.

Bacia Hidrográfica	Q regularizada (m ³ /s)	Q 7,10 natural na bacia dos reservatórios (m ³ /s)	Q 7,10 natural da bacia (m ³ /s)	Disponibilidade ² (m ³ /s)	Demanda (m ³ /s)	
					2004	2025
São Bartolomeu ¹	10,5	5,07	12,8	18,2	3,56	9,78
Paranoá	10,5	5,07	5,2	10,6	2,09	6,35
Descoberto	7,2	2,43	6,43	11,2	5,21	6,33
Corumbá	-	-	4,24	4,24	0,415	2,11
Preto	-	-	5,61	5,61	3,83	8,18
São Marcos	-	-	0,228	0,228	0,421	0,897
Maranhão	-	-	7,69	7,69	0,6	1,06
Total	17,7	7,5	37	47,2	14	28,4

¹ Os valores apresentados para a bacia do rio São Bartolomeu já incluem aqueles referentes à bacia do rio Paranoá;

² A disponibilidade foi calculada considerando-se a vazão Q 7,10. Nos casos de regularização substitui-se a vazão Q 7,10 a montante do reservatório pela vazão regularizada, somada à vazão Q 7,10 da bacia incremental.

Fonte: PGRH do Distrito Federal – 2006 in Seduma (2007b).

1969) e a barragem foi formada em 1974. Esse reservatório faz parte do Sistema Integrado Rio Descoberto, o qual abastece de maneira significativa a população do DF, alcançando cerca de 65% do total de água produzida pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb, 2003), e é composto pelas captações na barragem do Rio Descoberto (maior manancial utilizado para o abastecimento do DF, correspondendo a 96% da produção do sistema Descoberto).

Quanto à localização, o reservatório do Descoberto está situado na latitude 15°52'S e na longitude 48°10' W no limite ocidental do Distrito Federal com o Estado de Goiás. Este reservatório possuía, em 1974, uma área superficial (espelho d'água) de 14,8 km² e em 2002, uma área de 12,55 km² em nível normal de funcionamento (cota 1030 da crista do vertedouro) (Caesb, 2003).



Figura 2.2 – Reservatório do Rio Descoberto. Fonte: Seduma (2007b).

O Rio Descoberto, que é o principal tributário do reservatório, está situado na divisa entre o Distrito Federal e Goiás, e seu leito encontra-se quase totalmente no território do DF. Esse rio nasce aos 1.300 m de altitude, na região noroeste do DF, desenvolvendo-se inicialmente nos contrafortes da Chapada da Veredinha no Planalto Central e segue na direção

NW após a confluência de seus formadores: os córregos Capão da Onça e Bucanhão, que nascem na Chapada da Veredinha e na Chapada do Rodeador, respectivamente (Brito, 1999).

Em seguida, o Rio Descoberto recebe, pela margem direita, a contribuição do Córrego Barroco. Após cruzar a rodovia BR-070, segue na direção SW e recebe afluentes da região de Goiás. Posteriormente, ele corre em direção sul, entrando na região de influência do remanso provocado pelo barramento do reservatório do Descoberto. Em seu percurso na direção sul, recebe contribuição dos córregos Chapadinha, Bocaina e Dois Irmãos. Logo adiante, o rio encontra-se com seu principal afluente, o Rio Melchior, que possui no seu mesmo braço formador, o Córrego Taguatinga.

Vale lembrar que esses córregos e rios são tributários do Rio Corumbá, onde foi construída a Usina Hidrelétrica Corumbá IV, instalada no município de Luziânia/GO, no entorno do Distrito Federal, que no futuro terá aproveitamento múltiplo no fornecimento de água e de energia elétrica. O Plano Diretor de Água e Esgotos do Distrito Federal (PLD-2000), com horizonte de projeto até o ano de 2030, estuda e hierarquiza diversas alternativas para reforçar a demanda de abastecimento do DF. Dentre as alternativas contempladas está a implantação de Novo Sistema de Produção de Água Tratada a partir de futura captação no Lago da Corumbá IV, Braço Areias, com capacidade de 3.107 l/s (Seduma, 2007b).

2.1.2 - Clima

O Distrito Federal está incluído no Domínio Morfoclimático do Cerrado (Ab'Saber, 1963 *in* Reatto *et al.*, 2003b). De acordo com Codeplan (1984), o clima do Distrito Federal, na classificação de Köppen, é do tipo Tropical com chuvas concentradas no verão. Esta classificação foi realizada em função da variação da temperatura do ar e está relacionada apenas às variações altimétricas locais.

Segundo a classificação do Köppen, observam-se os seguintes tipos climáticos no DF: tropical (Aw) – temperatura do mês mais frio superior a 18°C. Situa-se, aproximadamente, nas áreas com cotas altimétricas abaixo de 1.000 m; tropical de altitude (Cwa) – temperatura do mês mais frio superior a 18°C, com média superior a 22°C no mês mais quente. Abrange aproximadamente, áreas com cotas altimétricas entre 1.000 a 1.200 m; e tropical de altitude (Cwb) – temperatura do mês mais frio inferior a 18°C. Correspondem às áreas com cotas altimétricas superiores a 1.200 m.

Apesar de clássica e de ter representado um avanço para a sua época, a classificação de Köppen, além de ser bastante descritiva, já não satisfaz o caráter explicativo

da climatologia moderna, podendo ser considerada ultrapassada (Steinke, 2003) por não considerar a dinâmica da atmosfera representada pela atuação das massas de ar. Sendo assim, devem ser adotadas classificações climáticas mais modernas e explicativas como a de Strahler & Strahler (1994), cujos elementos básicos são os deslocamentos das massas de ar e os sistemas produtores de tempo a elas associados.

Segundo Strahler & Strahler (1994), o clima do Distrito Federal é influenciado por massas tropicais, equatoriais e uma polar, o que determina as seguintes características climáticas: existência nítida de duas estações – um período chuvoso e quente correspondente aos meses de outubro a abril e um seco e frio que se estende de maio a setembro. Assim, Strahler & Strahler enquadram o DF no clima do tipo Tropical Alternadamente Úmido e Seco.

A média anual das precipitações no DF oscila entre 1200 e 1750 mm. A estação seca é bastante rigorosa, chegando a ocorrer ausência total de chuvas nesse período nos anos de seca extrema. Já a estação chuvosa apresenta maior pluviosidade no verão (dezembro a março) quando se concentram mais de 80% do total anual de chuvas (Codeplan, 1984). Na figura 2.3 encontra-se um mapa de isoietas do DF.

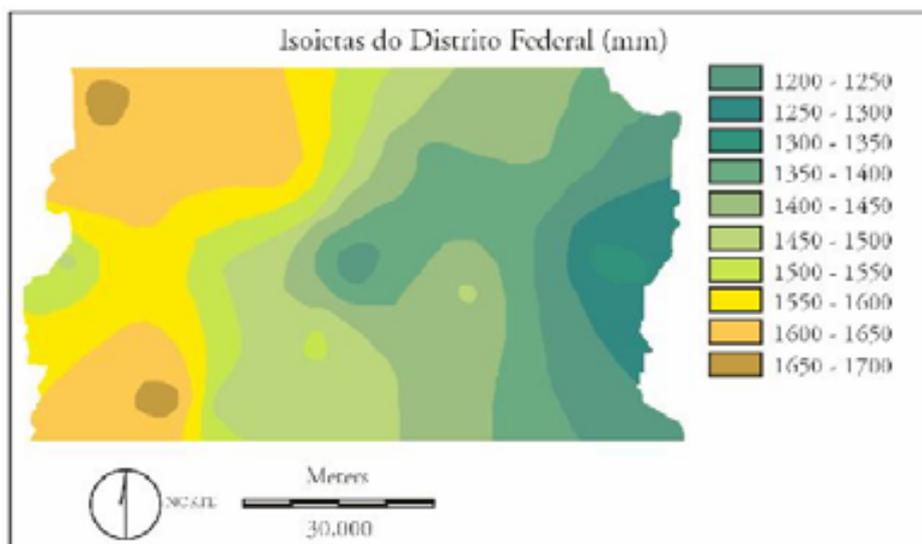


Figura 2.3 – Cartograma do Distrito Federal em milímetros. Fonte: Baptista (1997).

As condições climáticas encontradas na área de estudos são semelhantes as do DF, com a diferença de apresentar médias de precipitação pluviométrica mais elevadas no período chuvoso para a Bacia do Rio Descoberto, como pode ser observado no histograma da figura 2.4. Este histograma contém as médias de chuvas do Distrito Federal e da Bacia do Rio Descoberto para o período de 1980 a 2005, de 21 estações localizadas no DF.

Conforme a figura 2.4, nota-se que a média pluviométrica mais baixa, entre os anos de 1980 e 2005, ocorreu nos meses de maio a setembro e a mais alta nos meses de outubro a abril. As médias pluviométricas, no mesmo período, para a estação do Descoberto de responsabilidade da Caesb (Código: 1548008; Altitude: 1061,00; Latitude: 15°46'49"; Longitude: 48°13'49") estão disponíveis na tabela 2.2 e seus totais anuais na figura 2.5.

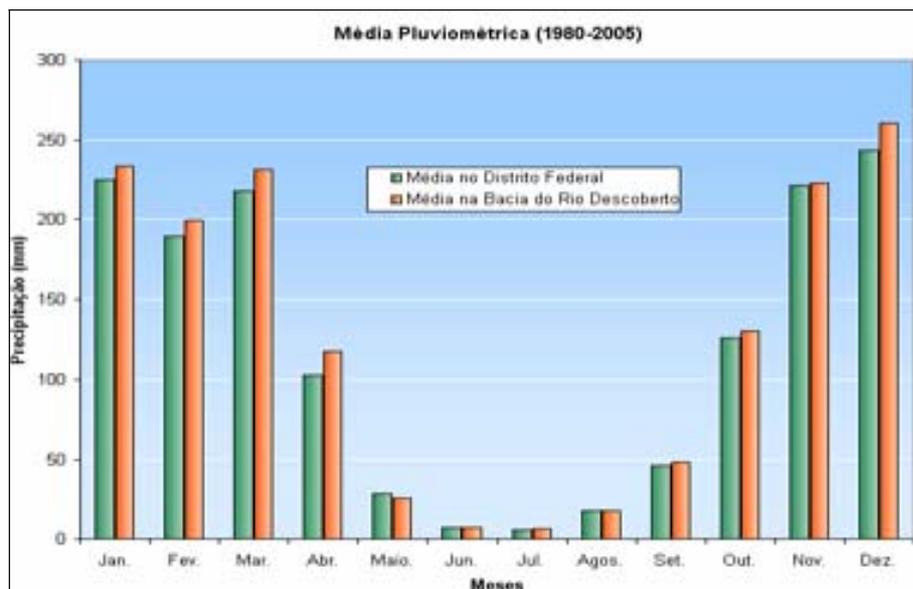


Figura 2.4 – Análise de frequência de precipitação pluviométrica média do Distrito Federal e da Bacia do Rio Descoberto entre 1980 e 2005. Fonte: Laboratório de Qualidade de Água da Caesb (2006).

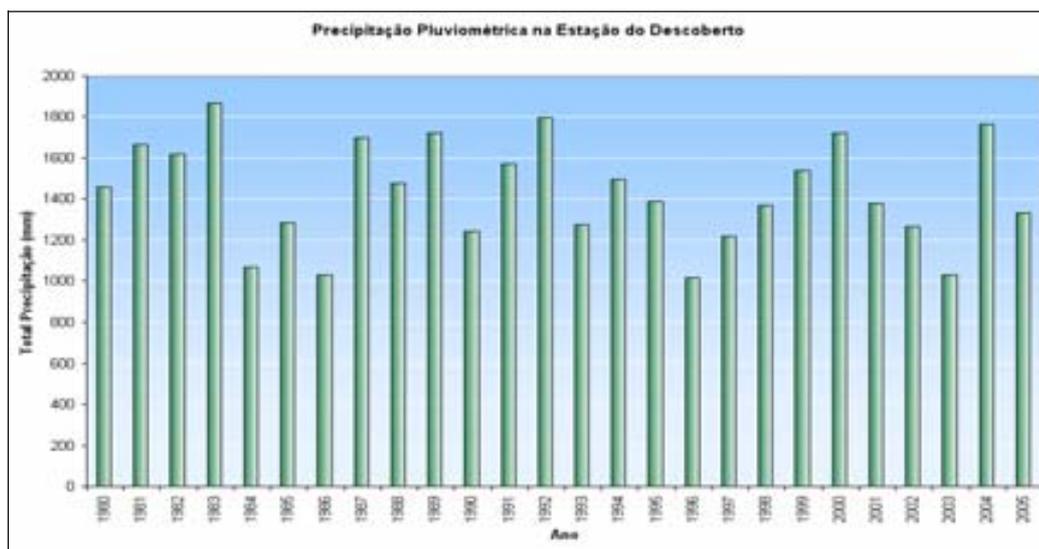


Figura 2.5 – Totais de precipitação pluviométrica na estação do Descoberto para o período de 1980 a 2005. Fonte: Laboratório de Qualidade de Água da Caesb (2006).

Tabela 2.2 – Totais médios mensais de precipitação pluviométrica em milímetros, da estação Descoberto, de responsabilidade da Caesb, para o período de 1980 a 2005.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
(mm)	212,7	206,3	212,9	115,5	23,5	8,4	7,7	17,1	51,3	122,4	213,7	241,8	1.433,1

2.1.3 - Vegetação

A vegetação predominante do Distrito Federal é o cerrado, cobrindo cerca de 90% de sua área. Todos os tipos de vegetação comumente englobados sob o termo cerrado são encontrados, desde árvores de porte elevado até ervas esparsas, formando um mosaico com a vegetação de matas galerias em torno das drenagens (Eiten, 1994).

Os diferentes tipos fitofisionômicos (termo utilizado para vegetação pela Embrapa) mapeados para o Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto basearam-se no boletim de trabalho de Reatto *et al.* (2003b). Nesse trabalho, o mapa de fitofisionomias gerado baseou-se nas unidades de solo classificadas para a região. Os percentuais de fitofisionomias do Alto do Descoberto são apresentados no gráfico da figura 2.6 e o respectivo mapa está disponível na figura 2.7.

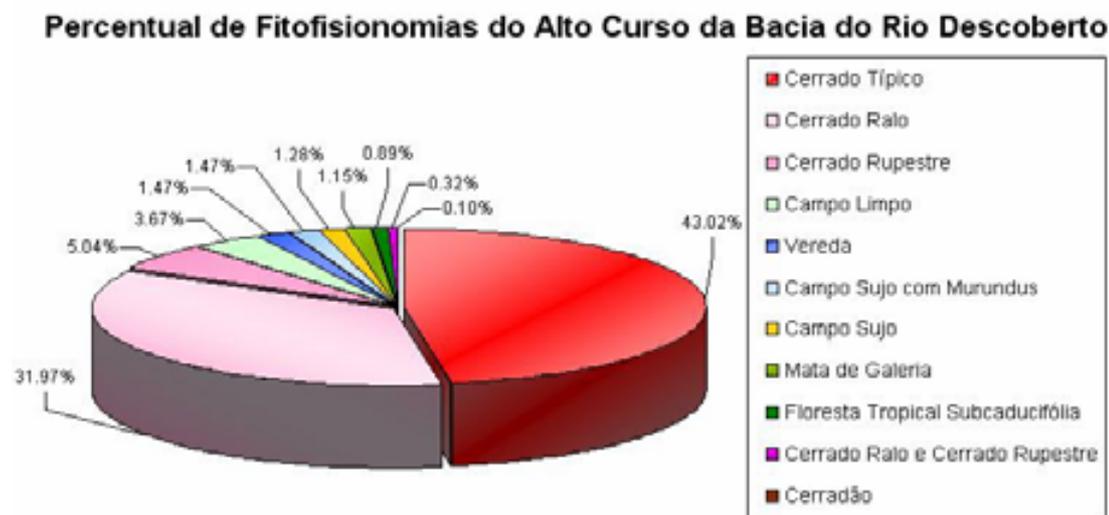


Figura 2.6 – Gráfico com os respectivos percentuais das fitofisionomias que ocorrem no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto. Fonte: percentuais obtidos em Reatto *et al.* (2003b).

As fitofisionomias encontradas, à exceção da Floresta Tropical Subcaducifólia, são descritas segundo Ribeiro & Walter (1998) *in* Reatto *et al.* (2003b):

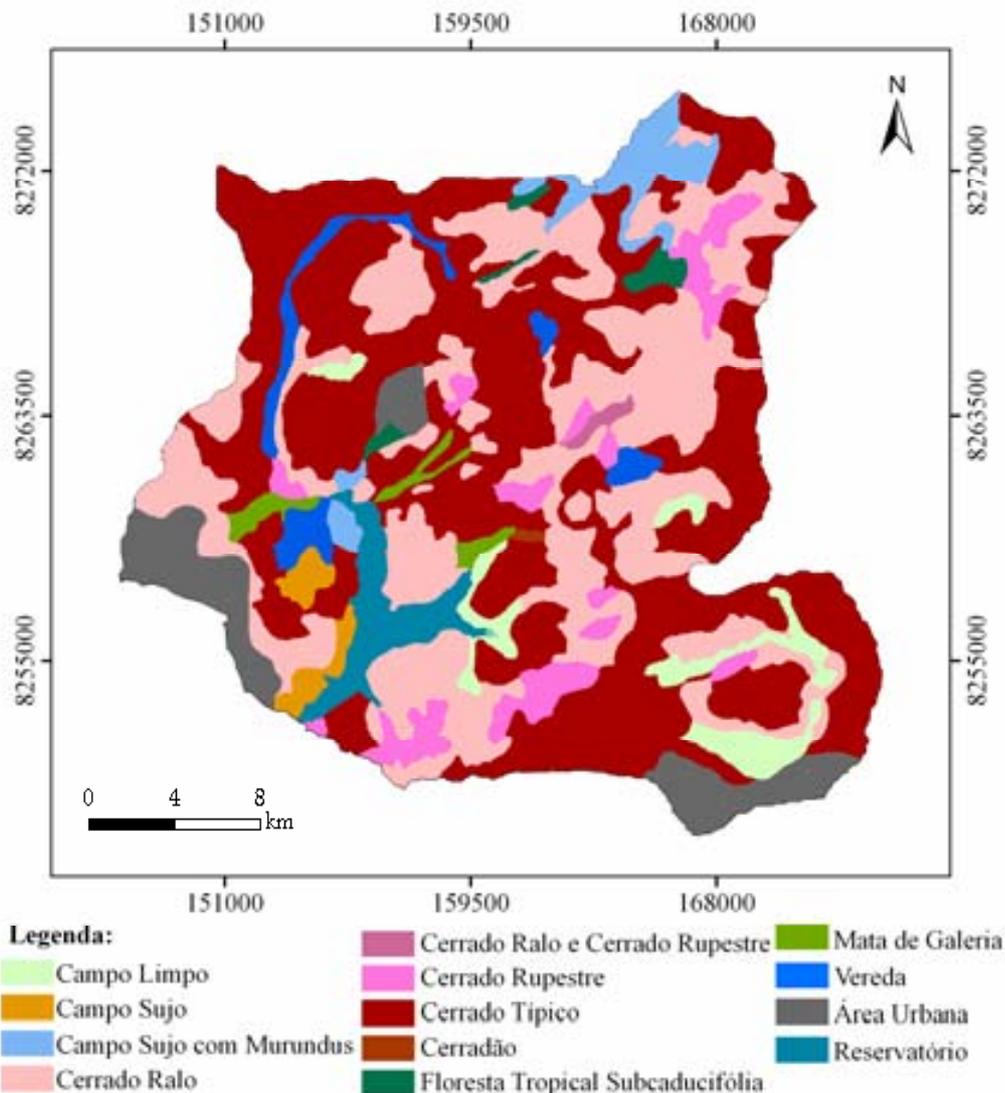


Figura 2.7 – Mapa das Classes Fitofisionômicas do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás. Fonte: Reatto *et al.* (2003b).

- Cerrado Típico: é um subtipo de vegetação predominantemente arbóreo-arbustivo, com cobertura arbórea de 20% a 50% e altura média de 3 a 6 metros. É uma forma intermediária entre o Cerrado Denso e o Cerrado Ralo.
- Cerrado Ralo: é um subtipo de vegetação arbóreo-arbustivo de 5% a 20% e altura média de 2 a 3 metros, com estrato arbustivo-herbáceo mais destacado.
- Cerrado Rupestre: é um subtipo de vegetação arbóreo-arbustivo que ocorre em ambientes rupestres. Possui cobertura variável de 5% a 20%, altura média de 2 a 4 metros e o estrato arbustivo-herbáceo é destacado. O que diferencia o Cerrado Rupestre do Cerrado Ralo é o

substrato, pois estão fixados no Neossolo Litólico. Os indivíduos arbóreos do Cerrado Rupestre estão dispostos entre as fendas das rochas, e a densidade é variável, dependendo do volume do solo.

- Campo Limpo: fitofisionomia predominantemente herbácea, com raros arbustos e ausência completa de árvores, é encontrado em diversas posições topográficas (encostas, nas chapadas, nos olhos d'água, circundando as Veredas e na borda das Matas de Galeria), com diferentes variações no grau de umidade, profundidade e fertilidade do solo. Também é chamado de Campo de Várzea, Várzea ou Brejo quando ocorre em áreas planas, contígua aos rios e inundados periodicamente.
- Vereda: é a fitofisionomia com a palmeira arbórea *Mauritia Flexuosa* emergente em meio de agrupamentos mais ou menos densos de espécies arbustivo-herbáceas. As Veredas são circundadas por Campo Limpo, geralmente úmido; e os buritis não formam dossel como ocorre no Buritizal. Na Vereda, os buritis caracterizam-se por altura média de 12 a 15 metros e a cobertura varia de 5% a 10%. As Veredas são encontradas em solos hidromórficos, saturados durante a maior parte do ano. Sua ocorrência está condicionada ao afloramento de lençol freático e geralmente ocupam os vales ou áreas planas acompanhando linhas de drenagem mal definidas, em geral, sem Murundus. Também são comuns numa posição intermediária do terreno, próximas às nascentes ou na borda de Mata de Galeria.
- Campo Sujo com Murundus: esse tipo fisionômico apresenta as mesmas características do Campo Sujo, porém, o que o caracteriza é a presença dos murundus ou monchões (são micro-relevos mais elevados). Os murundus são elevações convexas bastante características que variam em média, de 0,1 a 1,5 metro de altura e 0,2 a mais de 20 metros de diâmetro.
- Campo Sujo: tipo fisionômico com predominância de vegetação herbáceo-arbustiva, com arbustos e subarbustos esparsos cujas plantas, muitas vezes, são espécies arbóreas do Cerrado. São conhecidos como Campo Cerrado.
- Mata de Galeria: vegetação florestal que acompanha os rios de pequeno porte e córregos, formando corredores fechados (galerias) sobre o curso d'água. Geralmente, localiza-se nos fundos dos vales ou nas cabeceiras de drenagem onde os cursos d'água ainda não escavaram um canal definitivo. A altura média do estrato arbóreo varia entre 20 e 30

metros, apresentando superposição das copas que fornecem cobertura arbórea de 70% a 95%.

- Floresta Tropical Subcaducifólia: formação seca, com caráter semidecíduo cuja principal característica é a perda de grande parte das folhas na estação seca. Pouco densa, integrada com indivíduos de alto fuste (15 metros ou mais de altura), com galhos altos, copas ralas e folhas predominantemente pequenas (Embrapa, 1978).
- Cerradão: formação florestal com aspecto xeromórfico semelhante ao Cerrado quanto à composição florística, mas com porte mais alto, havendo a presença de espécies florestais. Existem três estratos muito nítidos: o primeiro, arbóreo (até 15 metros de altura), o segundo, arbustivo (até 3 metros de altura) e o terceiro, rasteiro, herbáceo, composto predominantemente de gramíneas. As árvores são bastante espaçadas, o que permite a passagem de luz e favorece a formação de estratos arbustivo e herbáceo diferenciados.

2.1.4 - Geologia

A região do Distrito Federal e entorno situa-se no contexto geológico da Faixa de Dobramentos Brasília, na Província Tocantins (Almeida *et al.*, 1977), um orógeno que se formou durante o ciclo Brasileiro pela amalgamação de três grandes blocos continentais: o Cráton Amazônico, o Cráton São Francisco e o Bloco Paraná. Entre estes blocos formaram-se as faixas de dobramentos Paraguai, Araguaia e Brasília.

A Faixa de Dobramentos Brasília representa uma cadeia orogênica com mais de 1.000 km de extensão e direção aproximada norte-sul, bordejando o Cráton São Francisco a oeste e se estendendo até a Faixa Araguaia, a leste. É dividida em dois seguimentos distintos pelo lineamento denominado Sintaxe dos Pireneus (Araújo Filho, 1981, 2000), o qual possui direção WNW-ESE e convergência aproximada S-SW. O segmento Norte da Faixa Brasília, de direção aproximadamente N10°-15°E, possui menor grau de metamorfismo e o seguimento Sul, de direção N10°-15°W possui maior deformação e metamorfismo. A vergência do transporte tectônico em ambos os segmentos é em direção ao Cráton São Francisco. A intensidade de metamorfismo e de deformação das rochas diminui de oeste para leste, em direção ao cráton.

Mais especificamente, a região do Distrito Federal 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 mapa geológico do DF e entorno é apresentado na figura 2.8.

Freitas-Silva & Campos (1998) descrevem 5 fases de deformação para a região do Distrito Federal, denominadas F₁, F₂, F₃, F₄, e F₅, as quais estão estreitamente relacionadas à propagação das frentes de cavalgamento. O padrão típico de domos e bacias do Distrito Federal, como o Domo de Brasília, o Domo de Sobradinho e o Domo do Pipiripau, formaram-se pela interferência de dobras da fase F₄ com dobras das fases F₂ e F₃. Ao final da estruturação, em um ambiente de descompressão, a fase de deformação rúptil F₅ foi responsável pela formação das fraturas que condicionam a rede de drenagem superficial e o sistema de circulação de águas subterrâneas.

Uma vez que o Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto tem seu contexto geológico local relacionado ao Grupo Paranoá, somente as unidades da bacia serão descritas. O Grupo Paranoá consiste em uma seqüência de rochas psamo-pelito-carbonatadas, de idade Meso/Neoproterozóica e baixo grau metamórfico.

Freitas-Silva & Campos (1998) mapearam as unidades S, A, R₃, Q₃, R₄ e PPC no Distrito Federal, excluindo a unidade Q₂. No entanto, não descartam a possibilidade de que quartzitos grossos a conglomeráticos (vinculados à unidade R₃), localizados na borda leste do Domo Estrutural do Pipiripau, sejam correlacionáveis a esta unidade, a qual ocorreria como fatias tectônicas imbricadas próximo ao cavalgamento do Grupo Paranoá sobre o Grupo Bambuí. Essa interpretação também é admitida por Carmelo (2002). A figura 2.9 apresenta a coluna estratigráfica do Grupo Paranoá na região do Distrito Federal.

- A Unidade R₃ (Unidade Metarritmito Arenoso) representa um metarritmito arenoso formado pela intercalação de quartzitos finos a médios com metassiltitos argilosos, metalamitos siltosos e metalamitos micáceos.
- A Unidade Q₃ (Unidade Quartzito Médio) consiste em quartzitos finos a médios, localmente grossos, sustentam as áreas de chapada mais elevada. Lentes de metarritmitos podem ocorrer próximas à base e topo desta unidade.

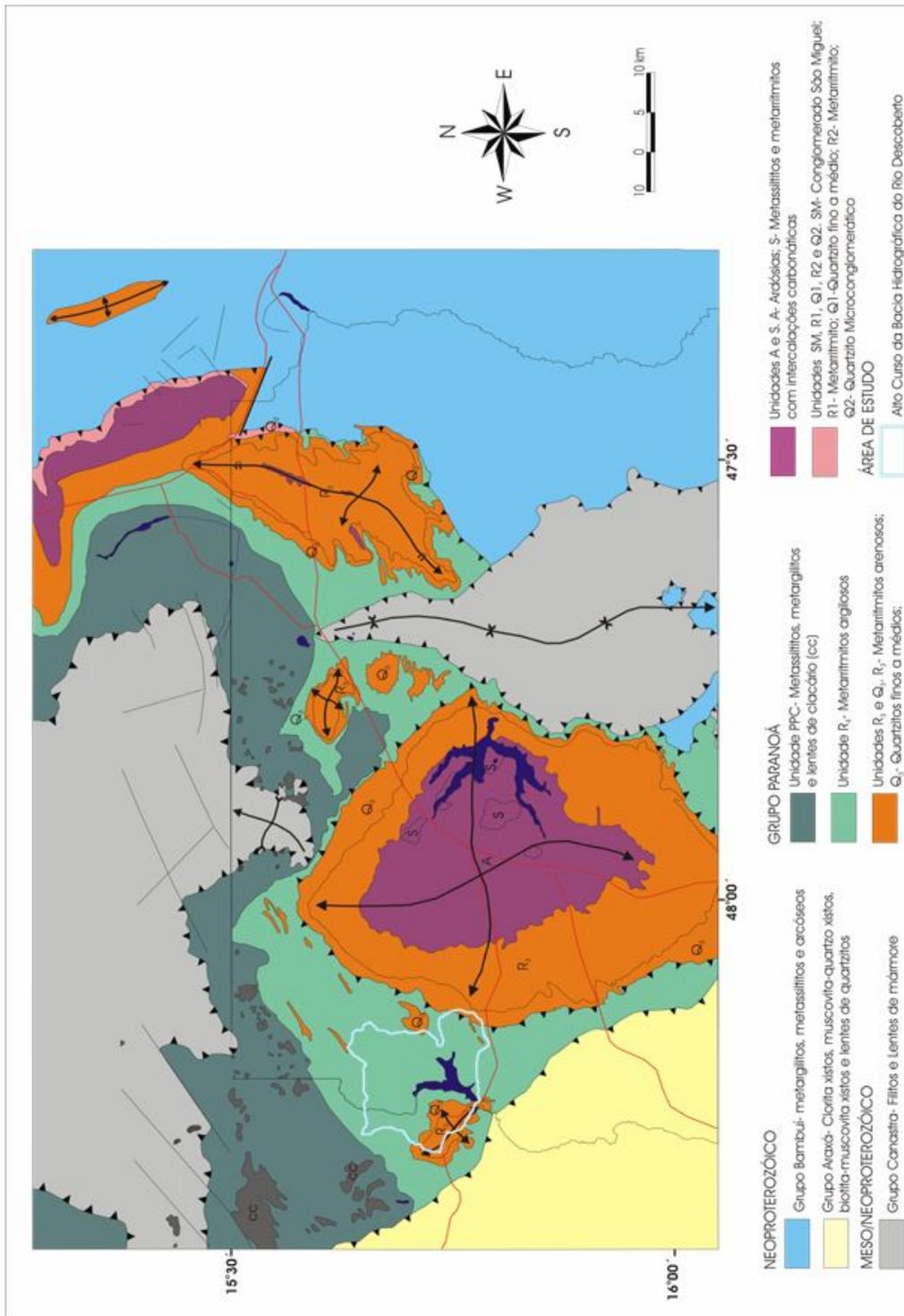


Figura 2.8 – Mapa Geológico do Distrito Federal e Entorno modificado. Fonte: Moraes, 2004 (compilado de Campos & Freitas Silva (1998) e Mapa Geológico de Goiás - CPRM (1999)).

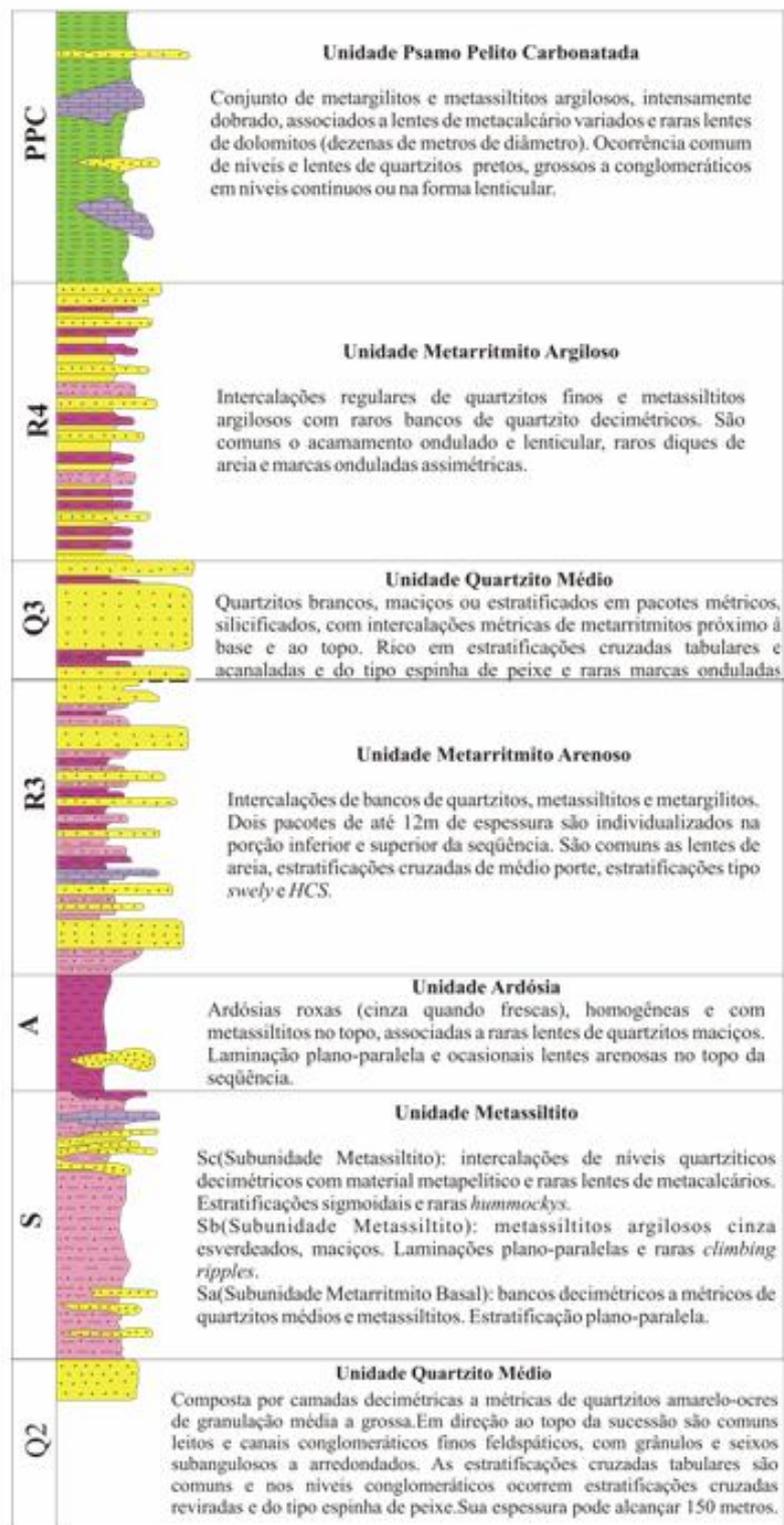


Figura 2.9 – Coluna estratigráfica do Grupo Paranoá no Distrito Federal. Fonte: Moraes, 2004 (modificada de Freitas-Silva & Campos, 1998).

- A Unidade R4 (Unidade Metarritmito Argiloso) compreende metarritmitos homogêneos formados pelas intercalações centimétricas regulares de metassiltitos, metalamitos e quartzitos finos, resultando em uma maior proporção de material pelítico em relação ao arenoso. Mais raramente, ocorrem bancos de metassiltitos maciços e de quartzitos finos, feldspáticos.

Ademais, no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto ocorrem as coberturas sedimentares: Detrito-lateríticas Terciário-Quaternárias e Aluviões Holocênicas. As Coberturas Detrito-lateríticas Terciário-Quaternárias tem ampla distribuição na área de estudo formando superfícies aplainadas com altitudes entre 900 e 1.150m, atualmente em processo de dissecação marginal pela erosão (CPRM/Embrapa, 2003).

As lateritas desenvolvem-se sobre todos os terrenos geológicos e são geomorfologicamente correlacionadas à superfície Sul-Americana. As crostas, cujos perfis completos incluindo todos os horizontes envolvidos no processo podem chegar a 20m de espessura, são de lateritas autóctones maduras e imaturas, nas quais a diferenciação de horizontes nem sempre é nítida (CPRM/Embrapa, 2003).

A relevância econômica das coberturas lateríticas reside nos depósitos supergênicos de manganês, de níquel e ouro detrítico que contêm e nos indícios indiretos para prospecção mineral. Na construção civil, são utilizadas *in natura* como blocos ou pedras de mão, de usos diversos, conhecidas como *tapiocanga* ou *pedra canga*. De singular importância é o emprego em estradas, para as quais, devido às boas características de compactação e resistência, exploram-se extensas cascalheiras, de ótimas qualidades para uso freqüente como, por exemplo, em obras de pavimentação como revestimento solto ou base para asfalto (CPRM/Embrapa, 2003).

A Cobertura Aluviões Holocênicas ocorre nos leitos das drenagens, onde inclusive são exploradas areias para construção civil. No entanto, devido aos rios correrem em vales encaixados, os depósitos, na sua maioria, são encontrados nos leitos dos rios, onde são explorados através de dragas. Na Bacia do Rio Descoberto predominam areias médias a grossas, quartzosas, com níveis de cascalho. Já o volume relativo de silte e de argila nas aluviões é pequeno (CPRM/Embrapa, 2003).

2.1.5 - Geomorfologia

O estudo geomorfológico local possui grande importância para trabalhos de análise ambiental, pois a geomorfologia apresenta um caráter integrador na medida em que procura compreender a evolução espaço-temporal dos processos do modelado terrestre e estabelece as escalas de atuação desses processos antes e depois da intervenção humana. Além disso, permite a identificação das fragilidades e o conhecimento das potencialidades de um determinado sistema ambiental. Nesta pesquisa, a importância do estudo da topografia está na sua influência na bacia, por exemplo, na direção e na acumulação de fluxo d'água. A seguir são apresentadas referências a trabalhos relacionados à geomorfologia do Distrito Federal, bem como à base geomorfológica adotada neste trabalho.

O Distrito Federal situa-se em uma das porções mais elevadas do Planalto Central. Segundo King (1957) e Braun (1971), essa área corresponde a remanescentes dos aplainamentos resultantes dos ciclos de erosão Sulamericano e Velhas, que se desenvolveram entre o Terciário Inferior e Médio, e entre o Terciário Médio e Superior, respectivamente. Nesse contexto, os trabalhos de Novaes-Pinto (1986), Martins & Baptista (1998) e Steinke (2003) apresentam contribuições aos estudos de compartimentação e evolução do relevo do Distrito Federal.

De acordo com Novaes-Pinto (1986), a paisagem natural do DF apresenta-se integrada por 13 unidades geomorfológicas, que constituem geossistemas interrelacionados e hierarquizados. Por suas similaridades morfológicas e genéticas, as unidades geomorfológicas agrupam-se em três tipos de paisagem (macro-unidades) características da região de cerrados, descritas a seguir:

Região de Chapada: ocupa cerca de 34% da área do DF e é caracterizada por topografia plana a plano-ondulada, acima da cota de 1.000 m, destacando-se a Chapada da Contagem. Desenvolve-se sobre quartzitos (Chapadas da Contagem, Brasília e Pipiripau), ardósias, filitos e micaxistos (Chapada Divisora São Bartolomeu – Preto e a Divisora Descoberto - Alagado). As coberturas são formadas principalmente por coureças vesiculares/pisolíticas e latossolos.

Área de Dissecação Intermediária: ocupa cerca de 31% da área do DF e corresponde às áreas fracamente dissecadas, drenadas por pequenos córregos, modeladas sobre ardósias, filitos e quartzitos (Depressão do Paranoá e Vale do Rio Preto). Nos interflúvios ocorrem coureças, latossolos e fragmentos de quartzo.

Região Dissecada de Vale: ocupa aproximadamente 35% do DF e corresponde às depressões de litologias de resistências variadas, onde estão os principais rios da região. Caracteriza-se por relevo acidentado em virtude da intensa dissecação, encostas de perfil convexo-côncavo e perfil complexo que inclui o segmento retilíneo. A rede de drenagem é condicionada pelo fraturamento quase ortogonal e pelas zonas de contato entre as diferentes litologias.

Conforme Novaes-Pinto (1994), a unidade Chapada Divisora Descoberto-Alagado, da macro-unidade Região de Chapada, corresponde a uma área total de 105 km². Já o Alto Curso do Rio Descoberto e o Curso Superior do Rio Descoberto, que correspondem a macro-unidades da Região Dissecada de Vale, apresentam 237 km² e 270 km², respectivamente.

Baseado em aspectos morfológicos, Martins & Baptista (1998) propuseram uma compartimentação geomorfológica e a determinação dos sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal (Figura 2.10). Por meio do desenvolvimento de uma metodologia de geoprocessamento, os autores identificaram, em função da hipsometria, três grandes compartimentos, denominados de Planaltos, Planaltos Intermediários e Planícies. Além dessas formas, também foram individualizados os compartimentos de rebordos (com declividade < 8%) e de escarpas (com declividades > 8%). As chapadas elevadas, por sua vez, são entendidas como superfícies de topo aplainado, sustentados por rochas do grupo Paranoá. Os rebordos são definidos como áreas de transição entre os residuais de aplainamento. Os planos intermediários são entendidos como superfícies residuais de aplainamento dissecadas pelas principais drenagens da região. As Planícies constituem as áreas topograficamente mais baixas associadas às calhas de drenagem dos cursos d'água mais importantes do DF.

Steinke (2003) propôs uma nova compartimentação geomorfológica para o DF, considerando a identificação de unidades morfológicas presentes nas grandes unidades morfo-esculturais já identificadas em trabalhos anteriores, numa escala maior de detalhamento, na qual os padrões identificados caracterizam-se por diferentes intensidades de dissecação, influenciados pelos canais de drenagem. O autor empregou dados morfométricos do sistema de drenagem e de altimetria, os quais foram relevantes na caracterização de compartimentos geomorfológicos, os quais têm o intuito de subsidiar ações que levem à identificação da modificação causada pelo homem na estrutura e na dinâmica do sistema ambiental.

O trabalho de Steinke (2003) diferencia-se dos demais pelo fato de ter como parâmetro básico de análise o sistema de drenagem superficial (hidrografia) e sua interação

com os aspectos topográficos (altimetria). O comportamento da drenagem e seus padrões e índices foram tomados como referencial na medida em que revelam as condicionantes estruturais. Isso possibilitou a identificação de unidades morfológicas de menor área, as quais se encontram diluídas em unidades morfológicas de maior área em grande parte dos trabalhos anteriores.

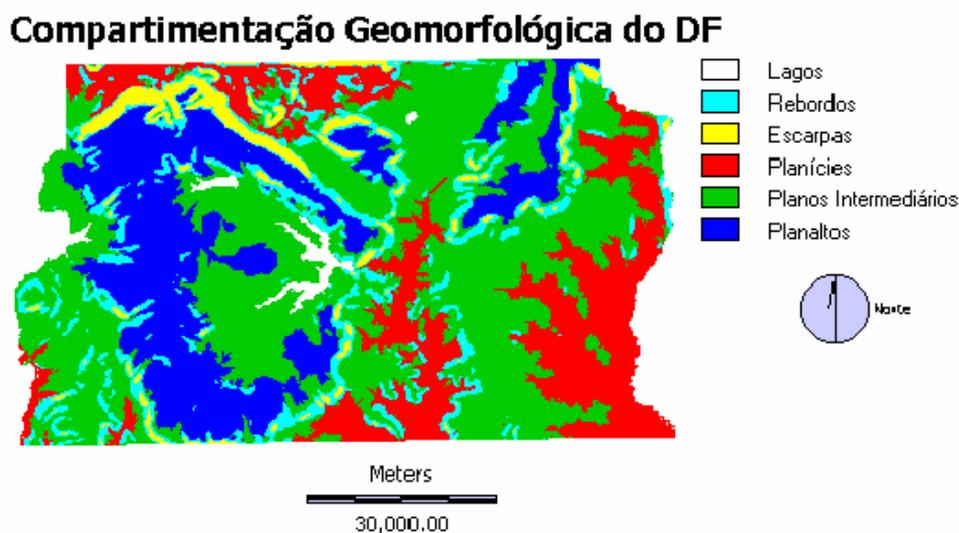


Figura 2.10 – Compartimentação geomorfológica do Distrito Federal.
Fonte: Martins & Baptista (1998).

Steinke (2003) identificou os quatro padrões descritos a seguir e mostrados de forma agrupada na figura 2.11 na escala de 1:100.000:

Padrão Aplainado Superior (Aps): as unidades morfológicas pertencentes a este padrão ocupam cerca de 32% do DF e caracterizam-se por topografia plana e plana ondulada acima da cota de 1.000 metros, apresentando cobertura predominantemente de Latossolos Vermelho-Escuro, cuja textura varia entre argilosa e argilosa/média. Estas unidades constituem-se nos divisores de água das grandes bacias hidrográficas do DF e corresponde aproximadamente à macro-unidade de Chapada estabelecida por Novaes-Pinto (1986).

Padrão Aplainado Inferior (Api): este padrão ocupa cerca de 8% do território do Distrito Federal. Ocorre sobre ardósias, filitos e quartizitos e é recoberto predominantemente por Latossolos Vermelho-Escuro, Latossolos Vermelho-Amarelo e solos lateríticos. Sobre este padrão, desenvolvem-se ainda algumas áreas de cambissolos. Esta unidade encontra-se em regiões altimétricas com cotas variando de 830 a 1.030 metros, formando divisores de bacias

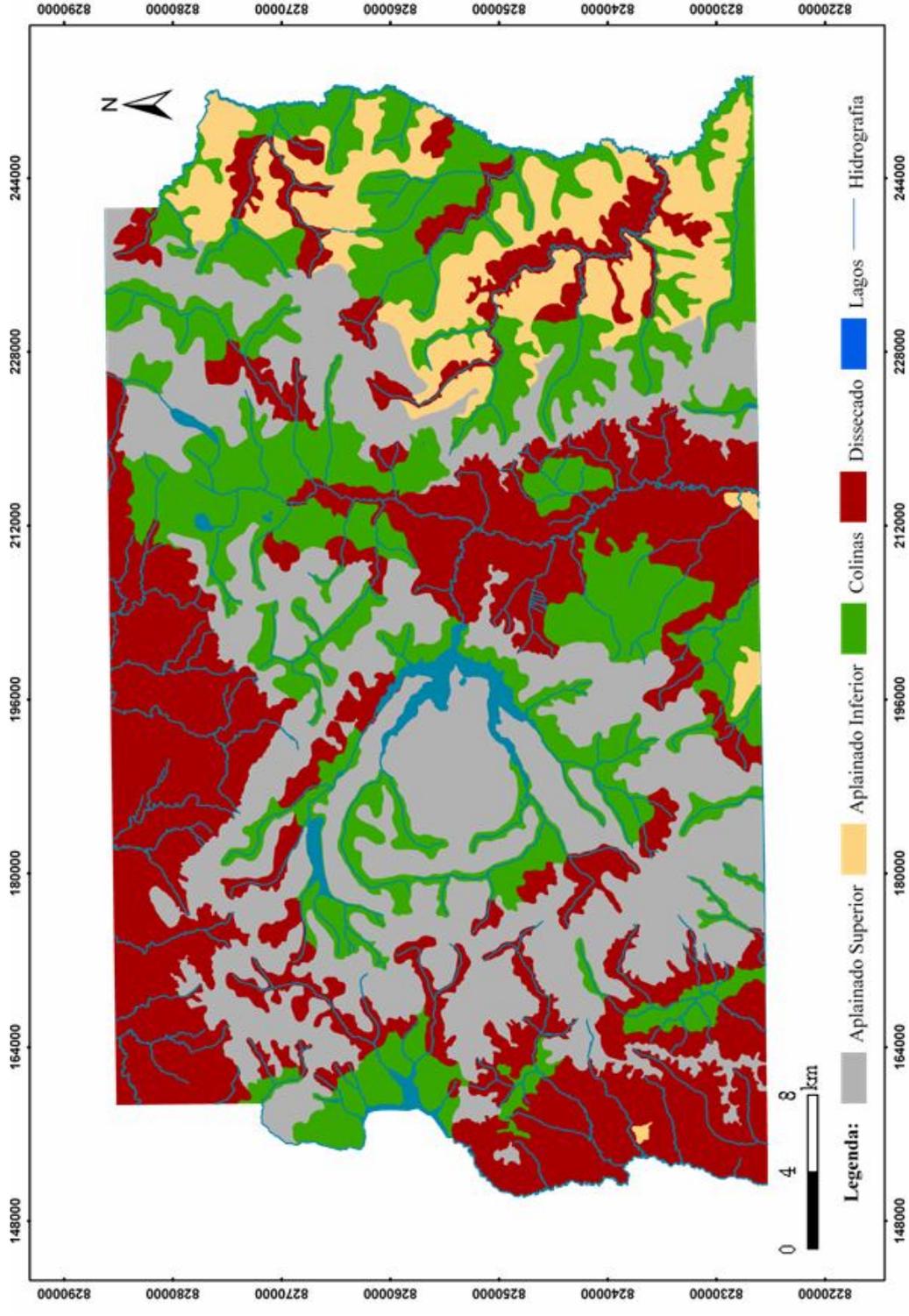


Figura 2.11 – Mapa de distribuição de padrões de relevo do Distrito Federal. Fonte: Steinke (2003).

com ordem menor de grandeza. O Padrão Aplainado Inferior é resultado de processos de desgaste típicos de clima seco e de deposição do material desagregado das áreas elevadas, tendo sido elaborado em época posterior. Este padrão está inserido na região denominada por Novaes-Pinto (1994) de Dissecação Intermediária, contudo, neste caso foram extraídas em função do sistema de drenagem, separando os topos onde os processos de dissecação são mais brandos, o que favorece a inexistência de entalhamento.

Padrão em Colinas (CI): as unidades morfológicas deste padrão ocupam aproximadamente 26% do território do Distrito Federal e encontram-se distribuídas em diferentes altitudes, embora a característica principal esteja relacionada com a dissecação do relevo, ou seja, todas as unidades deste padrão apresentam dissecação intermediária. Essas unidades, de modo geral, não apresentam correspondência com a Região de Dissecação Intermediária de Novaes-Pinto (1986), exceto em algumas áreas. A cobertura destas unidades, em função da distribuição espacial delas, apresenta certa diversidade de tipos de solos, com predominância de Latossolos Vermelho-Escuro, Latossolos Vermelho-Amarelo e Cambissolos.

Padrão Dissecado (D): as unidades deste padrão ocupam cerca de 34% do Distrito Federal e apresentam como ponto comum o aprofundamento dos talwegues dos rios, com relevo acidentado, encostas de perfil convexo-côncavo e perfil complexo que inclui o segmento retilíneo e formação de solos câmbicos, em especial litossolos. Caracterizam-se por amplitudes altimétricas elevadas e alto índice de dissecação do relevo. A drenagem tem elevada densidade e padrão dendrítico, o que reflete seu condicionamento estrutural e a característica predominante de litologias com baixa permeabilidade, principalmente as camadas areno-argilosas do Grupo Bambuí e xistosas do Grupo Araxá (Unidade Dissecada do Alto Curso do Rio Maranhão) e filitos e quartizitos do Grupo Canastra (Unidade Dissecada do Rio São Bartolomeu).

2.1.6 - Solos

Os solos do Distrito Federal representam bem os solos da região do cerrado (Cline & Buol, 1973 *in* Martins & Baptista, 1998). A melhor fonte de informações sobre os solos da Bacia do Rio Descoberto foi 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 (Figuras 2.12 e 2.13). A figura 2.12 apresenta os percentuais das unidades mapeadas na área pela Embrapa.

Percentual das Classes de Solos do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto

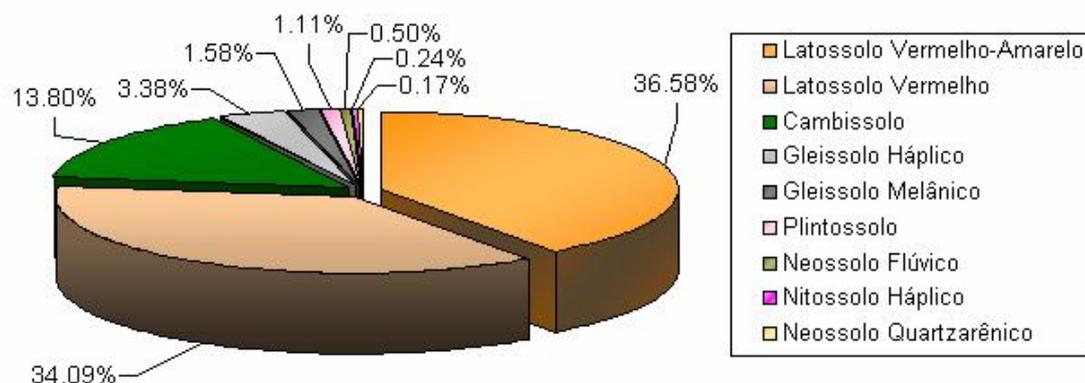


Figura 2.12 – Gráfico com os respectivos percentuais das classes de solos do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto. Fonte: percentuais definidos em Reatto *et al.* (2003a).

2.1.6.1 - Latossolos

São solos tropicais, não hidromórficos, vermelhos, muito profundos, pobres em macro e micro nutrientes, textura argilosa ou média, muito porosos, bastante permeáveis e de acentuadamente a fortemente drenados. Caracterizam-se por serem ácidos ou em alguns casos, extremamente ácidos, com presença de argilo-minerais do tipo caulinita e óxidos de ferro e alumínio (Caesb, 1985).

Os latossolos ocupam a maior parte da área da Bacia do Rio Descoberto perfazendo um total de 70,67% da bacia, tendo como representantes o Latossolo Vermelho (LV), ocupando 34,09% e o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) ocupando 36,58% da bacia (Reatto *et al.*, 2003a). Os LVs e os LVAs são solos minerais, não hidromórficos, profundos (superiores a 1,5 m), apresentando horizonte B espesso (> 50 cm).

A classe LV ocorre em ambientes bem drenados, típicos de Chapadas Elevadas. Dessa forma, a classe LVA seria um produto de degradação da classe Latossolos Vermelhos em ambientes com atividade mais elevada da água, que provoca a dissolução preferencial da hematita em relação à goethita (Martins & Baptista, 1998).

Os Latossolos Vermelhos são solos originários da alteração dos metapelitos do Grupo Araxá e facilmente reconhecidos pela grande quantidade de minerais micáceos, visíveis macroscopicamente. Apresentam textura bastante argilosa e espessura de até 20 cm para o horizonte A e 1,5 m para o horizonte Bw, com frequência é possível observar

exposições do horizonte C e das rochas metapelíticas nos perfis de solo. Os LVs estão associados a relevo plano a suave ondulado e possuem grande continuidade lateral e vertical (Dutra, 2003).

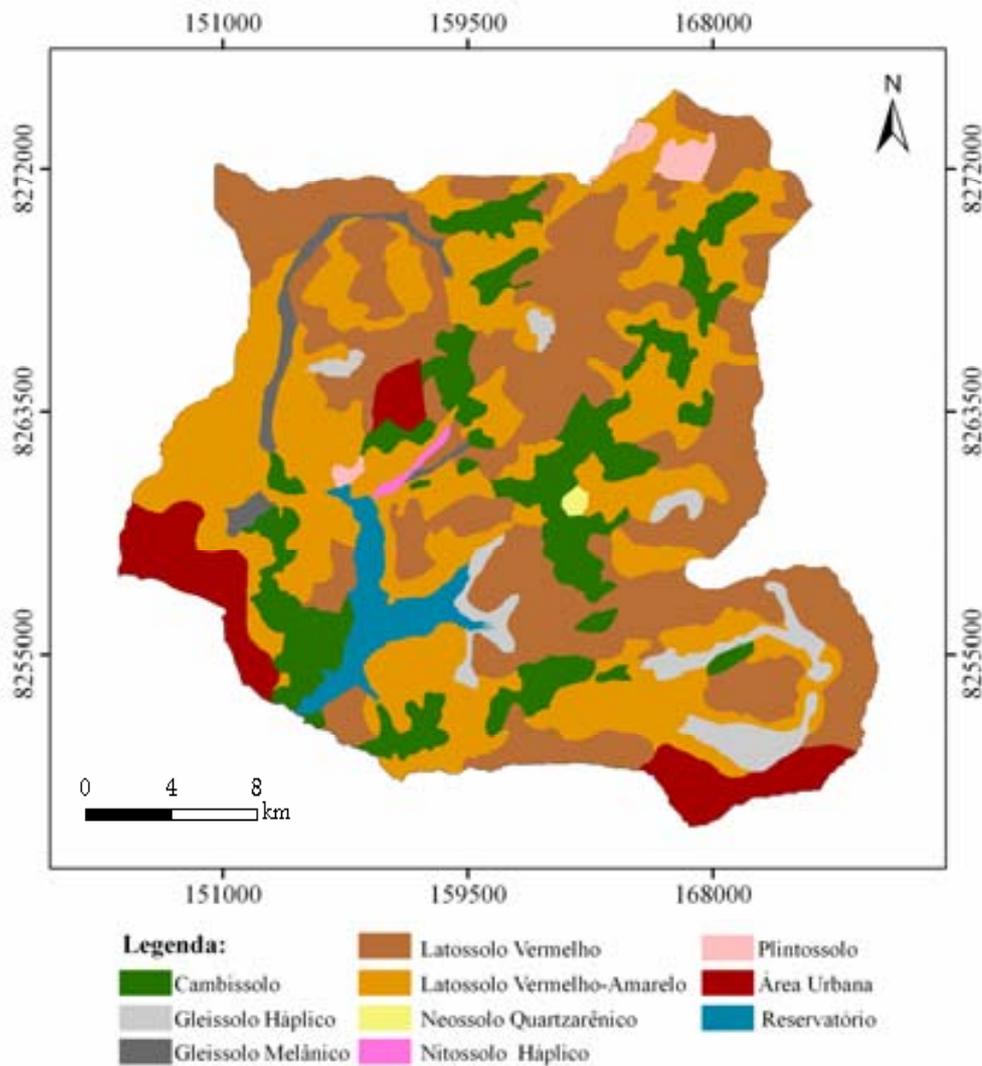


Figura 2.13 – Mapa de Solos do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás. Fonte: modificado de Reatto *et al.* (2003a).

Os Latossolos Vermelho-Amarelos, por sua vez, são solos bem desenvolvidos, com espessura de até 5m, textura arenosa, granulometria média a grossa, são porosos e apresentam alta condutividade hidráulica. Diferem-se dos Latossolos Vermelhos, pela cor mais clara do horizonte B e por ocupar regiões nas bordas de chapadas e divisores. O horizonte A se apresenta bem desenvolvido, arenoso de textura média. O horizonte B, também arenoso e com boa permeabilidade e condutividade hidráulica (Dutra, 2003).

2.1.6.2 - Cambissolos

São solos que apresentam um horizonte sub-superficial submetido a pouca alteração física e química, porém suficiente para o desenvolvimento de cor e da estrutura. Em regra, apresentam minerais primários, facilmente intemperizáveis, teores mais elevados de silte, indicando baixo grau de intemperização. Seu horizonte sub-superficial é denominado B incipiente (Reatto *et al.*, 2003a).

De acordo com Reatto *et al.* (2003a), as classes de Cambissolos perfazem 13,8% do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto. Ocupam as porções mais elevadas, associados a relevos mais movimentados, suave-ondulado (3% a 8% de declive), ondulado (8% a 20%) e forte-ondulado (20% a 45%).

2.1.6.3 - Gleissolos

São solos hidromórficos que ocupam, geralmente, as depressões da paisagem sujeitas a inundações. Apresentam drenagem dos tipos imperfeitamente drenado ou muito mal drenado, ocorrendo, com frequência, espessa camada escura de matéria orgânica mal decomposta sobre uma camada acinzentada (gleizada), resultante de ambiente de oxirredução (Reatto *et al.*, 2003a).

Segundo Reatto *et al.* (2003a), a área estimada na bacia é de 3,38% de Gleissolo Háptico (GX) e 1,58% de Gleissolo Melânico (GM). A diferença entre essas duas classes está no horizonte A. No GM esse horizonte tem 20 cm ou mais de espessura, apresenta-se escuro, com grande quantidade de matéria orgânica. No GX o horizonte A é mais claro e mais pobre em matéria orgânica.

Morfologicamente são solos pouco desenvolvidos e formados de sedimentos aluviais, com presença de lençol freático próximo à superfície na maior parte do ano, caracterizando um ambiente de acúmulo de matéria orgânica e de oxirredução. Os perfis são do tipo horizonte A com predominância de cores pretas sobre C com tendência de cores cinzento-claras a escuras (Reatto *et al.*, 2003a).

2.1.6.4 - Neossolos

São solos pouco evoluídos e sem horizonte B diagnóstico. Compreendem solos constituídos por material mineral ou por material orgânico pouco espesso com pequena expressão dos processos pedogenéticos em consequência da baixa intensidade de atuação destes processos. Isso quando estes processos não conduziram, ainda, a modificações

expressivas do material originário, de características do próprio material, pela sua resistência ao intemperismo ou composição química, e do relevo, que podem impedir ou limitar a evolução desses solos (Embrapa, 1999).

Conforme Reatto *et al.* (2003a), 0,50% da área da bacia correspondem a Neossolo Flúvico (RU) ou Solos Aluviais e 0,17% a Neossolo Quartzarênicos (RQ) ou Areias Quartzosas. Os RUs ocorrem em relevo plano a suave-ondulado e estão sob a fitofisionomia Mata de Galeria. São solos derivados de sedimentos aluviais com horizonte A assente sobre horizonte C, constituído de camadas estratificadas, sem relação pedogenética entre si.

Os RQs têm seqüência de horizontes A-C, sem contato lítico dentro de 50 cm de profundidade, apresentando textura areia ou areia franca nos horizontes até, no mínimo, a profundidade de 150 cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico. Eles são essencialmente quartzosos, tendo nas frações areia grossa e areia fina 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala e, praticamente, ausência de minerais primários alteráveis (menos resistentes ao intemperismo) (Embrapa, 1999).

2.1.6.5 - Nitossolos

Correspondem a uma classe bastante heterogênea que têm, em comum, aumento substancial no teor de argila com profundidade e/ou evidências de movimentação de argila do horizonte A para o horizonte B, expressas na forma de cerosidade. Essa classe compreende solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B textural de cores avermelhadas, com tendência à tonalidade escura e teores de óxido de ferro menores que 15% (Resende *et al.*, 1988 *in* Reatto *et al.*, 2003a).

De acordo com Reatto *et al.* (2003a), os Nitossolos Hápticos (NX) representam 0,24% da bacia. Na paisagem ocupam a porção inferior das encostas, em geral, nas encostas côncavas onde o relevo apresenta-se suave-ondulado (3% a 8%). Os NXs apresentam, morfologicamente, o horizonte B mais argiloso e estruturado que o horizonte A.

2.1.6.6 - Plintossolos

São solos minerais hidromórficos, com séria restrição à percolação de água, encontrados em situações de alagamento temporário e, portanto, escoamento lento. Para a classe dos Plintossolos Pétricos, não estão em posições de paisagem que estejam sujeitos ao hidromorfismo atual e sim pretérito (Reatto *et al.*, 2003a).

Conforme Reatto *et al.* (2003a), 1,11% da área da bacia correspondem a Plintossolos. Ocorrem em relevo plano e suave-ondulado, em áreas deprimidas e nos terços inferiores da encosta onde há importante movimentação lateral de água para as classes dos Plintossolos Háplicos (FX). Os Plintossolos Pétricos (PP), por sua vez, ocorrem em relevo suave-ondulado, na borda das superfícies de aplainamento. O FX perfaz 1,15% da bacia e o FF está associado à ocorrência do Nitossolo Háplico.

2.2 - Caracterização Sócio-Econômica

2.2.1 - Aspectos Demográficos e Sociais

Conforme Seduma (2007b), há acentuado fluxo migratório deslocando população do Distrito Federal em direção a Goiás, em especial, para os municípios do entorno do DF. Assim, esses municípios têm apresentado taxas de crescimento mais altas do que as verificadas no Distrito Federal, alcançando 5,49% ao ano entre 1991 e 2000, enquanto para o DF como um todo foi da ordem de 2,79% no mesmo período. Nota-se que o entorno cresceu a uma velocidade quase duas vezes maior que o DF. No ano de 2007, a Contagem de População do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), registrou 1.063.182 habitantes no entorno que, somados ao DF, perfaziam 3.519.085 moradores. O mapa da figura 2.14 mostra uma visão do acelerado crescimento do DF e entorno, mostrando a situação de 1960 até 2004.

O crescimento urbano nos municípios limítrofes do DF consolida a tendência de migração da população em direção ao entorno do Distrito Federal, em busca de terras mais baratas e com titularidade, desprovidas, porém, de infra-estrutura. A crescente ocupação do entorno que suplanta, em intensidade, o crescimento das áreas centrais, é caracterizada por uma elevada dependência da rede de serviços e dos empregos ofertados no Distrito Federal.

A consolidação das urbanizações residenciais dispersas e o crescimento urbano das cidades limítrofes ao DF propiciaram que o Distrito Federal e o entorno se configurassem como cidade difusa, um espaço de dinâmicas territoriais onde se observam novos elementos não considerados até 1997 (Seduma, 2007b). A cidade difusa privilegia lógicas de fluxo, no lugar da tradicional importância das relações de proximidade entre os espaços. Com isso, nessa Área Metropolitana em formação não se percebem perímetros urbanos claros, mas uma mancha de urbanização contínua, com maior ou menor intensidade de uso.

Para ordenar os processos de urbanização identificados a partir de 1997, foram estabelecidas as categorias a seguir (Seduma, 2007b):

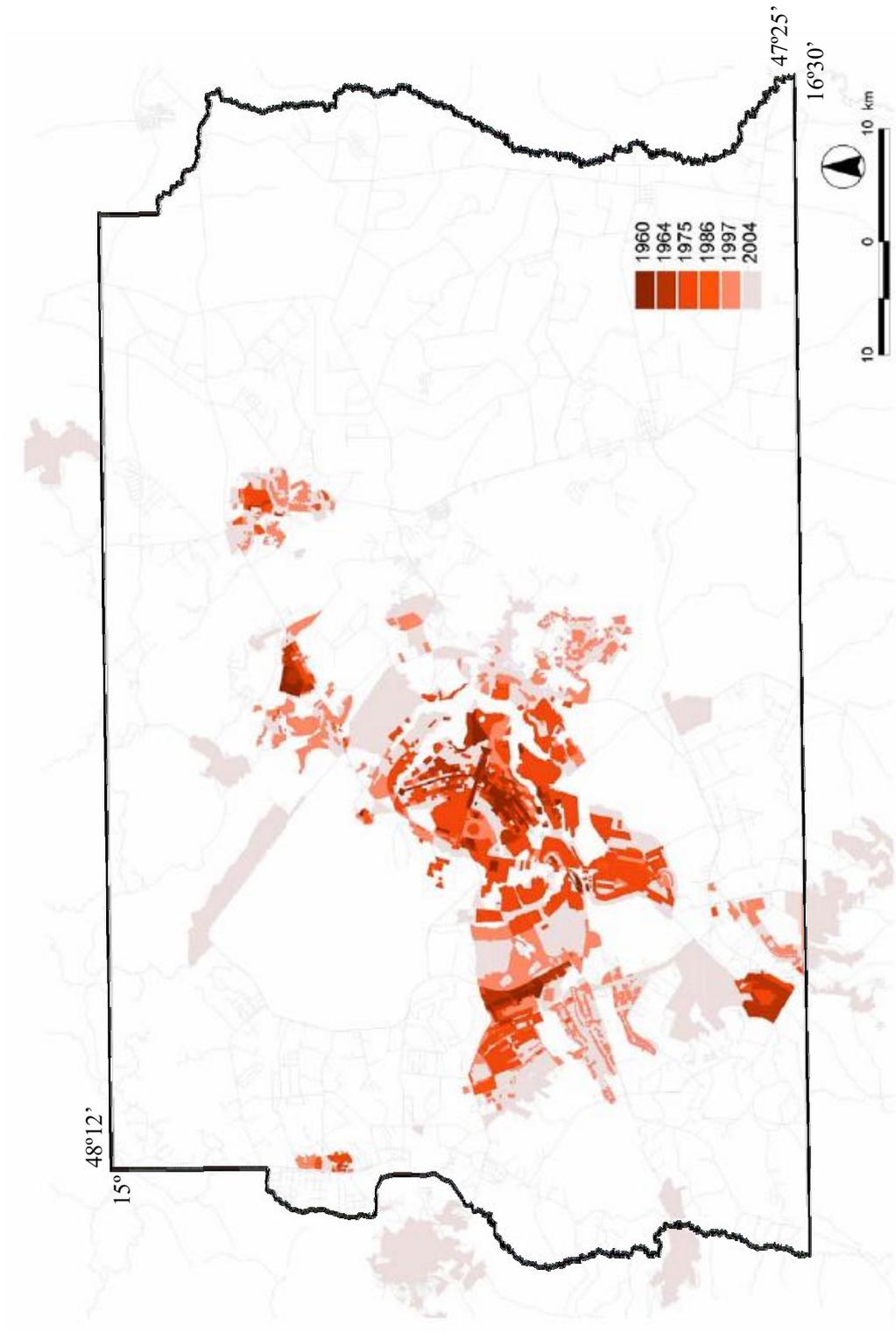


Figura 2.14 – Evolução da ocupação no Distrito Federal e no Entorno. Fonte: Seduma (2007b).

Consolidação: processo de ocupação de espaços urbanos com destinação prévia, em geral, cumprindo os projetos urbanísticos registrados em cartório;

Adensamento: reaproveitamento dos espaços degradados e obsoletos, de modo a otimizar o uso das infra-estruturas existentes, gerando maiores densidades;

Expansão: criação de novas áreas urbanas contíguas aos núcleos urbanos. Configura um processo de expansão, em que se prolongam as infra-estruturas existentes, aumentando o perímetro urbano. Trata-se de um crescimento nas bordas da cidade;

Dispersão: parcelamento de glebas rurais, de propriedade pública ou privada, relativamente desconectadas dos núcleos urbanos consolidados, em unidades de menor dimensão;

Polarização: processo de urbanização derivado do cenário de dispersão territorial.

Ainda em relação aos aspectos demográficos e sociais, no Alto da Bacia do Descoberto localiza-se, do lado de Goiás, o município de Águas Lindas e, do lado do DF, a Região Administrativa de Brazlândia (RA-Brazlândia), o INCRA 8 e o Condomínio Privê Lucena Roriz. Nessa região observam-se processos de urbanização nas categorias expansão e dispersão.

O caso de expansão demográfica no entorno mais preocupante é o da cidade de Águas Lindas de Goiás. O censo demográfico do IBGE no entorno, especificamente para o município de Águas Lindas de Goiás, apontou uma taxa de crescimento anual de 3,28% e a população passou de 105.746 habitantes em 2000 para 132.203 em 2007. Segundo o último censo do IBGE, a cidade goiana é a maior do entorno do Distrito Federal e o sexto município que mais cresce no país.

A origem da ocupação da região coincidiu com a implantação do canteiro de obras da barragem do Descoberto, com uma história iniciada em 1982, a partir de pequenos loteamentos. O crescimento da cidade foi marcado pelo grande interesse do setor imobiliário, que transformava áreas rurais em loteamentos urbanos, muitas vezes, sem documentação legal. As propriedades rurais, mesmo aquelas de pequena extensão, foram desvalorizadas e transformadas em loteamentos urbanos, caracterizando-se em atividade de alta rentabilidade. Como esses loteamentos eram destinados a uma população de baixa renda, sem condições de sobreviver no Distrito Federal, houve pouco interesse dos empresários em legalizar e investir em infra-estrutura urbana no município.

Segundo os Censos do IBGE e as Projeções da Seduma, a população da Região Administrativa de Brazlândia era de 41.119 habitantes em 1991 e de 52.698 em 2000, apresentando uma taxa de crescimento anual de 2,82% neste período. A taxa de crescimento anual prevista para Brazlândia entre 2000 e 2010 é de 1,58%. Assim, estima-se que a população alcance a 60.293 habitantes em 2008 e 61.549 em 2010. Em Brazlândia observa-se o chamado crescimento por expansão nas bordas da cidade.

Na APA do Descoberto, unidade de conservação de uso sustentável, evidenciam-se conflitos de ocupação decorrentes da presença de assentamentos informais, implantados em áreas onde a ocupação urbana não é permitida pelos respectivos zoneamentos ambientais, por exemplo, em Área de Preservação Permanente (APP). A maioria dos casos é encontrada no Projeto Integrado de Colonização Alexandre Gusmão – PICAG (Figura 2.15), tais como: INCRA 8 (Figura 2.16-a), localizado em Zona Rural de Uso Controlado, e o Condomínio Privê Lucena Roriz (Figura 2.16-b), localizado em Zona Urbana de Uso Controlado.

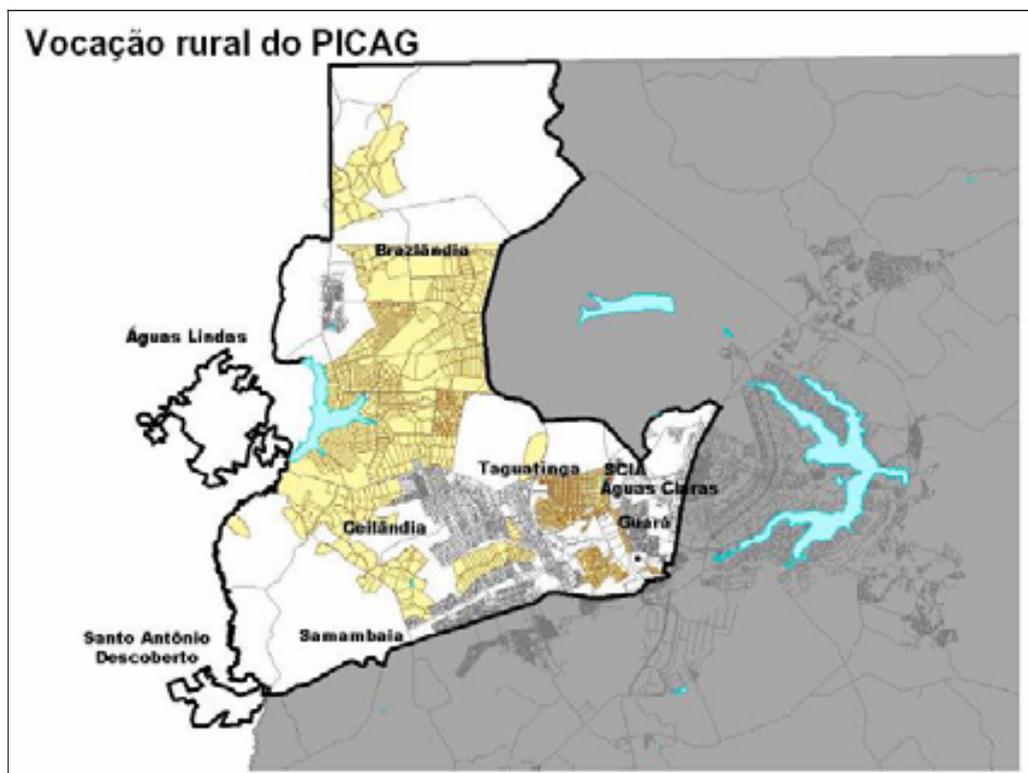


Figura 2.15 – Área correspondente ao Projeto Integrado de Colonização Alexandre Gusmão - PICAG. Fonte: Seduma (2006).

O núcleo urbano INCRA 8 está localizado muito próximo ao reservatório do Rio Descoberto como mostra a figura 2.16-a. Nesta figura pode-se observar que as plantações ultrapassam os 125 m de largura da faixa de proteção ao longo das margens do reservatório estabelecida em APP. Além disso, nota-se uma grande erosão nas margens do reservatório.

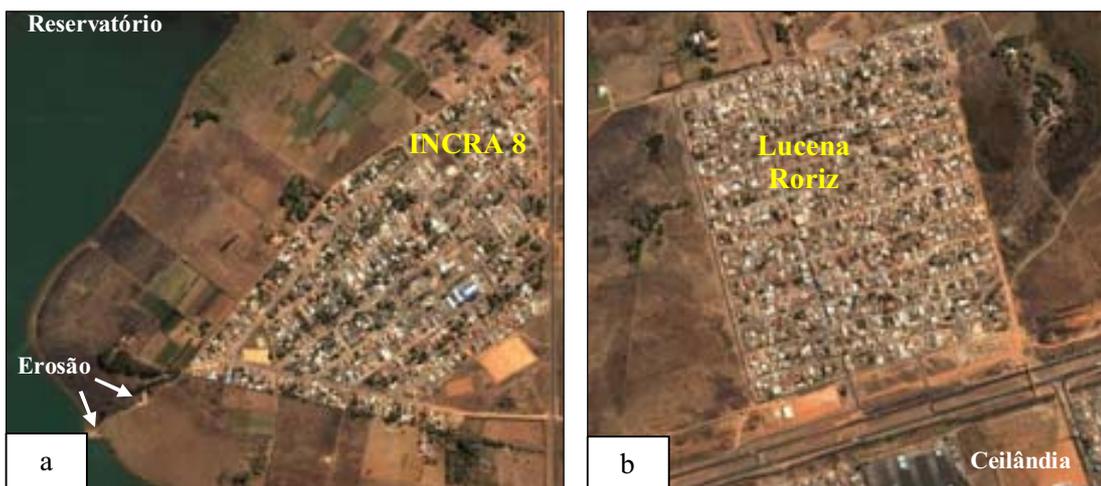


Figura 2.16 - Conflitos de ocupação na APA do Descoberto. (a) Núcleo Urbano INCRA 8. (b) Condomínio Privê Lucena Roriz. Fonte: *Google Earth* em 14 de janeiro de 2008.

2.2.2 - Aspectos Econômicos

A exploração de materiais para a construção civil e de insumos agrícolas nas proximidades de áreas urbanas constitui conflito de uso do solo que tem afetado seriamente o abastecimento de água dos centros consumidores. Em virtude da expansão urbana, essa exploração é deslocada para áreas cada vez mais distantes dos centros consumidores, instalando-se, em regiões que, por sua vez, são invadidas por novas habitações (CPRM/Embrapa, 2003). Esse deslocamento característico de áreas em expansão pode ser observado no Alto do Descoberto.

2.2.2.1 - Recursos Naturais

Nos últimos anos, na Bacia do Descoberto, em especial nas proximidades de Águas Lindas de Goiás nos compartimentos Chapadas Elevadas e Planos Intermediários, tem sido instaladas pequenas minerações de areia, de cascalho laterítico e de argila. (Dutra, 2003). O cascalho extraído costuma ser usado por empresas particulares no serviço de terraplanagem de ruas do município, ou na construção civil, sob regime de licenciamento ou mesmo de forma clandestina, visando redução dos custos de produção.

Cascalho e terra têm sido retirados de uma área de cerrado nativo, sendo comuns as explorações em caixas de empréstimo ao longo das estradas ou em cascalheiras, como visualizado na figura 2.17. Além de destruir a vegetação, a exploração utiliza técnicas inadequadas que elevam o potencial de perda de solo, por exemplo, as máquinas fazem buracos que chegam a 10 m de profundidade.



Figura 2.17 - Extração de material ao longo de uma estrada no Alto do Descoberto. (a) Caixas de empréstimo. (b) Cascalheiras. Fotos: Elenjuce Valentin em 20 de junho de 2007.

A extração de todo tipo de minério depende de licença do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), mas algumas cascalheiras no Alto do Descoberto avançam na extração mesmo sem renovação da licença.

Em uma pesquisa realizada em 2001, citada no relatório da CPRM/Embrapa (2003), foi detectado que de um total de 14 ocorrências, com e sem registro, havia em Águas Lindas apenas 4 licenciamentos de direitos minerais para exploração de material de construção civil, tais como, areia, saibro e cascalho. A tabela 2.3 aponta os tipos comuns de ocorrência de recursos naturais na Bacia do Rio Descoberto.

2.2.2.2 - Produtos Agropecuários

De acordo com a Seduma (2007b), o setor primário tem se destacado na economia do Distrito Federal, embora possua uma contribuição diminuta no PIB local (0,4% em 2004). A avicultura, contando com modernos abatedouros e granjas, conseguiu não só suprir o mercado do DF como também gerou excedentes que são exportados para outros Estados e para o exterior. Na agricultura, entre as hortaliças, as culturas mais importantes são as de

tomate, batata e cenoura, abrindo a oportunidade para um novo nicho no mercado que vem se expandindo nos últimos anos no DF: a agricultura orgânica.

Tabela 2.3 – Ocorrências de recursos naturais na Bacia do Rio Descoberto.

Tipos	Local	Utilização	Ocorrência
Areias Aluvionares: a) Areias Finas; b) Areias Grossas e Cascalho;	a) canal ativo das drenagens principais e de seus afluentes; b) canal ativo e em terraços aluviais das principais drenagens;	a) agregado miúdo na indústria da construção civil e na produção de argamassas; b) agregado miúdo na indústria de construção civil para a fabricação de concreto;	a) Ribeirão Melchior; b) 2 pontos de extração no Ribeirão Melchior e 2 no Rio Descoberto;
Areia Saibrosa e Saibro	no solo;	produção de argamassa para reboco e para obras de base na pavimentação de ruas e rodovias;	7 ocorrências em Águas Lindas;
Argila	de origem fluvial e depositada em planícies de inundação durante o período das cheias;	matéria-prima na indústria da cerâmica vermelha, para a fabricação de tijolos comuns e tijolos furados;	Ribeirão Melchior.

Fonte: CPRM/Embrapa (2003).

As áreas de maior produção agropecuária comercial estão concentradas principalmente nas bacias do Rio Preto, do Alto São Bartolomeu e do Alto da Bacia do Descoberto. Na Bacia do Descoberto, de acordo com o IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a Região Administrativa de Brazlândia, com área de 474,83 km² e 52.698 habitantes, possui 469,59 km² de sua área total ocupada por área rural, com uma população rural de 12.149 habitantes e significativa produção agropecuária.

A expressiva produção rural de Brazlândia tem como responsável o PICAG (Figura 2.15) - projeto agrícola implantado a partir de 1966 pelo INCRA - que ocupa 54% da Região Administrativa de Brazlândia (Terracap/Engea, 1991) e 57% da Área de Proteção Ambiental do Rio Descoberto.

A área do Projeto Integrado de Colonização Alexandre Gusmão apresenta grande produtividade, em especial, de hortifrutigranjeiros, respondendo pelo abastecimento de boa parte do Distrito Federal e, ainda, exporta para outros estados brasileiros. A área do Rodeador, no PICAG, produz, sobretudo, soja e hortaliças, embora em quantidades inferiores às produzidas na Bacia do Rio Preto. Além disso, em outras áreas do PICAG, cultiva-se cenoura

e beterraba com sistemas de irrigação por aspersão. Há, também, intensa produção de morango.

2.3 - Infra-Estrutura Básica

Em relação à cobertura da rede de água, esgoto e coleta de lixo nos domicílios das cidades localizadas no Alto da Bacia do Descoberto, o censo demográfico do IBGE calculou os valores disponíveis na tabela 2.4 para Águas Lindas de Goiás e para Brazlândia.

Tabela 2.4 – Cobertura da rede de água, rede de esgoto e coleta de lixo nos domicílios particulares permanentes do município de Águas Lindas de Goiás e RA-Brazlândia em 2000.

Locais	Domicílios permanentes	Rede de água	Rede de esgoto	Coleta de lixo
	Abs.	%	%	%
Águas Lindas de Goiás	26.388	1,85	0,06	32,78
Brazlândia	13.470	63,09	56,33	85,68

Fonte: Censo Demográfico 2000 - IBGE e DATASUS, 2006 *in* Seduma (2007b).

A infra-estrutura em Águas Lindas é precária, cerca de 63% das casas não têm água tratada e 90% das ruas são de terra batida. A falta de sistema de canalização da água das chuvas e de impermeabilização do solo, a partir da construção de loteamentos em Águas Lindas, deteriora a vegetação que deveria proteger mananciais e o reservatório.

A atividade agrícola sem planejamento também tem impactos negativos sobre a Bacia do Descoberto, mas a área urbana é a que mais causa problemas de degradação hídrica. O crescimento de Águas Lindas faz com que as águas deixem de escorrer superficialmente e ganhem maior vazão ao longo do percurso do rio, formando voçorocas no solo (um dos tipos de erosão, que serão mais bem explicados no próximo capítulo).

Capítulo 3

Impactos Ambientais no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto e Diretrizes do PDOT/2007 para Região

De acordo com Schiavetti & Camargo (2002), ao focar alterações físicas e espaciais relacionadas à falta de planejamento na ocupação do solo em bacias hidrográficas, apresentam-se impactos ambientais, tais como:

- Desmatamento: perda da biodiversidade, aumento da perda de solos, assoreamento dos rios e destruição do ecossistema ciliar.
- Erosão: assoreamento de rios e reservatórios e inutilização de solos férteis.
- Qualidade da água: aumento da poluição hídrica através de resíduos sólidos domésticos e industriais, nutrientes (nitrogênio e fósforo), entre outros, causando a diminuição de sua seção útil, devido ao assoreamento.
- Problemas sociais: aumento da pobreza, do êxodo rural e da favelização, consequência da falta de planejamento e de políticas públicas para controle do processo de inchamento das cidades e sustentabilidade do sistema.
- Urbanização: processos de uso e ocupação do solo sem planejamento e a falta de um controle adequado por parte das autoridades competentes.
- Clima: alterações no micro e macro-clima local e regional.

O impacto de perdas de solo no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto será modelado e estimado nesta pesquisa, sendo objeto de capítulo posterior. Como forma de introduzir conceitos e dados relacionados com essa problemática, neste capítulo serão abordados: as etapas do processo erosivo, os impactos correlacionados observados nesta bacia, bem como as diretrizes propostas no novo Plano de Ordenamento Territorial do Distrito Federal (Seduma, 2007a) que envolvem ações na região.

3.1 - Erosão, Transporte e Deposição de Sedimentos

A sedimentação abrange processos complexos, quais sejam: erosão, deslocamento das partículas por enxurradas ou outros meios até os rios, transporte do sedimento nos cursos

d'água, deposição do sedimento na calha dos rios, lagos e reservatórios e sua compactação (Carvalho, 1994).

Nesse contexto, sedimento refere-se à partícula derivada da fragmentação das rochas, por processo físico ou químico, e que é transportada pela água ou pelo vento do lugar de origem aos rios e aos locais de deposição (Carvalho, 1994). O sedimento em suspensão prejudica a qualidade da água para o consumo humano, necessitando de tempo e dinheiro para removê-lo. Cabe ressaltar, que os problemas criados pelos sedimentos estão presentes nas diversas fases, desde a erosão, transporte, deposição e compactação.

O termo erosão, por sua vez, refere-se ao destacamento e transporte dos constituintes do solo pela ação da água, do vento, gravidade e pela atividade do homem e, em determinadas regiões, pela ação da neve e do gelo (Aciesp, 1987). Embora o processo de erosão do solo ocorra mesmo em ecossistemas naturais, a ação antrópica constitui o principal fator na deflagração dos processos erosivos acelerados (Liebmann, 1979 e Rodrigues, 1982, *in* Silva, *et al.* 2004). Na figura 3.1 encontra-se um esquema geral sobre processos erosivos, com suas diferentes formas, agentes e tipos.

De acordo com Guerra (1999), o processo erosivo causado pelas águas das chuvas – erosão hídrica – ocorre sobre grande parte do nosso planeta, destacando-se como grande responsável pela modelagem da paisagem. Esse tipo de erosão é especialmente atuante nas áreas com clima tropical, onde os totais pluviométricos são maiores do que em outras regiões do planeta, e as chuvas tendem a concentrar-se em determinadas estações do ano.

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, tendo as águas pluviais como agente do processo (Silva *et al.*, 2004).

A erosão hídrica pode ocorrer de distintas maneiras, dentre elas as mais significativas são: a erosão laminar, a erosão em ravinas, a erosão em voçorocas e a erosão em canal. Todas essas espécies de erosão podem ocorrer simultaneamente e em intensidades variadas.

Entre os tipos de erosão hídrica o mais comum é a erosão laminar, que ocorre em grandes áreas com vegetação escassa, e imperceptível na maioria das vezes. A erosão laminar remove uma camada fina e relativamente uniforme do solo pela precipitação pluvial e pelo escoamento superficial (Silva *et al.*, 2004).

Processos Erosivos

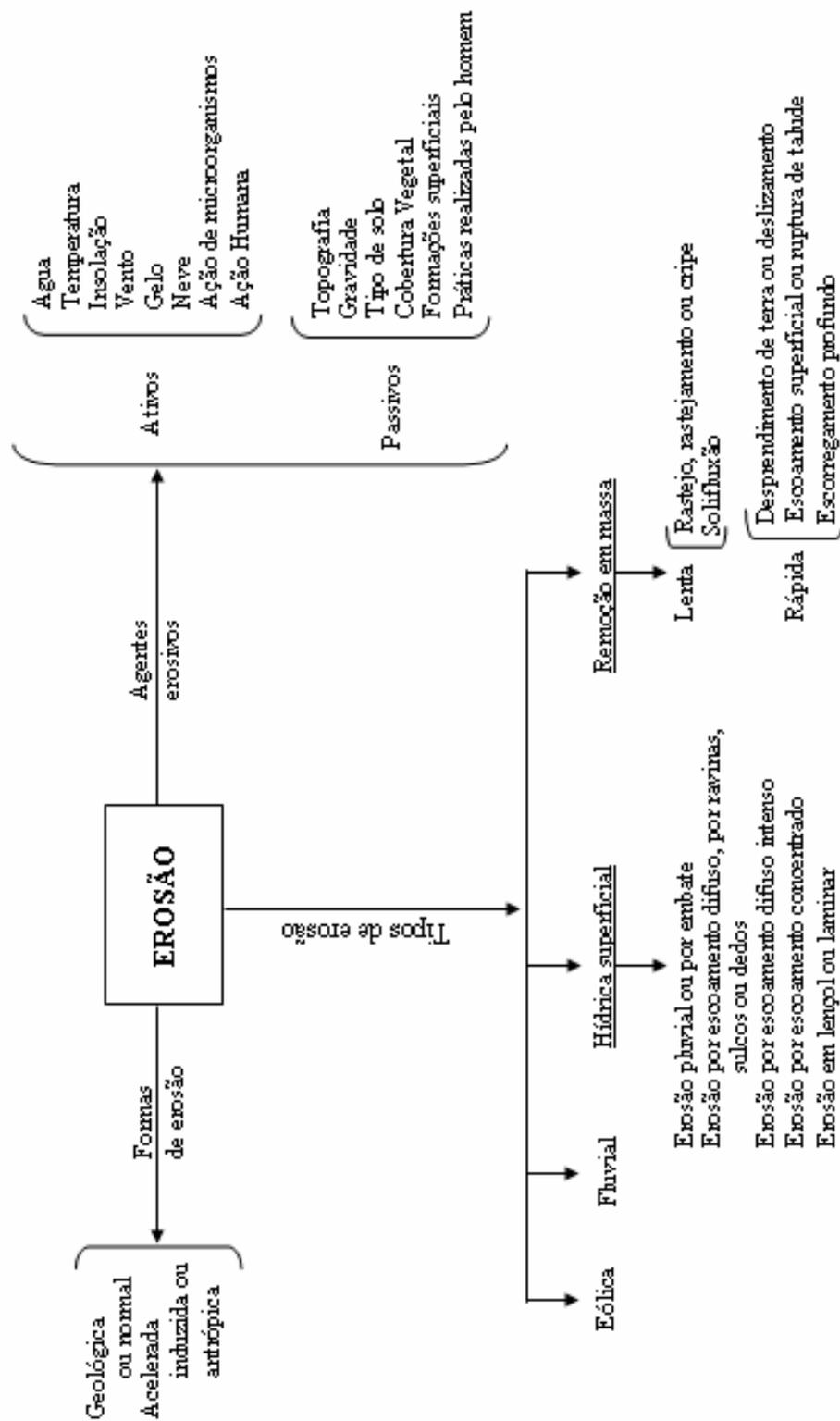


Figura 3.1 – Esquema Geral de Erosão. Fonte: Carvalho (1994).

O destacamento e o transporte do sedimento dependem da forma, tamanho, peso da partícula e das forças exercidas pela ação do escoamento. O sedimento é transportado pelo curso d'água tanto em suspensão quanto no leito, com partículas que rolam ou deslizam, ou mesmo em trocas com partículas que saltam e voltam ao leito (Carvalho, 1994). Com o solo são carregados também pesticidas, metais pesados e nutrientes que podem poluir a água, aumentando o custo em seu tratamento.

Segundo Carvalho (1994), os sedimentos erodidos vão formar depósitos indesejáveis em outros locais. O processo de deposição ocorre quando a força do escoamento reduz até a condição de não poder continuar a deslocar a partícula. O depósito de sedimentos pode ocorrer não apenas próximo ao local de erosão, mas também distante. Esses depósitos podem ser em locais planos, em canais, planícies de inundação, reservatórios, deltas, estuários ou no oceano.

A construção de uma barragem e a formação de um reservatório perturba as condições naturais de um curso d'água. Em relação ao aspecto sedimentológico, o reservatório torna-se um meio natural de retenção do sedimento afluente devido à redução de velocidade da corrente. A compactação do sedimento ocorre quando há um assoreamento, estando o depósito sujeito por muito tempo ao peso da água e ao seu próprio peso. O sedimento compactado é de difícil remoção, passando a ser um impedimento para o desassoreamento (Carvalho, 1994).

Por fim a realização de levantamentos sedimentométricos em reservatórios, a fim de avaliar o nível de assoreamento, depende de alguns fatores, tais como: o valor da acumulação de sedimentos, o tamanho do reservatório e o custo financeiro (Carvalho, 1994). Sem dúvida, o custo financeiro é um fator de grande influência na pequena frequência desses levantamentos em reservatórios brasileiros.

3.2 - Impactos Ambientais no Alto Curso do Rio Descoberto

Vários impactos ambientais correlacionados a processos erosivos têm ocorrido no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto em função de ações antrópicas na região. Observa-se que as conseqüências dessas ações são refletidas no reservatório do Rio Descoberto, ameaçando a quantidade e a qualidade d'água fornecida pela Caesb ao DF. Alguns dos impactos das ações antrópicas podem ser visualizados no contorno do reservatório, por meio das fotos disponíveis nas figuras 3.2 e 3.3.

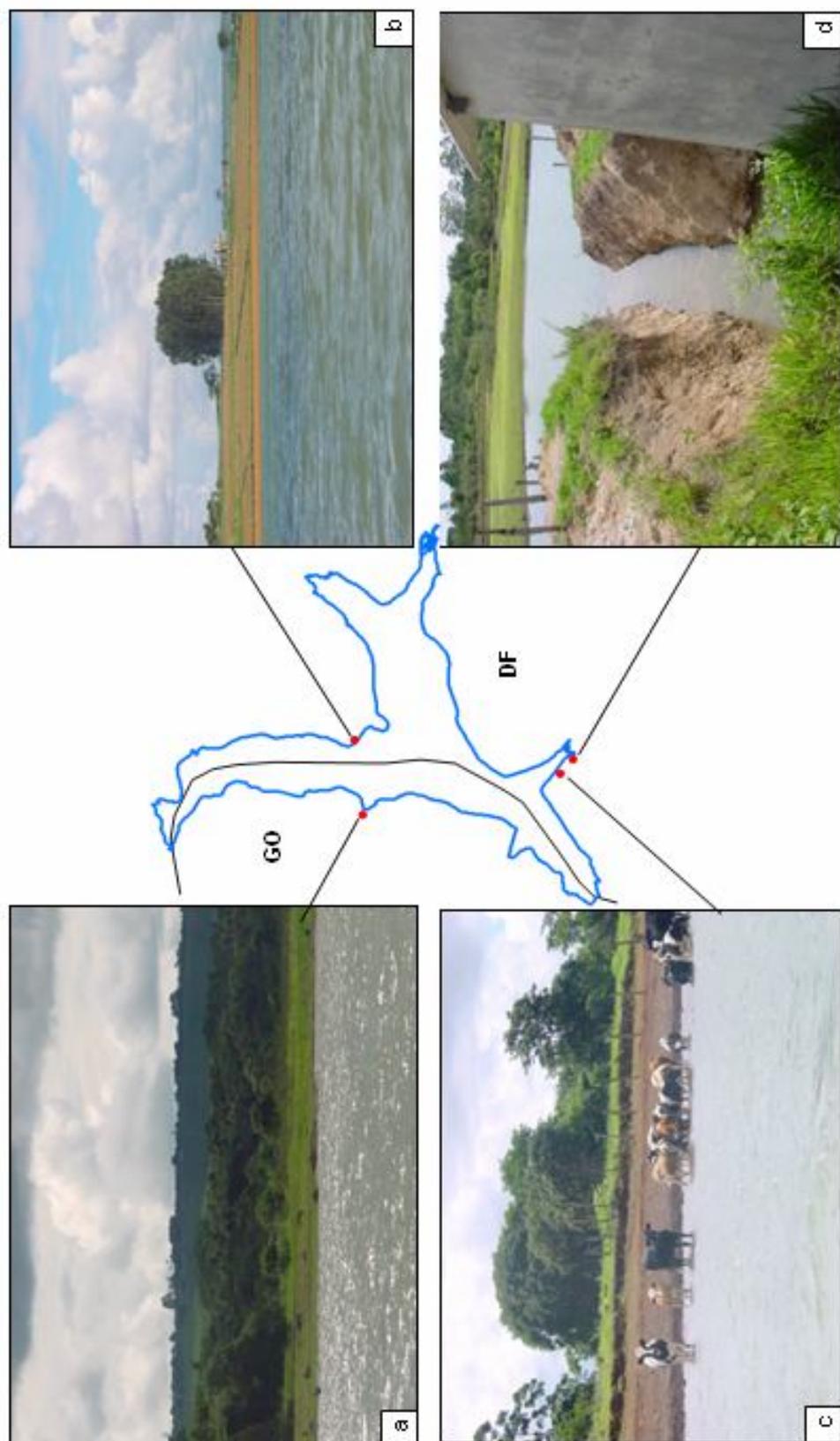


Figura 3.2 – Contorno do reservatório do Descoberto. (a) Vegetação típica de cerrado bem preservada. (b) Benefiteiras junto ao bosque de eucaliptos e solo preparado para plantação próximo ao reservatório. (c) Criação de gado junto à margem do reservatório nas proximidades do Córrego da Rocinha. (d) Captação de água para irrigação. Fotos: Caesb (2003).

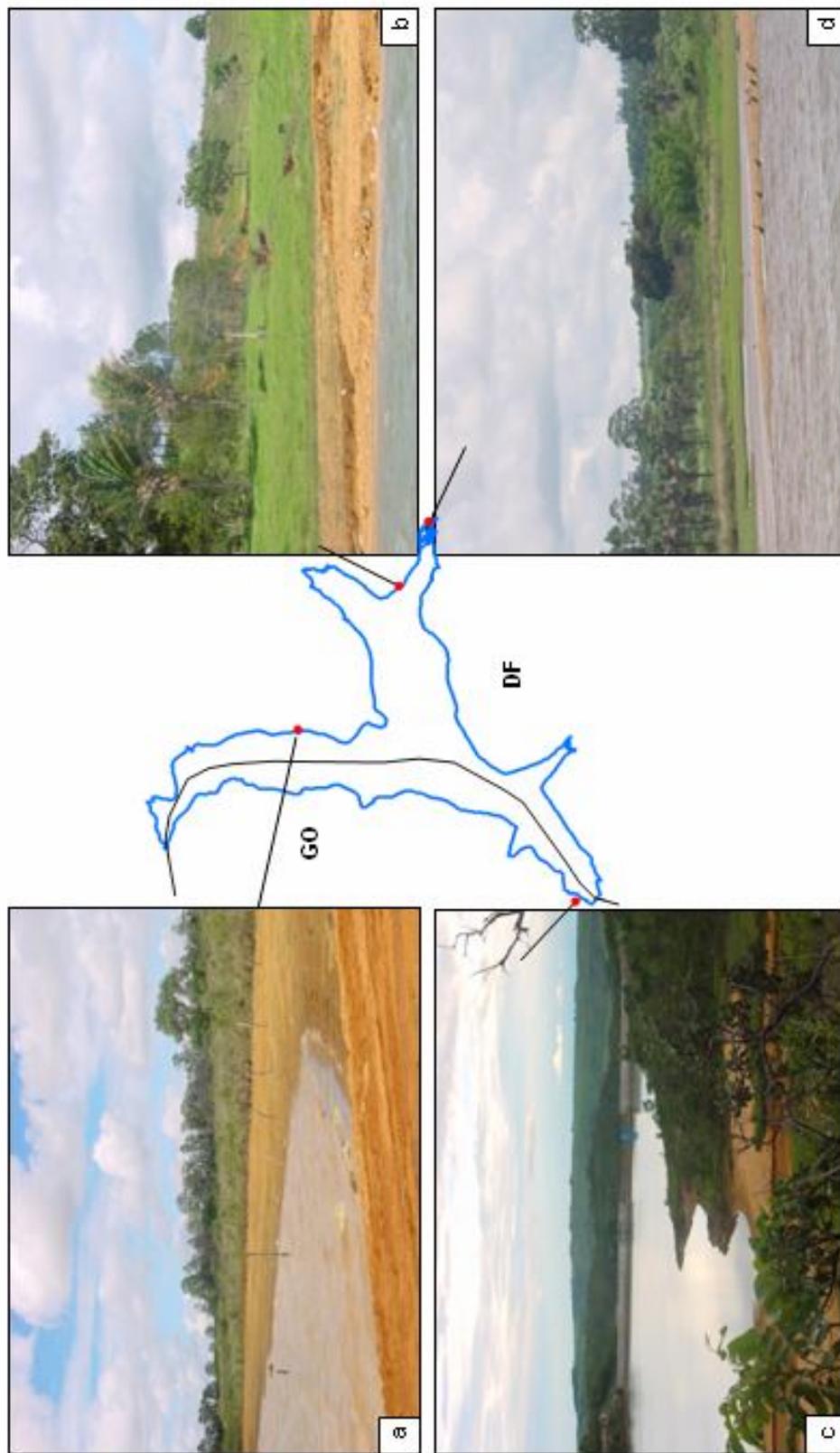


Figura 3.3 - Contorno do reservatório do Descoberto. (a) Cercas avançando sobre o reservatório, nível d'água baixo e vegetação típica de cerrado. (b) Erosão ao fundo e deposição de sedimento próximo à margem do reservatório (próximo ao INCRA 8). (c) Assoreamento próximo à barragem. (d) Acentuado assoreamento próximo ao Ribeirão das Pedras. Fotos: Caesb (2003).

A cidade de Águas Lindas de Goiás, na margem oeste da represa, como mencionado no capítulo anterior, é um exemplo de expansão urbana na bacia decorrente de processos de uso e ocupação do solo sem planejamento e com infra-estrutura urbana muito precária. Recorrentes artigos e reportagens abordam os notórios problemas sociais, econômicos, políticos e ambientais da cidade, destacando-se: a falta de abastecimento de água regular, saneamento básico, extração irregular de material para construção (areia e cascalho) e as conseqüentes erosões. Afora esses fatores, há perigo de contaminação do lençol freático e da água superficial, o que também coloca em risco a qualidade da água do reservatório do Rio Descoberto.

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. Assim, a água do reservatório fica comprometida pelo carreamento de sedimentos para as drenagens, pela disposição inadequada do lixo doméstico, bem como pelo esgotamento dos pequenos mananciais e pela utilização de agrotóxicos.

No Projeto Integrado de Colonização Alexandre é comum a prática de cultivo intensivo de monocultura. Esse tipo de prática, por sucessivos anos, leva o solo não só a um esgotamento nutricional como também a intoxicação porque determinada cultura tende a absorver mais intensivamente alguns nutrientes do que outros. Por tais razões, ocorre a destruição de agregados e aumenta-se a suscetibilidade do solo à erosão (Silva *et al.*, 2004).

Na APA do Descoberto foi estabelecida como Área de Proteção Permanente - APP, onde só é permitida mata nativa numa faixa de 125m de largura ao longo das margens do reservatório do Rio Descoberto e uma faixa de 50 metros de largura em torno das nascentes ao longo das margens dos seus córregos formadores (Caesb, 1995).

Além da remoção da mata nativa nas APP's, também foram proibidas: as atividades potencialmente poluidoras; as obras de terraplanagem e aberturas de canais; as atividades que provoquem erosão e ameacem espécies raras e o uso de agrotóxicos e defensivos agrícolas dos tipos mercuriais e organoclorados (Caesb, 1995). Entretanto, a situação real é bastante diferente, como mostram as figuras 3.2 e 3.3, nas quais podem ser observados impactos ambientais no contorno do reservatório e o desrespeito à faixa de proteção de 125m de largura exigidas em área de APP.

De forma resumida, as conseqüências do uso e a ocupação indevida do solo que têm ocorrido no Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto estão relacionadas à erosão, ao transporte e à deposição de sedimentos na bacia. As figuras 3.4 a 3.7 mostram essa realidade no Córrego da Cachoeira, um dos tributários do reservatório, próximo ao bairro Portal da Barragem, localizado em Águas Lindas de Goiás. As figuras apresentam, ainda, o assoreamento do reservatório.

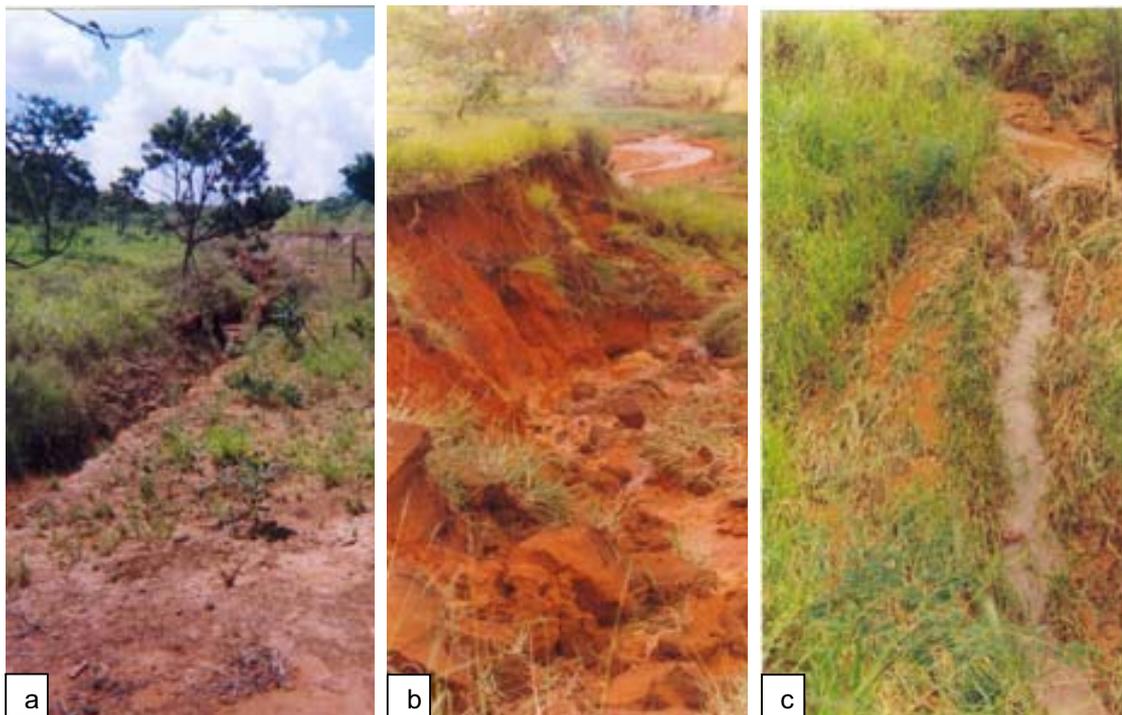


Figura 3.1 – Processo erosivo na sub-bacia do Córrego da Cachoeira. (a) Área degradada próxima ao córrego. (b) Processo de desbarrancamento no leito do córrego. (c) Assoreamento acelerado do canal na época de chuvas. Fotos: Milton da Costa Araújo Filho (2002/2003).



Figura 3.2 – Desequilíbrio no leito do Córrego da Cachoeira. (a) Área com desbarrancamento do leito em função da modificação do uso e ocupação do solo na região. (b) Detalhes da foto “a”. Assoreamento e retrabalhamento do sedimento depositado em um primeiro momento. Fotos: Milton da Costa Araújo Filho (2002/2003).

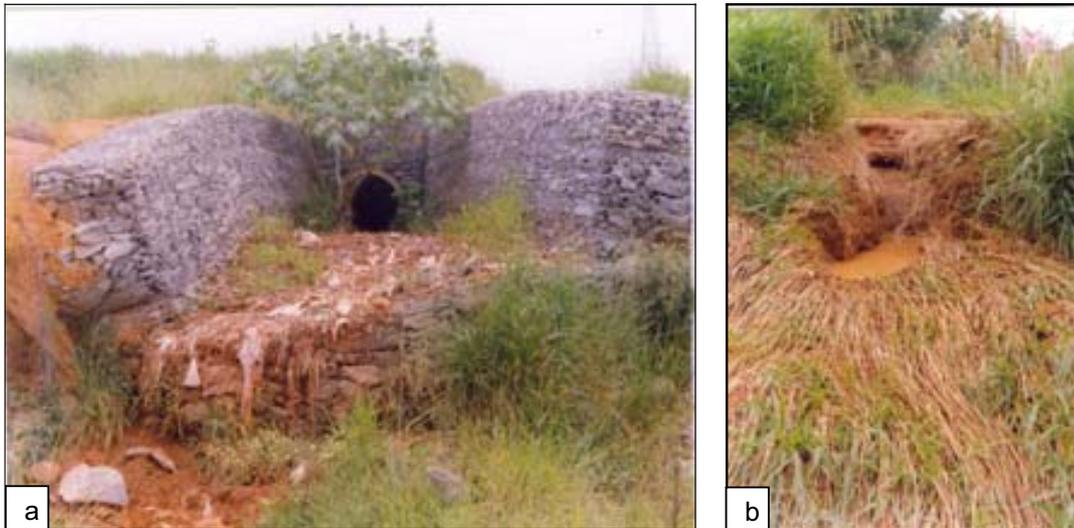


Figura 3.3 – Impactos ambientais na sub-bacia do Córrego da Cachoeira. (a) Tentativa de conter a erosão canalizando o córrego com obra de rocha calcário presa com tela de ferro. Observa-se grande quantidade de lixo sendo carreado, além de espécie Mamona, planta invasora que costuma nascer em áreas com desequilíbrio por ação antrópica. (b) Processo erosivo em função de rua. Na parte superior há uma rua e acima uma faixa em um loteamento. Fotos: Milton da Costa Araújo Filho (2003).



Figura 3.4 – Foz do Córrego da Cachoeira no reservatório do Rio Descoberto em período de seca e de chuvas, respectivamente. (a) Assoreamento do reservatório e retrabalhamento do sedimento. (b) A área assoreada fica coberta pela água na época de chuvas. Fotos: Milton da Costa Araújo Filho (2002/2003).

3.3 - Diretrizes do PDOT/2007 para o Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto

Segundo minuta do Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal (Seduma, 2007a), o desenvolvimento integrado do DF com os municípios limítrofes dependerá do desenvolvimento de planos, programas e projetos conjuntos, firmados entre o Governo do Distrito Federal e as prefeituras, a partir de consórcios públicos. Consta nesse documento que estão entre as prioridades a implementação de ações na a cidade de Águas Lindas de Goiás.

No que se refere ao zoneamento, de acordo com a proposta do PDOT para o Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto há diretrizes para as áreas classificadas como:

- Zona Urbana de Expansão e Qualificação: composta por áreas propensas à ocupação urbana, predominantemente habitacional, e que possuem relação direta com áreas já implantadas;
- Zona Rural de Uso Controlado III (Figura 3.8): pertence à Macrozona Rural, composta, predominantemente, por áreas de atividades agropastoris, de subsistência e comercial, sujeitas às restrições e condicionantes impostos pela sua sensibilidade ambiental e pela proteção dos mananciais destinados à captação de água para abastecimento. A zona III compreende predominantemente áreas da bacia do alto Rio Descoberto, na qual se localiza o PICAG;
- Reserva Biológica do Descoberto: pertence à Macrozona de Proteção Integral e é regida por legislação específica, observadas as disposições estabelecidas no respectivo plano de manejo quanto ao uso e ocupação do solo.

Em síntese, as diretrizes da minuta do PDOT para estas áreas orientam:

- À Zona Urbana de Expansão e Qualificação na Área de Proteção Ambiental do Descoberto: compatibilizar o zoneamento ambiental com a ocupação urbana consolidada e planejar as ocupações futuras de acordo com a capacidade de suporte da bacia hidrográfica do Lago Descoberto;
- À Zona Rural de Uso Controlado III: deve ser observada a condição especial do Lago do Descoberto, como maior manancial destinado ao abastecimento no Distrito Federal, e as correspondentes restrições de uso e ocupação compatíveis com a manutenção das águas

destinadas ao abastecimento público, em quantidade e qualidade adequadas, de acordo com as seguintes diretrizes do PDOT/2007:

I - proibir o parcelamento das glebas rurais para chácaras de recreio e em lotes de dimensão inferior ao permitido em zoneamento ambiental da Área de Proteção Ambiental do Descoberto;

II - proibir o desenvolvimento de culturas extensivas de ciclo curto em áreas de declividade superior a 30% (trinta por cento);

III - exigir das edificações, quando permitidas pela legislação vigente, a implantação de sistema adequado de coleta, tratamento e disposição de esgotos sanitários;

IV - proibir a disposição final de resíduos sólidos urbanos.

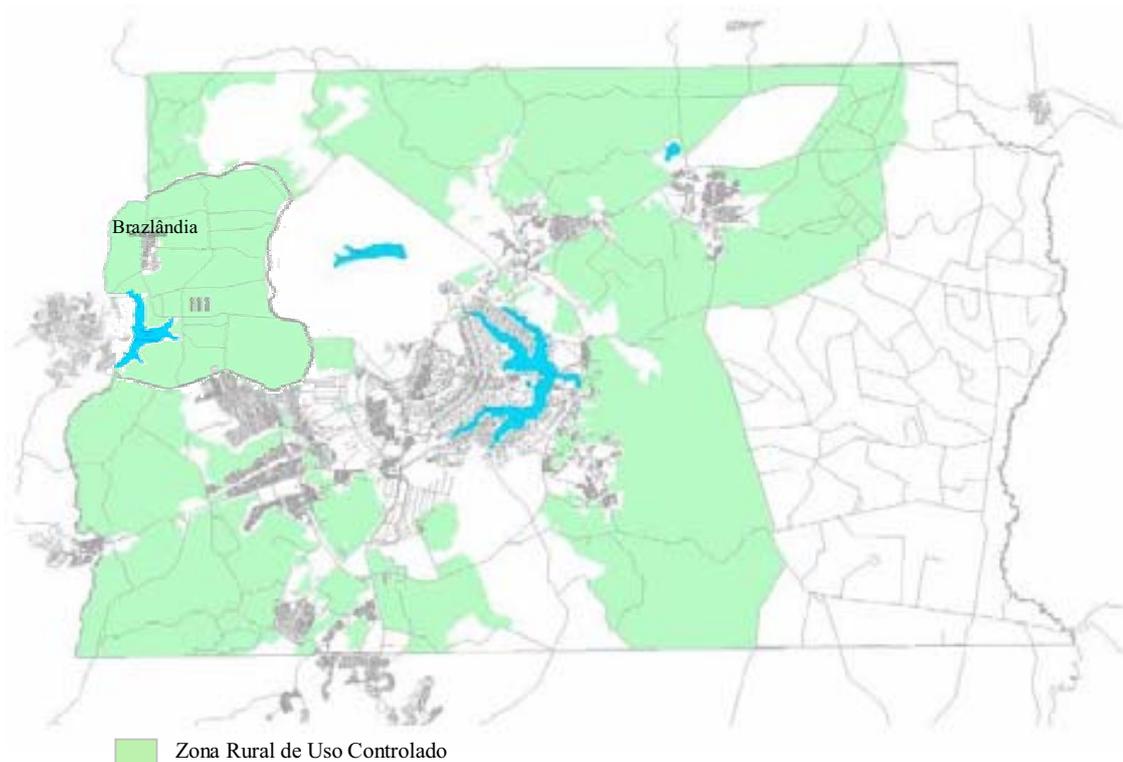


Figura 3.5 – Zona Rural de Uso Controlado III. Fonte: Seduma (2007a).

- Reserva Biológica do Descoberto: deverão ser estabelecidos corredores ecológicos ou outras conexões entre esta e as demais unidades de conservação classificadas na Macrozona de Proteção Integral. Isto será realizado por meio de programas e projetos que incentivem a manutenção de áreas remanescentes de cerrado, em especial no vale do Rio São Bartolomeu, no Lago Paranoá e nas bacias do Alto Descoberto e do Rio Maranhão.

Capítulo 4

Trabalhos Anteriores

Neste capítulo serão apresentadas referências aos trabalhos relevantes realizados no Distrito Federal e na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto, ou ainda em outras localidades do Brasil, sobre assuntos correlatos aos materiais e aos métodos empregados nesta pesquisa.

Rêgo (1997) realizou um mapeamento geotécnico da Porção Sul da APA da Bacia do Rio Descoberto em uma área de aproximadamente 125 km² na escala 1:100.000, baseando-se em técnicas de geoprocessamento, trabalho de campo e de laboratório. Os mapas produzidos tiveram como finalidade orientar investigações locais e a ocupação urbana.

Em Carmo (2001) foi estudada a geoquímica das águas e sedimentos de corrente da Bacia do Descoberto em duas épocas do ano: estação seca e estação chuvosa. Foram avaliadas, ainda, a qualidade da água e a constituição dos sedimentos. A identificação de possíveis ocorrências de contaminação mais elevadas, suas possíveis origens e as conseqüências a médio e longo prazo também foram objetos da pesquisa. Outro trabalho semelhante na região foi o de Moreira (2005) que realizou uma caracterização Geoquímica do lodo na estação de tratamento de água localizada na barragem do Rio Descoberto.

A pesquisa de Santos (2003) fez uma avaliação das reais condições ambientais às quais o reservatório do Rio Descoberto tem sido submetido, levando em conta parâmetros como: matéria orgânica, mineralogia, granulometria e geologia. Apesar de apresentar pontos com maior enriquecimento para determinados metais característicos de ação antrópica, os sedimentos de fundo do reservatório não apresentaram contaminação ou poluição.

Dutra (2003) realizou um levantamento do meio físico da região de Águas Lindas de Goiás, visando a gestão da água subterrânea e o ordenamento territorial, por intermédio do mapeamento litológico e estrutural, da proposta de compartimentação geomorfológica, do estudo dos solos e, ainda, da definição de aquíferos e das áreas de recarga natural desta região.

Reatto *et al.* (2003a), por sua vez, teve como finalidade o mapeamento das classes de solo do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto. Foram representadas 99 unidades de mapeamento, classificadas segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999). Como resultado final foi gerado um mapa da bacia na escala 1:100.000, contendo as classes de solo, as respectivas áreas e a hidrografia.

Reatto *et al.* (2003b) focou a caracterização das principais fitofisionomias do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto e correlacionou-as com suas respectivas classes de solos apresentadas na bacia. O Alto Curso do Rio Descoberto também foi objeto do trabalho de Cardoso (2003), no qual estudou a relação solo-paisagem da bacia.

Ávila (2005) relacionou o uso e o manejo do solo da Bacia do Córrego Capão Comprido (sub-bacia do Descoberto) com a quantificação da contribuição de nitrogênio, fósforo e sedimentos para o reservatório do Rio Descoberto, no DF. Outro aspecto abordado foi a influência da adubação na quantidade de nitrogênio transportada pelo escoamento superficial após as adubações. A concentração de fósforo apresentou comportamento semelhante ao dos sólidos suspensos, notando uma correlação entre a concentração dessas variáveis com a intensidade da precipitação. Pôde-se concluir neste trabalho que o aumento da cobertura do solo reduz drasticamente o transporte de sólidos suspensos.

O trabalho da CPRM/Embrapa (2003) elaborou um levantamento da RIDE (Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno), abordando temas como: geologia, geomorfologia, recursos hídricos, solos, aptidão agrícola, geoquímica, uso atual do solo e cobertura vegetal/unidades de conservação. As informações resultantes deste estudo foram divulgadas em relatórios, mapas e bases de dados. Os mapas relativos aos referidos temas estão na escala 1:250.000 e abrangem uma área de 24.550 km².

No que concerne a trabalhos da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal na Bacia do Rio Descoberto destaca-se Caesb (2003) no qual foi realizado um estudo de concepção e de viabilidade técnica e econômica para elevação da crista do vertedouro da barragem do Rio Descoberto, no Distrito Federal. Este trabalho incluiu a reavaliação dos estudos hidrológicos da bacia e o levantamento topobatimétrico mais recente do reservatório do Rio do Descoberto, realizado em novembro de 2002.

Em relação ao planejamento de uso e ocupação do solo no DF há esforços a partir de 1977, quando foi elaborado o PEOT (Plano Estruturador de Organização Territorial), o qual constituiu na primeira medida administrativa concreta objetivando o ordenamento territorial do Distrito Federal. Em seguida, foi elaborado o POT (Sistema Normativo de Uso e Ocupação do Solo do Distrito Federal) que em 1985 consolidou as propostas contidas no PEOT, confirmando a área de expansão urbana por ele definida, além de detalhá-lo e complementá-lo por meio de uma proposta de macro-zoneamento envolvendo grandes áreas ambientais com usos predominantes e exclusivos. Logo depois, em 1986, foi desenvolvido o POUSO (Plano de Ocupação e Uso do Solo), o qual ratificou o entendimento firmado pelo POT, redefinindo alguns pontos do macro-zoneamento em virtude de transformações ambientais.

Na década de 90, teve início o PDOT/DF (Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal), consolidando as diretrizes firmadas por todos os planos anteriores. O PDOT é um instrumento básico de política territorial e de orientação para os agentes públicos e privados que atuam na produção e gestão das localidades urbanas, de expansão urbana e rural do território do Distrito Federal (Seduma, 2004). Portanto, trata-se de instrumento essencial para harmonizar as ocupações urbanas com as questões ambientais.

O PDOT de 1997 confirmou o eixo oeste/sudoeste como de ocupação prioritária porque esta área apresentava menor grau de restrições ambientais, destacando a necessidade de aperfeiçoamento de investimentos em infra-estrutura urbana. Reconheceu, ainda, o vetor nordeste/sudeste, a ser monitorado e controlado na área de maior incidência de condomínios.

De acordo com a Seduma (2007b), as revisões do PDOT devem ser discutidas com a sociedade para buscar uma conciliação dos diversos interesses envolvidos nesta questão. A proposta do PDOT encaminhada no final de novembro de 2007 pelo Executivo para tramitação na Câmara Legislativa foi objeto de discussão por meio de audiências públicas com a comunidade. O novo PDOT definirá quais porções do território do Distrito Federal serão passíveis de ocupação nas próximas décadas. Uma das novidades deste Plano é a criação de áreas de contenção urbana para frear a ocupação irregular do solo no DF. Ademais, o PDOT apresenta propostas para: estrutura viária; a regularização fundiária; revitalização de áreas degradadas; novas áreas de expansão urbanas e de desenvolvimento econômico; e instalações de pólos multifuncionais. As novas diretrizes do PDOT serão

importantes na simulação e na avaliação dos cenários tendenciais de áreas localizadas no Alto Curso da Bacia do Descoberto que se encontram no território do Distrito Federal.

Quanto a estudos no DF sobre assoreamento de reservatórios destaca-se Morais (2003), que desenvolveu um estudo para comparar o assoreamento entre o reservatório do Descoberto (desprotegido) e o de Santa Maria (ambiente protegido). Seu objetivo foi gerar uma comparação útil na elaboração de diretrizes para o controle de erosões na borda destes reservatórios e no monitoramento de seus impactos na capacidade de armazenamento.

Neste sentido, Morais (2003) estudou fatores como a geologia e o clima das áreas das duas bacias, devido ao importante condicionamento que esses fatores têm sobre a topografia e sobre os solos. Os solos e sua posição topográfica foram abordados de modo a determinar suas influências em termos da erosibilidade e desta como fornecedora de material para o assoreamento. Outro fator estudado foi a influência da ação antrópica como objeto de pesquisa sócio-econômica para verificar a conscientização dos moradores locais quanto aos problemas de preservação ambiental. Um dos resultados do estudo de Morais foi mostrar a importância da vegetação na proteção dos solos como agente que diminui a habilidade à erosão por ações antrópicas.

Ainda sobre a abordagem da pesquisa de Morais (2003), o assoreamento no reservatório do Descoberto e no de Santa Maria foram estimados com medições sobre o espelho d'água destes. As estimativas de assoreamento possibilitaram a caracterização da lâmina de água e a coleta de dados para a interpretação das espessuras dos sedimentos. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que a geração potencial de sedimentos em Santa Maria é mínima e por conseqüência os processos de assoreamento desde a construção da barragem em 1970 são muito limitados. A Barragem do Descoberto, por sua vez, apresentou processo de assoreamento ativo e intensificado não apenas com a ampliação da ocupação da cidade de Brazlândia, mas também pela implantação da cidade de Águas Lindas de Goiás, pela ocupação de vários condomínios e, sobretudo com a densificação de atividades agrícolas na região. Morais (2003) destacou a importância de sua pesquisa no entendimento do processo de assoreamento de uma barragem e a necessidade de estimativas futuras, aprimoradas e mais precisas.

Outras referências acerca de análise de assoreamento de reservatórios, mas em localidades distintas ao DF e à Bacia do Descoberto, estão Gunkel *et al.* (2003) e Roig *et al.*

(2005). Conforme Gunkel *et al.* (2003), 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), apresentam sérios problemas de assoreamento relacionados à erosão hídrica e ao transporte de sedimentos.

No que tange à aplicação da EUPS (Equação Universal de Perda de Solo), algumas pesquisas foram realizadas. Baptista (1997) apresentou em termos de zona e diagnosticou qualitativamente a severidade dos impactos ambientais ocasionados pela perda de solo por erosão laminar no DF calculada pela EUPS por meio de técnicas de geoprocessamento. Foram apresentadas também limitações conceituais e ajustes que devem ser adotados para melhoria do modelo, visando estimativas de perda de solo por erosão laminar para grandes áreas.

Sem considerar os fatores antrópicos e de cobertura vegetal, Bloise *et al.* (2001) utilizou a EUPS na Bacia do Olaria-DF, localizada na porção mais elevada da APA da Bacia do Descoberto. Como resultado final foi gerado o mapa de potencial de erosão da bacia, demonstrando que os locais mais susceptíveis à erosão estão relacionados às declividades mais altas e aos solos de alta erodibilidade como os cambissolos e os solos hidromórficos.

Dois outros trabalhos que aplicaram a EUPS foram o de estimativa da perda de solo por erosão laminar na Bacia do Rio São Bartolomeu-DF, empregando técnicas de geoprocessamento (Alves, 2000) e o de predição de erosão e aporte de sedimentos na Bacia do Rio Paracatu - MG/GO/DF (Silva, 2001).

Outrossim, cita-se, como aplicação da EUPS no Brasil, fora da realidade de bioma cerrado, o estudo de Chaves (1994) acoplado a SIG sobre erosão no Vale do Rio São Francisco, no qual foram feitas adaptações nos fatores topográficos e obtiveram-se níveis aceitáveis de precisões das predições. Há também a pesquisa de Roig (2005), que utilizou a EUPS para avaliar a erosão na Bacia do Paraíba do Sul.

Além das mencionadas pesquisas realizadas no Brasil sobre estimativa de perdas de solo utilizando a EUPS tem-se: Valentin *et al.* (2008), Apolinário *et al.* (2006), Araújo (2006), Santos *et al.* (2006), Tamozi & Guimarães (2005), Galdino *et al.* (2003), Fujihara (2002), entre outras. Apolinário *et al.* (2006) comparou a aplicação no Distrito Federal de dois

métodos de estimativa de perdas de solo: EUPS - Equação Universal de Perdas de Solo (Wischmeier & Smith, 1978) e MMF - Morgan, Morgan e Finney (Morgan, 1995).

Em relação a pesquisas em relação ao parâmetro LS no Brasil temos Carvalho *et al.* (1997), que propôs uma metodologia para estimar a distância horizontal do comprimento de rampa por meio de técnicas de geoprocessamento. Outro exemplo de pesquisa sobre o fator topográfico é o trabalho de Carvalho *et al.* (2001), que confeccionou mapa de susceptibilidade à erosão a partir da Equação Universal de Perdas de Solo.

Em Carvalho & Guimarães (2001) foi implementado um ambiente computacional para o cálculo do fator topográfico (fator LS), além de analisar o emprego da área de contribuição no cálculo deste parâmetro da EUPS. Já em Gameiro (1997) foram avaliados métodos para obtenção dos fatores L e S da equação EUPS em uma microbacia, por meio de geoprocessamento.

No concernente à avaliação de metodologias de determinação do cálculo de áreas de contribuição, as quais influenciam diretamente na estimativa do fator topográfico da EUPS, está Ramos *et al.* (2003). Esse trabalho teve como objetivo a obtenção de um mapa de área de contribuição o mais confiável possível, para contribuir de maneira relevante para estudos de previsão e definição de áreas de instabilidade. Para isto, foi calculada a área de contribuição a partir de duas metodologias distintas. A primeira, por transferência de fluxo para uma única célula e a segunda, por transferência de fluxo distribuída. A metodologia de transferência de fluxo distribuída (Quinn *et al.*, 1991) mostrou-se mais eficiente. Outra pesquisa neste mesmo sentido foi a de Freitas *et al.* (2005), que identificou os fatores deflagradores da erosão em voçoroca a partir da simulação do fluxo acumulado em área urbana.

Barreto Neto (2004) desenvolveu uma modelagem dinâmica de processos ambientais, modelando o escoamento superficial e as perdas de solo causadas por mudanças no uso e ocupação da terra. As perdas de solo foram estimadas pela MEUPS (Equação Universal de Perdas de Solo Modificada) e foi dada maior ênfase à modelagem hidrológica (fator R - erosividade das chuvas). Os modelos foram desenvolvidos com o programa de modelagem ambiental PCRaster e aplicados na bacia hidrográfica do Rio Quilombo (Vale do Ribeira-SP).

O estudo de Rennó (2003) também aborda a modelagem hidrológica utilizando o software *Spring*, o SASHI (Sistema de Análise de Simulação Hidrológica). O sistema construído foi testado em uma sub-bacia do rio Corumbataí-SP.

Destacam-se, ainda, as seguintes pesquisas brasileiras sobre modelagem ambiental: Pedrosa (2003), que desenvolveu em TerraML um ambiente computacional para modelagem dinâmica espacial para ser usado em aplicações ambientais; e Ruhoff (2004), que implementou uma simulação computacional de escoamento superficial e de processos erosivos em *Spring* (Legal) na bacia do Arroio Grande-RS. O último autor teve como objetivo subsidiar o desenvolvimento de práticas conservacionistas e de preservação dos recursos hídricos da bacia hidrográfica.

Utilizando o simulador Dinamica (*Landscape Dynamic System*) há uma série de estudos voltados para modelagem dinâmica da paisagem da bacia Amazônica, em especial, modelagem de desmatamento, quais sejam: Soares-Filho (1998) e Soares-Filho *et al.* (2002, 2003, 2004a, 2004b e 2006). Há também alguns trabalhos utilizando o Dinamica com foco em modelagem de expansão urbana e dinâmica intra-urbana, por exemplo, Almeida *et al.* (2003), Godoy (2004) e Gonçalves *et al.* (2007). Outra aplicação existente do simulador Dinamica é em modelagem de cenários tendenciais aplicados ao zoneamento ecológico-econômico (Castro *et al.*, 2007). Por fim, no que se refere à utilização do *software* Dinamica para modelagem de perdas de solo em bacias hidrográficas a partir de simulações de mudanças no uso e na ocupação do solo, como proposto no presente trabalho, não foram encontradas referências bibliográfica correlatas.

Capítulo 5

Materiais e Métodos

A pesquisa foi dividida em duas etapas e segue o esquema apresentado na figura 5.1, cujos componentes serão abordados ao longo deste capítulo.

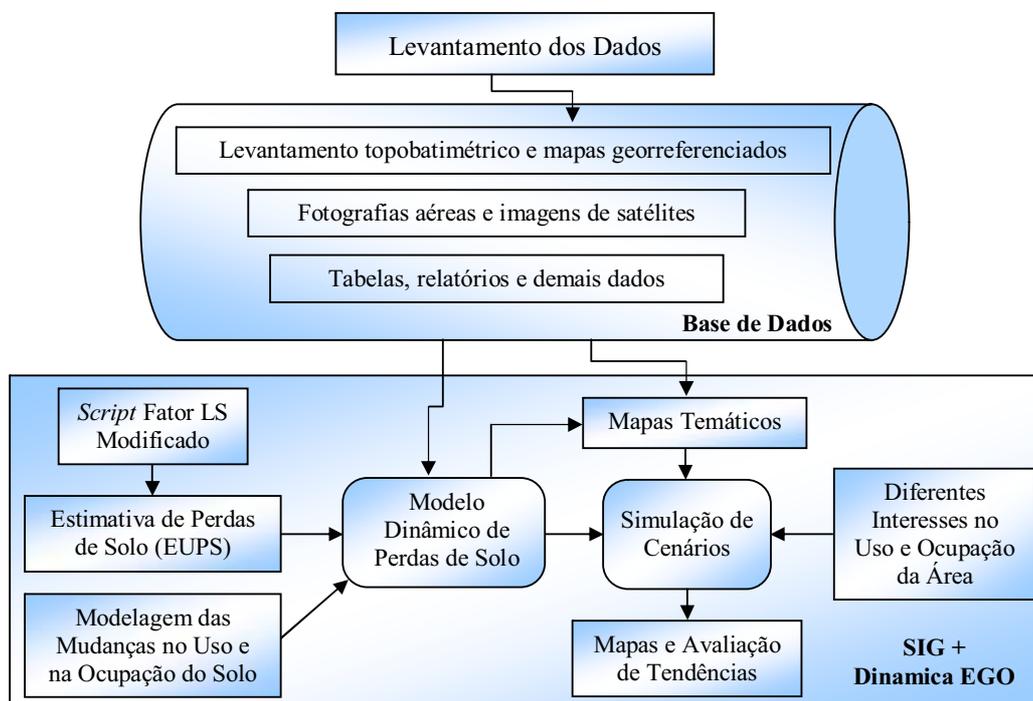


Figura 5.1 – Sequência de métodos propostos na pesquisa.

A primeira etapa desta pesquisa corresponde aos trabalhos de:

- reunião, organização, avaliação e interpretação da base de dados (item 5.1.1, página 58);
- geração do modelo digital do terreno (método descrito no item 5.1.2, página 59);
- proposição de um método para o cálculo do fator topográfico na EUPS (método descrito no item 5.1.5, página 64);
- proposição de avaliar a influência de dois métodos de cálculo da direção e da acumulação de fluxo na estimativa do fator LS na EUPS (método descrito no item 5.1.6, página 68);

- seleção dos métodos adotados no cálculo dos demais parâmetros da EUPS (parâmetros descritos nos sub-itens do item 5.1.7, páginas 71);
- aplicação da EUPS e geração de mapas temáticos de erosão atual e potencial do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto (item 5.1.8, página 76).

Na segunda etapa da pesquisa dedicou-se à modelagem dinâmica de perdas de solo, que em síntese constituiu os trabalhos de:

- seleção dos mapas dinâmicos e estáticos de entrada de dados ao modelo dinâmico de perdas de solo (item 5.2.2, página 82);
- análise multitemporal e construção de um modelo conceitual das mudanças no uso e na ocupação do solo (item 5.2.3, página 83);
- elaboração do modelo da dinâmico de perdas de solo (item 5.2.4, página 83);
- calibração e validação do modelo (item 5.2.5, página 92);
- geração e análise de prognósticos de perdas de solos para o Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto a partir de mapas com cenários tendenciais de curto e médio prazos gerados pelo modelo da dinâmico de perdas de solo (item 5.2.6, página 95).

Na modelagem proposta no esquema da figura 5.1 e no tratamento digital dos dados necessários foram utilizados:

- os *softwares* licenciados: Envi 4.3 e ArcGis 9.2;
- as extensões para ArcGis: *Spatial Analyst*, *3D Analyst*, *ArcHydro*, *Taudem*, entre outras;
- o *software* de modelagem dinâmica: Dinamica EGO (*Environment for Geoprocessing Objects*) na versão 1.0.6;

5.1 - Primeira Etapa

5.1.1 - Base de Dados

A base de dados para a aplicação dos métodos propostos neste trabalho, no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto, conta com o seguinte acervo:

- dados do SICAD 2004 na escala 1:10.000: curvas mestras, curvas intermediárias, pontos cotados, hidrografia, limite do reservatório e estradas;

- dados pluviométricos de 30 estações localizadas no Distrito Federal e entorno, de responsabilidade da Caesb, Embrapa e Inmet. Os intervalos variam de 1961 até 2006;
- mapa de solos do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto na escala 1:100.000 (Reatto *et al.*, 2003a);
- imagens de satélites: SPOT-DF de 2003; LandSat TM 221/071 de 23/05/2003; LandSat TM 221/071 de 1994 e LandSat TM 221/071 de 1984.

5.1.2 - Modelo Digital do Terreno

O Modelo Digital de Terreno (MDT) é utilizado para denotar a representação quantitativa de uma grandeza que varia continuamente no espaço, geralmente associado à altimetria. A criação do MDT é um passo importante porque ele é um elemento essencial na obtenção de diversos parâmetros utilizados nas modelagens e nas simulações, tais como: direção e acumulação de fluxo de água.

Um dos métodos de geração do MDT mais referenciado por estudiosos em modelagem de bacias hidrográficas como um dos melhores modelos matemáticos para geração de um *grid* hidrologicamente consistente é o incorporado no módulo TOPOGRID. Esse módulo é usado pelo ArcInfo/ArcGis e é baseado em estudo de Hutchinson (1988, 1989), autor do programa ANUDEM.

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. Esse algoritmo conserva não apenas as características locais do relevo, mas também a continuidade do entorno, considerando de uma forma ampla toda a tendência global da superfície para gerar a elevação de um determinado ponto.

No que se refere ao algoritmo TOPOGRID, ele utiliza uma técnica iterativa de grade ou *grid* variável, a qual considera parâmetros e tolerâncias definidos pelo usuário e características do relevo, convergindo para o valor de altitude da célula. Além disso, este método procura reduzir o número de depressões espúrias no MDT, visto que as paisagens naturais costumam ter predominância de picos em relação a depressões porque a água, ao promover erosão na superfície, a modela para que tenha escoamento superficial contínuo.

5.1.3 - Equação Universal de Perdas de Solo - EUPS

Entre os modelos de predição de erosão hídrica, a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS ou USLE – *Universal Soil Loss Equation*) é um dos mais aceitos e utilizados, apresentando grande aceitação também no Brasil.

A EUPS (Wischmeier & Smith, 1978) 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. Ele trabalha com a inter-relação de seis fatores independentes que influenciam diretamente na perda de solo, entre os quais: clima, solo e topografia (fatores naturais); e uso da terra, manejo e práticas conservacionistas (fatores antrópicos). A EUPS (Equação 1) é expressa como se segue:

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

onde,

- A = perda de solo, em t/ha.ano;
- a) Fatores que dependem das características naturais do meio físico:
 - R = fator de erosividade das chuvas, em Mj.mm/ha.h.ano;
 - 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 (%);
- b) Fatores relacionados às formas de ocupação e uso do solo (ação antrópica):
 - C= fator uso e manejo (adimensional);
 - P = fator práticas conservacionistas (adimensional).

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*), essa equação ainda é a mais utilizada em pesquisas por geoprocessamento. Isso se deve ao menor número de variáveis necessárias ao seu cálculo, tornando-a mais simples em relação aos demais modelos.

Para ser empregada no Brasil, em região de cerrado, a EUPS precisa de ajustes, uma vez que seus parâmetros apresentam limitações frente às peculiaridades intrínsecas deste bioma. 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 estão relacionadas aos parâmetros erosividade, erodibilidade e manejo (Bertoni & Lombardi Neto, 1993; Denardin, 1990).

Entre as limitações não detectadas na EUPS estão: ao longo de uma vertente ocorrem, simultaneamente, os processos de erosão e de deposição, além da erosão que se observa nos canais fluviais. Outra limitação da EUPS está no fato de que essa equação não considera a deposição em pés de encosta e não incorpora o processo de erosão em voçorocas. Esses fatos são responsáveis por subestimativas de perda de solo pelo modelo, quando ocorrem processos como o de voçorocamento numa região (Kreznor *et al.*, 1992).

Apesar das limitações encontradas nas estimativas de perdas de solo pela EUPS, o Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto, bacia hidrográfica que se encontra no bioma cerrado, não possui parâmetros e séries históricas suficientes para o cálculo de um método mais complexo. Assim, o emprego da equação EUPS permitirá estimar a susceptibilidade à erosão nessa bacia uma vez que essa equação apresenta praticamente todos os fatores envolvidos no processo de erosão laminar. Dessa forma, para estimar a erosão atual e a erosão potencial, no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto, adotou-se o esquema de aplicação da EUPS da figura 5.2.

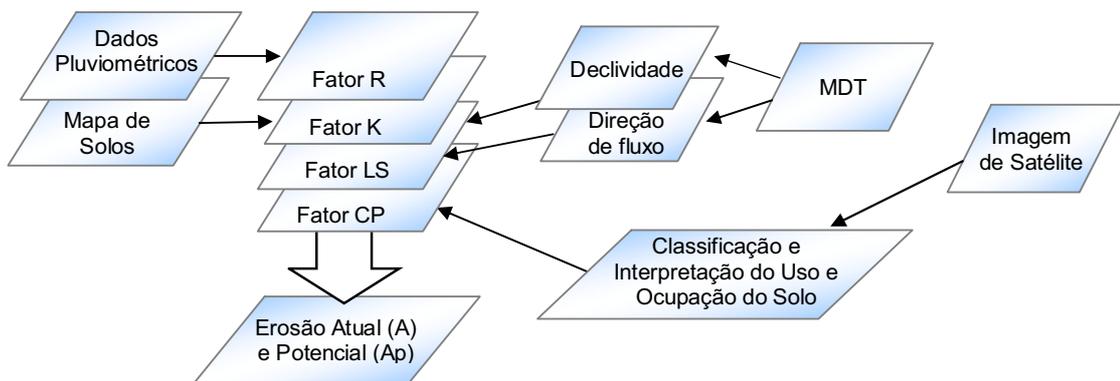


Figura 5.2 – Aplicação da EUPS.

Nesta pesquisa, como contribuição à EUPS, foi dada atenção especial ao cálculo do fator topográfico, deixando de empregar o fator LS original (Wischmeier & Smith, 1978), e adotando uma alternativa de cálculo que chamamos de “Fator LS Modificado”. O fator LS e os passos empregados no seu cálculo são descritos e analisados a seguir.

5.1.4 - Fator LS - Fator Topográfico

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

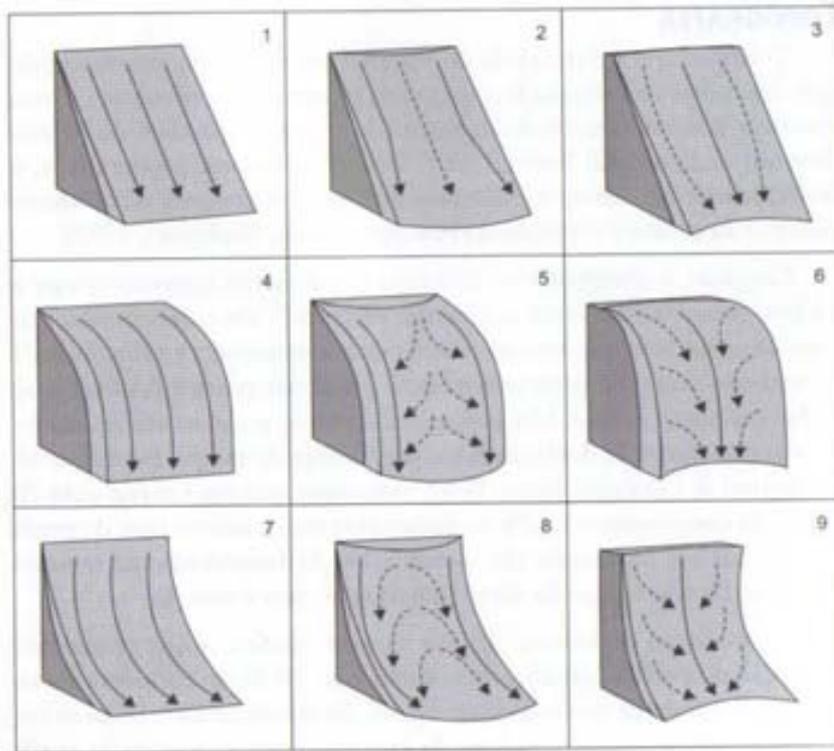
Dentre os fatores topográficos, a declividade (S) de um terreno, possivelmente, é o mais importante no condicionamento da gênese e evolução do processo erosivo (Rodrigues, 1982, *in* Silva *et al.*, 2004).

Apesar de assinalado na literatura que o comprimento de rampa (L) não tem muito peso na determinação da taxa de perdas de solo por erosão hídrica, este fator não é menos importante do que o declive. À medida que o caminho percorrido vai aumentando, não somente as águas se tornam mais volumosas, como também a velocidade de escoamento aumenta progressivamente e o aumento da energia resultante se traduz em erosão. O escoamento inicia o processo erosivo no local, enquanto os trechos médios apresentam declividade mais baixa e os topos das colinas podem ter declividades quase nulas (casos 4, 5 e 6 da figura 5.3).

Analisando a figura 5.3, pode-se estabelecer que se os trechos baixos apresentarem declividade baixa, os médios declividade moderada e os altos declividade acentuada, têm-se a caracterização de perfis côncavos (casos 7, 8 e 9 da figura 5.3). Também é possível concluir que se os valores de declividade dos trechos analisados forem similares entre si, tem-se um perfil longitudinal próximo ao retilíneo (casos 1, 2 e 3 da figura 5.3).

Conforme as características do terreno há o transporte de partículas para a parte mais baixa da rampa, em função da enxurrada que vai se formando. Como a enxurrada tende a passar pelo mesmo caminho, ocorre formação de sulcos, que vão se aprofundando até

encontrar o lençol freático, formando, então, as conhecidas voçorocas (Bertoni & Lombardi Neto, 1993).



- 1 - Vertente retilínea nos sentidos vertical e horizontal.
- 2 - Vertente retilínea no sentido vertical e convexa no sentido horizontal.
- 3 - Vertente retilínea no sentido vertical e côncava no sentido horizontal.
- 4 - Vertente convexa no sentido vertical e retilínea no sentido horizontal.
- 5 - Vertente convexa nos sentidos vertical e horizontal.
- 6 - Vertente convexa no sentido vertical e côncava no sentido horizontal.
- 7 - Vertente côncava no sentido vertical e retilínea no sentido horizontal.
- 8 - Vertente côncava no sentido vertical e convexa no sentido horizontal.
- 9 - Vertente côncava nos sentidos vertical e horizontal.

Seta pontilhada – Tendência de fluxo de canal inicial.

Seta cheia – Tendência de fluxo de canal concentrado.

Figura 5.3 - Geometria e declividade em encostas retilínea, convexa e côncava.

Fonte: Rodrigues (1982) in Silva *et al.* (2004).

Depreende-se, ainda, que as formas geométricas de encostas expostas, os segmentos de geometria côncava no sentido vertical e no horizontal (caso 9 da figura 5.3) são zonas preferenciais à ocorrência de processos erosivos, em razão da convergência de segmentos que aceleram a ruptura entre materiais de diferentes características. Assim, a relação entre forma erosiva e geometria das encostas serve de subsídio à detecção de áreas

mais propícias aos processos de ravinamento, sulcos e voçorocamento (Oliveira & Meis, 1985, *in* Silva *et al.*, 2004).

O fator comprimento de rampa (L), da EUPS é dado pela equação de Wischmeier & Smith (1978):

$$L = (l / 22,1)^m \quad (2)$$

onde:

- L = fator de comprimento de rampa (adimensional);
- l = comprimento da vertente (m);
- m = coeficiente que depende da declividade;
 - m = 0,5 se o grau de declividade em porcentagem for $\geq 5\%$;
 - m = 0,4 para o intervalo de 3,5 a $< 4,5\%$;
 - m = 0,3 para o intervalo de 1 a 3%; e
 - m = 0,2 para o grau de declividade $< 1\%$.

Segundo Wischmeier & Smith (1978), o fator de declividade (S) da EUPS é função da declividade média da vertente:

$$S = 65,41 \sin^2 \theta + 4,56 \sin \theta + 0,065 \quad (3)$$

- S = fator de declividade (adimensional);
- θ = ângulo de declividade.

No estudo sobre o fator LS da EUPS, encontram-se diversas alternativas para o cálculo integrado deste parâmetro. Como exemplos estão as propostas de diversos autores, tais como: Wischmeier & Smith (1978), Moore & Burch (1986), Bertoni & Lombardi Neto (1993) e Desmet & Govers (1996). A seguir será descrito o método adotado no cálculo do fator topográfico neste trabalho.

5.1.5 - Fator LS Modificado

A figura 5.4 apresenta a seqüência de passos empregados no cálculo do fator topográfico modificado.

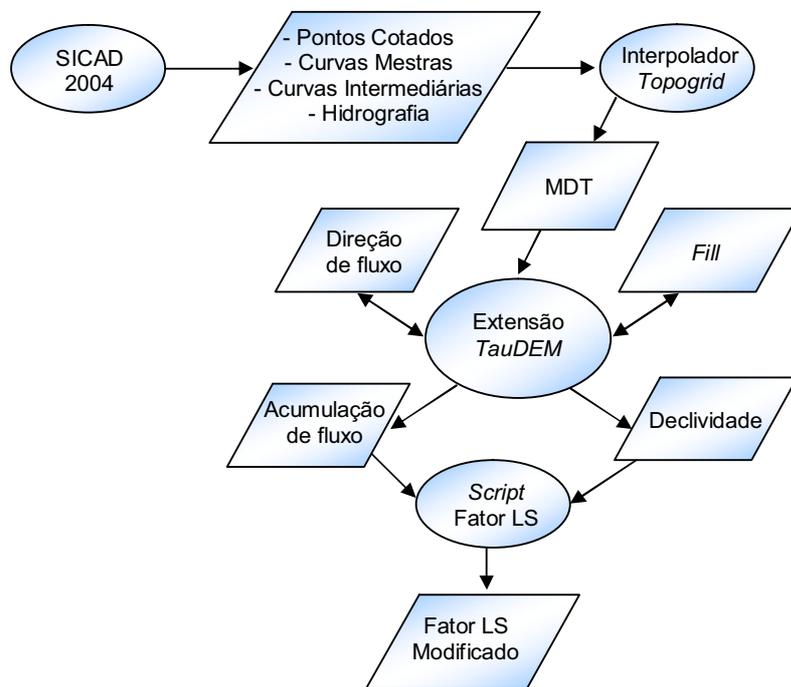


Figura 5.4 – Esquema do fator LS modificado.

De acordo com Moore & 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 para descrever os processos de erosão associados ao fluxo laminar sobre declives.

Segundo Moore & 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. Dessa forma, os parâmetros originais do fator LS da EUPS são mantidos, incluindo-se também a forma da bacia.

O fator LS modificado foi obtido aplicando-se um *script* com a equação de Moore & Burch (1986) (Valentin *et al.*, 2008). A equação de Moore & Burch (1986) foi baseada na EUPS de Wischmeier & Smith (1978), considerando a produção de sedimentos por unidade de área proporcional ao fator LS:

$$LS = (l / 22,13)^m \left((0,043x^2 + 0,3x + 0,43) / 6,613 \right) \quad (4)$$

sendo,

- l = comprimento da vertente (m);
- x = declividade média da vertente (%);
- m = coeficiente que depende da declividade;
 - $m = 0,3$ para $x \leq 3\%$;
 - $m = 0,4$ para $x = 4\%$; e
 - $m = 0,5$ para $x \geq 5\%$;

tal que $LS = 1$, ao adotar os valores de referência $l = 22,13$ e $m = 9\%$.

O fator LS modificado (LS_p) obtido pela equação de Moore & Burch (1986) é dado por

$$LS_p = (al / 22,13)^{0,4} (s / 0,0896)^{1,3} \quad (5)$$

onde,

- LS_p = 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;
- l = comprimento da vertente (m); e
- s = seno do ângulo da vertente com a horizontal;

e de acordo com o padrão de referência: $LS_p = 1$ para $l = 22,13$, $m = 9\%$ ($\text{seno } \theta = 0,0896$).

O efeito de ravinamento concentra o fluxo superficial e por meio disso eleva a intensidade e a velocidade do fluxo. Mosley (1972, 1974) in Moore & Burch (1986) demonstrou que o ravinamento aumenta a perda de solos de vertentes e Wischmeier & Smith (1978), por sua vez, notaram que em declividades mais íngremes e mais suscetíveis à formação de ravinas, o expoente m da equação 4 provavelmente será considerado superior a 0,5. Assim, conclui-se que o fluxo laminar tem capacidade de transporte de sedimentos inferior e uma vez que o ravinamento é iniciado, aumentam as ravinas e a capacidade de transporte de sedimentos. Com o aumento na produção de sedimentos, há conseqüente

acrécimo no fator LS da EUPS. Esses autores apresentaram análises do potencial de ravinamento sobre o fator LS_p , entre as quais destaca-se a de Moore & Burch (1986), que chegaram a uma forma estendida da equação 5, ao incluir de modo simplificado o efeito de ravinamento. A equação é definida como:

$$LS_p = (a/22,13)^{0,4} (s/0,0896)^{1,3} Z \quad (6)$$

onde Z corresponde a um fator de ravinamento que modifica o fator LS e para $Z = 1$ em fluxo laminar, a equação anterior pode ser reduzida à equação 5.

Antes da aplicação do *script* para o cálculo do fator LS modificado, necessário se fez cumprir os passos apresentados na figura 5.4 a fim de obter os parâmetros a serem utilizados no modelo. Assim, para geração do MDT (Modelo Digital do Terreno), optou-se pelo algoritmo de interpolação TOPOGRID, conforme descrito no item 5.1.2.

Os parâmetros declividade, *fill*, direção e acumulação de fluxo foram produzidos a partir da extensão *TauDEM* (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Models*) para ArcGIS 9.x. A declividade corresponde ao raio máximo de cada célula em relação às suas vizinhas com base na topografia da região.

O *fill*, conhecido como preenchimento das depressões, é utilizado para corrigir o MDT. Quando uma depressão não corresponde a um lago, mas 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.

Para o cálculo do fator LS adotando a equação 5, 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 fluxo d'água (Moore & Burch, 1986), a área de contribuição A corresponde a área mais inclinada do terreno de um elemento de contorno de largura b (Figura 5.5). A descarga por unidade de largura q por b produzido por excesso de chuva constante e uniforme, i , é dada pela equação

$$q = A(i/b) = Vy \quad (7)$$

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 5.5 – Diagrama de fluxo d'água em uma bacia parcial. A = área parcial da bacia; λ = comprimento parcial da bacia; b = largura do elemento de contorno e q = descarga por unidade de largura.

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 nesta pesquisa.

5.1.6 - Métodos de Determinação de Direção de Fluxo: D8 e D ∞

Como mencionado no item anterior, o cálculo do fator LS adotando a equação de Moore & Burch (1986) baseia-se na representação da direção de fluxo em uma bacia hidrográfica (Figura 5.5). O cálculo da direção de fluxo é necessário, por exemplo, para determinar o fluxo d'água e de sedimentos na bacia, o qual pode ser obtido a partir de um MDT em SIG (Tarboton, 1997).

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 & 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 5.6-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.

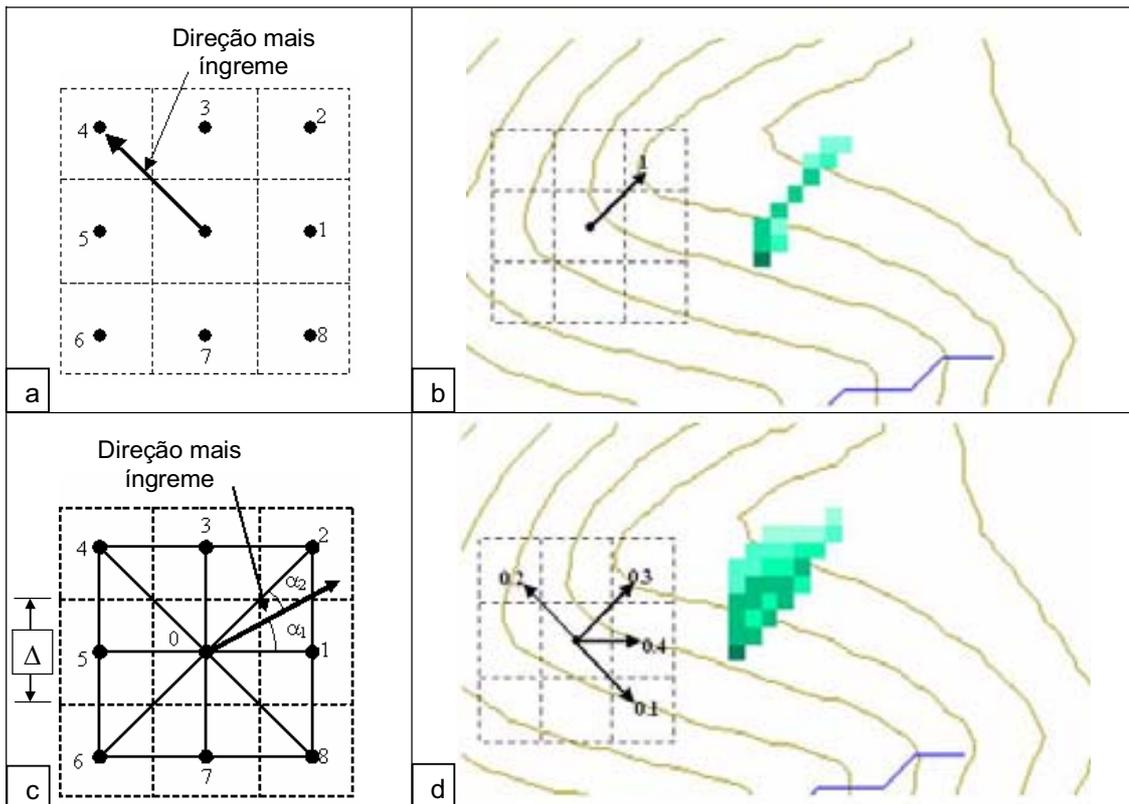


Figura 5.6 - Métodos de determinação de direção de fluxo. (a) Cálculo pelo método D8. (b) Exemplo de resultado em *grid* pelo D8. (c) Cálculo pelo método D^∞ . (d) Exemplo de resultado em *grid* pelo D^∞ . Fonte: Tarboton (2003).

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. Muitas vezes as depressões e as áreas planas são originadas de erros resultantes da interpolação numérica na geração do MDT.

Tarboton (1997) propôs o método D^∞ (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 & Mark, 1984), Múltiplas Direções de Fluxo (Quin *et al.*, 1991), ou pelo algoritmo desenvolvido por Lea (1992), entre outros. Os itens a seguir também foram relevantes para Tarboton desenvolver o procedimento D_{∞} :

- a necessidade de evitar ou de minimizar dispersão;
- a necessidade de evitar influência do *grid*, devido sua orientação numérica;
- a precisão com que as direções de fluxo são calculadas;
- a obtenção de um *grid* simples e eficiente baseado na estrutura de armazenamento em matriz;
- a robustez: habilidade em obter resultados confiáveis de dados complexos, e também de dados com depressões e com áreas planas.

O método D_{∞} (Figura 5.6-c) oferece melhores resultados, em especial quando comparado aos obtidos pelo tradicional D8 (Figura 5.6-a e 5.6-b), porque representa de forma mais real o caminho seguido pelo fluxo d'água. Na representação numérica, o fluxo pelo método D_{∞} é particionado entre uma ou mais das 8 células vizinhas, como exemplificado nas figuras 5.6-c e 5.6-d. 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

$$\alpha_1 = \text{atan}\left(\frac{e_1 - e_2}{e_0 - e_1}\right) \quad (8)$$

e

$$S = \sqrt{\left(\frac{e_1 - e_2}{\Delta}\right)^2 + \left(\frac{e_0 - e_1}{\Delta}\right)^2} \quad (9)$$

Neste procedimento, a direção de fluxo (representada como uma quantidade contínua entre 0 e 2π) 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, $\pi/2$, π , $3\pi/2$) 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 5.6), a declividade é representada pelos vetores (s_1, s_2) , dados pelas equações 10 e 11:

$$s_1 = (e_0 - e_1)/d_1 \quad (10)$$

e

$$s_2 = (e_1 - e_2)/d_2 \quad (11)$$

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 12 e 13:

$$r = \tan^{-1}(s_2/s_1) \quad (12)$$

e por

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2} \quad (13)$$

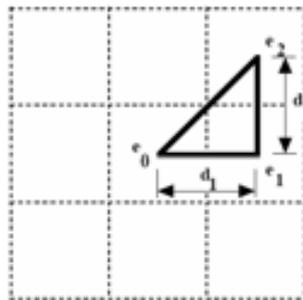


Figura 5.7 – Variáveis para o cálculo da declividade em uma face simples.
Fonte: Tarboton (1997).

5.1.7 - Demais Parâmetros da EUPS

5.1.7.1 - Fator R - Erosividade da Chuva

A erosividade da chuva é um índice numérico que expressa a capacidade da chuva e da enxurrada, em dada localidade, de causar perda do solo em uma área desnuda, ou seja, sem proteção. O fator R depende de características físicas das chuvas, quais sejam: intensidade, duração, distribuição e tamanho das gotas (Wischmeier & Smith, 1958).

Segundo Silva *et al.* (2004), as gotas da chuva que golpeiam o solo são um agente que contribui para o processo erosivo em pelo menos três formas:

- a) desprendem partículas do solo no local que sofre o impacto;
- b) transportam, por salpicamento, as partículas desprendidas;

c) imprimem energia, em forma de turbulência, à água superficial.

O cálculo do fator R é relativamente complexo porque para se obter um R confiável, estima-se que sejam necessários de 10 a 20 anos de coleta de dados (Wischmeier & Smith, 1978; Carvalho *et al.*, 1989). Apesar da importância agrícola da região dos cerrados, ainda são escassas informações sobre a erosividade das chuvas.

Os dados totais de chuva ou médias mensais e anuais têm pouco significado em relação à erosão. A apresentação dos dados de chuvas totais diários, limitados pelas observações realizadas a cada 24 horas, também não tem grande significado em relação à erosão, uma vez que a chuva não se distribui uniformemente no período de um dia. A intensidade (mm h^{-1}), por sua vez, é o fator mais importante e, juntamente com a duração, determina a chuva total.

Bertoni & Lombardi Neto (1993), entre outros autores, testaram diversos índices de erosividade da chuva para sua adoção como parâmetro representativo na EUPS para solos brasileiros. O índice EI_{30} , desenvolvido por Wischmeier & Smith (1978), foi apontado pela grande maioria como o mais adequado à realidade na faixa intertropical. Esse índice é o resultado do produto da energia cinética da chuva (E) pela sua intensidade máxima em qualquer período de 30 minutos consecutivos (I_{30}). Segundo esses autores, o impacto da gota de chuva, a turbulência e o escoamento superficial acham-se bem combinados nesse índice, daí sua elevada correlação com as perdas de solo.

Dessa maneira, obtendo-se os valores EI das chuvas mensais em cada estação pluviométrica e somando-os, será obtido o valor anual da erosividade para o local. O valor de R, portanto, é a média dos valores anuais de EI para um longo período de tempo (superior a 20 anos):

$$R = \sum_{i=1}^n (EI_{30})_i \quad (14)$$

onde,

- R = erosividade, em MJ.mm/ha.h;
- n = número de eventos de chuva no ano;
- I_{30} = intensidade máxima em 30 minutos;

O valor médio do índice de erosividade determinado por Lombardi Neto & Moldenhauer (1992) em estudo para uma série histórica de 22 anos de precipitação no

município de Campinas – SP, no qual encontraram altos coeficientes de correlação ($R^2=0,991$), é dado pela equação (15):

$$EI_{30} = 67,355(r^2 / P)^{0,85} \quad (15)$$

onde,

- EI = média mensal do índice de erosividade, em MJ.mm/ha.h;
- r = média do total mensal de precipitação, em mm;
- P = média do total anual de precipitação, em mm.

Embora a chuva seja caracteristicamente um fenômeno contínuo no espaço, medidas pluviométricas são feitas apenas em alguns pontos do terreno. Assim, a extrapolação dos dados observados para toda a área deve ser feita de maneira bastante criteriosa. Reichardt *et al.* (1995) observaram que um ponto de observação não representou áreas distantes a 1000m dele, considerando-se as médias pluviométricas diárias, mensais ou mesmo trimestrais. Os mesmos autores concluíram que médias pluviométricas anuais poderiam ser extrapoladas até 2500m distante do ponto de observação.

Diversas técnicas podem ser utilizadas para se extrapolar medidas pontuais de chuva para toda a área, destacando-se: Médias Ponderadas pelo Inverso do Quadrado da Distância (IDW), *Spline* e *Kriging*. Independente da técnica de interpolação utilizada, os resultados da espacialização de dados pontuais recebem influência, basicamente, pela quantidade e distribuição destes pontos de observação.

5.1.7.2 - Fator K – Erodibilidade dos Solos

O significado do fator erodibilidade do solo (K) é diferente de erosão do solo (Wischmeier & Smith, 1978). A erodibilidade de um determinado solo representa a sua maior ou menor susceptibilidade à erosão, mesmo quando os fatores LS, C e P permanecem constantes. Portanto, o fator K é uma característica intrínseca do solo, que busca quantificar a “intensidade de erosão por unidade de índice de erosão da chuva (EI) para um solo específico que é mantido continuamente sem cobertura, mas sofrendo as operações culturais normais em um declive de 9% e comprimento de rampa de 25m, em (t/ha)/(Mj.mm/ha.h)” (Carvalho, 1994; Wischmeier & Smith, 1978).

Segundo Silva *et al.* (2004), a erosão não é a mesma em todos os solos. As propriedades físicas exercem diferentes influências na resistência do solo à erosão, em especial a estrutura, que é o modo como se arranjam as partículas; a textura, que compreende o agrupamento das partículas em classes conforme o tamanho; a taxa de infiltração, a permeabilidade, a densidade e a porosidade; as características químicas, sendo o conteúdo de matéria orgânica a mais importante; e, ainda, as propriedades biológicas do solo.

Visando utilizar a EUPS de forma mais rápida e com o menor custo, diversos métodos têm sido desenvolvidos para determinação indireta da erodibilidade, com base nas características físicas e químicas de cada solo. Uma forma de estimar o valor de K, de forma indireta, o qual foi utilizado neste trabalho, é o nomograma desenvolvido por Wischmeier *et al.* (1971), figura 5.8.

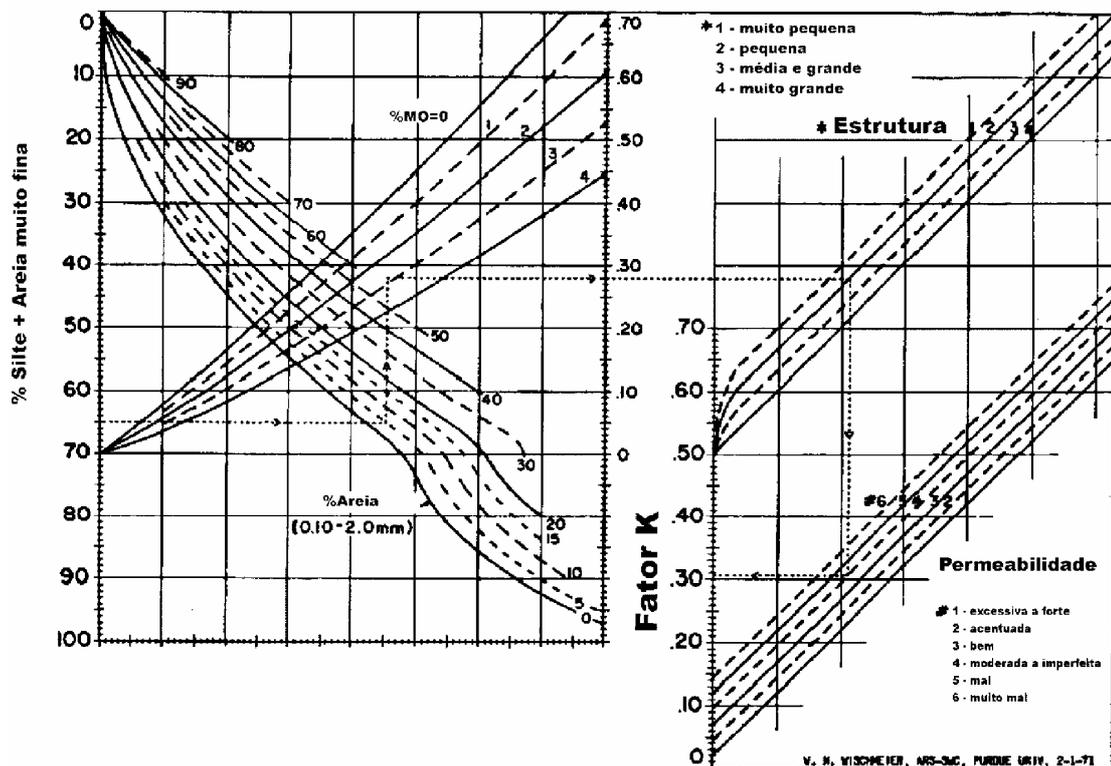


Figura 5.8 – Nomograma para estimar a erodibilidade (K). Fonte: Wischmeier *et al.* (1971).

5.1.7.3 - Fator CP – Uso, Manejo e Práticas Conservacionistas

De acordo com Silva *et al.* (2004), os dois últimos fatores da EUPS (C e P), assim como o fator K, são onerosos e demoram fornecer resultados definitivos e exatos. Além disso, são os únicos fatores que consideram a participação antrópica no processo.

Segundo Wischmeier & Smith (1978), o fator C, uso e manejo, representa a relação entre as perdas de solo de um terreno com certo tipo de cobertura e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto. Já o fator P, prática conservacionista, é a relação entre as perdas de solo esperadas de um terreno que foi cultivado, adotando-se determinada prática conservacionista, e as perdas quando se planta no sentido do declive (morro abaixo).

Em relação ao fator C, quanto maior a densidade da cobertura vegetal, maior é a sua importância na redução da remoção de sedimentos no processo de escoamento superficial e na conseqüente conservação do solo. Ademais, nota-se que o tipo e a porcentagem de cobertura vegetal influenciam na redução dos efeitos erosivos naturais, podendo reduzir a energia cinética da chuva e minimizar seu impacto sobre o solo e, conseqüentemente, reduzir a formação de crostas sobre a sua superfície (Schiavetti & Camargo, 2002).

A tabela 5.1 apresenta os valores de P para as principais práticas conservacionistas utilizadas na agricultura do Brasil conforme Bertoni & Lombardi Neto (1993).

Tabela 5.1 - Fator P em função das práticas adotadas.

Prática Conservacionista	Fator P
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em curvas de nível	0,5
Alternância de capinas com o plantio em curvas de nível	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2
Terraceamento	0,1

Fonte: Carvalho (1994).

Chaves (1994) estimou valores do fator P para a Região Nordeste: P = 1,0, para áreas com plantio em desnível, e P = 0,5 para áreas com plantio em contorno. Esse autor atribuiu valor de P = 0,75 para áreas agrícolas dos municípios do Vale do São Francisco (média ponderada de plantio morro abaixo e plantio em contorno, com base nos dados de Bertoni & Lombardi Neto, 1993) e P = 1,0 para o restante do Vale.

De acordo com Stein *et al.* (1987), quando o objetivo é definir formas mais adequadas de produção agrícola, minimizando os impactos gerados sobre o meio físico, as

variáveis antrópicas da EUPS devem ser tratadas separadamente. Porém, quando se busca a espacialização dos fenômenos, usando geoprocessamento, os fatores C e P podem ser analisados pelo uso e ocupação do solo e expostos na forma integrada CP. Nessa integração, os autores adotaram um valor constante de P igual a 1 para a pior situação quanto às perdas de solo em função das práticas conservacionistas.

Buscando-se correlacionar as classes de uso e ocupação do solo com as variáveis CP integradas, Stein *et al.* (1987) propôs os valores da tabela 5.2. Nessa integração, os autores adotaram um valor constante de $P = 1$. Esse valor foi definido pela dificuldade em estabelecer valores confiáveis de P utilizando técnicas de geoprocessamento, principalmente nas classificações de imagens de sensoriamento remoto para o mapeamento do uso do solo em escala regional.

5.1.8 - Erosão Atual (A) e Potencial (Ap)

O mapa de erosão atual (A) do Alto Curso da Bacia do Rio Descoberto será gerado pelo produto dos fatores da Equação Universal de Perdas de Solo, aplicando-se a equação 1, por meio do comando *Raster Calculator* da extensão *Spatial Analyst para ArcGis* 9.2. As estimativas de perda de solo para a região de estudos serão avaliados comparando-os com valores já definidos em outros estudos, por exemplo, os valores disponíveis nas tabelas 5.3 e 5.4.

O cálculo da erosão potencial (Ap) segue os mesmos passos empregados para a erosão atual e justifica-se pela importância em quantificar a perda de solo sob o pior cenário hipotético possível, isto é, solo exposto e sem práticas conservacionistas, atribuindo-se o valor 1 para os fatores C e P.

Tabela 5.2 - Integração de CP em função das classes de uso e ocupação do solo.

Grupo	Categoria	CP (adimensional)
1. Vegetação de porte alto a médio, cobertura total do terreno		0,00004
	1a. Floresta	0,00004
	1b. Vegetação secundária	0,00004
	1c. Cerradão	0,00004
	1d. Reflorestamento	0,0001
2. Vegetação de porte médio a baixo, cobertura total do terreno		0,01035
	2a. Cobertura residual	0,0007
	2b. Cerrado	0,0007
	2c. Cultura permanente	0,02
	2d. Cana-de-açúcar	0,05
3. Vegetação de porte médio a baixo, cobertura parcial do terreno		0,25
	3a. Cobertura residual	0,25
	3b. Cultura perene	0,25
4. Vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura total do terreno		0,01
	4a. Cobertura residual	0,01
	4b. Pastagem	0,01
	4c. Cultura temporária	0,20
	4d. Campo cerrado	0,01
	4e. Campo natural	0,01
5. Vegetação de porte baixo a rasteiro, cobertura parcial do terreno		0,10
	5a. Cobertura residual	0,10
	5b. Pastagem	0,10
	5c. Cultura temporária	0,20
6. Ocupações naturais diversas		0,00
	6a. Várzea	0,00
	6b. Espelho d'água	0,00
7. Ocupações antrópicas diversas		0,00
	7a. Área urbana	0,00
	7b. Estrada	0,00

Fonte: Stein *et al.* (1987).

Tabela 5.3 - Valores de perdas de solo para o parâmetro potencial de erosão.

Intervalo (t/ha.ano)	Interpretação
< 400	Fraco
400-800	Moderado
800-1600	Moderado a forte
> 1600	Forte

Fonte: Valério Filho (1994) *in* Silva *et al.* (2004).

Tabela 5.4 - Classes de interpretação para o parâmetro estimativa de perda de solo.

Taxa de perdas de solo (t/ha.ano)	Interpretação
< 10	Nula a pequena
10-15	Moderada
15-50	Média
50-120	Média a forte
120-200	Forte
> 200	Muito Forte

Fonte: Silva *et al.* (2004) elaborada a partir das classes apresentadas por Carvalho (1994).

5.2 - Segunda Etapa

Os procedimentos de modelagem dinâmica de perdas de solo encontram-se esquematizados na figura 5.9 e serão detalhados nos próximos itens.

5.2.1 - Ambiente de Modelagem Dinâmica

A arte de se construir modelos é conhecida como modelagem, termo que se refere ao processo de pesquisa que leva à geração do modelo (representação) de um sistema. Este processo se desenvolve por meio da definição de um conjunto de hipóteses ou predições, que poderão ser comparadas com medidas do mundo real. Dependendo da concordância entre o observado e o resultado gerado, o modelo será aceito, rejeitado ou modificado de alguma forma, para novamente ser testado (Soares-Filho, 1998).

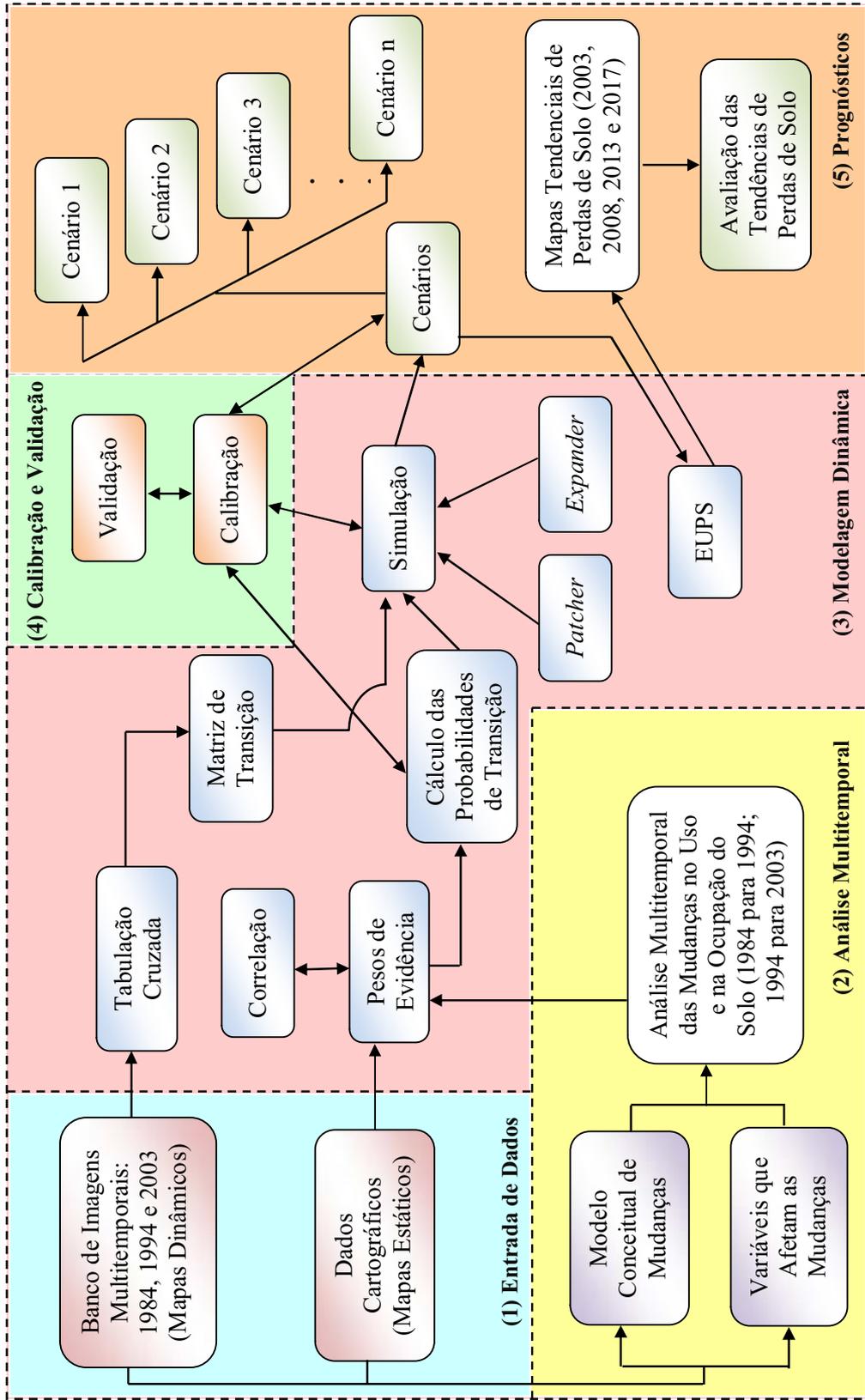


Figura 5.9 – Síntese da modelagem dinâmica de perdas de solo.

Segundo Rodrigues *et al.* (2007), modelos de simulação espacial visam auxiliar o entendimento dos mecanismos causais e processos de desenvolvimento de sistemas ambientais, e assim determinar como estes evoluem diante de diferentes cenários que se traduzem por quadros sócio-econômicos, políticos e ambientais. Com efeito, modelos de simulação espacialmente explícitos têm recebido atenção por parte de pesquisadores de diversas áreas, sendo usados para avaliação de complexas questões ambientais.

A construção dos modelos de simulação baseia-se em modelos matemáticos, que se utilizam de sistemas de equações na construção do modelo. Modelos matemáticos podem ser classificados em determinísticos ou estocástico-probabilísticos (estatísticos).

Modelos de mudanças que utilizam equações diferenciais são considerados como modelos determinísticos, sendo também conhecidos como modelos de processos. De acordo com Steyaert (1993) *in* Soares-Filho (1998), nos modelos determinísticos de dinâmica, a evolução de um sistema no tempo e no espaço pode ser completamente prevista, desde que seja conhecido um conjunto de condições iniciais. Em geral, nestes modelos, cada célula ou grupo de células - manchas - contém um submodelo distribucional da paisagem (Soares-Filho, 1998).

Por sua vez, os modelos de dinâmica estocástico-probabilísticos utilizam variáveis aleatórias segundo uma lei imutável, mas que depende de fatores aleatórios ou do acaso (Abler *et al.*, 1971 *in* Soares-Filho, 1998). Cada vez que um modelo probabilístico é rodado, um resultado diferente pode ser obtido.

Para as simulações de cenários propostos nesse estudo de caso, foi utilizado o ambiente de modelagem Dinamica EGO – acrônimo para *Environment for Geoprocessing Objects* (ambiente para objetos de geoprocessamento) em sua versão 1.0.6. O Dinamica EGO é um *software* livre que foi criado e é mantido pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR), instalado no Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. O Dinamica foi concebido como um ambiente genérico de modelagem de mudanças ambientais. Este ambiente de modelagem favorece simplicidade, flexibilidade e desempenho, otimizando velocidade e recursos computacionais, como memória e uso de processamento em paralelo, além de permitir o ajuste dos parâmetros por interfaces gráficas (Rodrigues *et al.*, 2007).

Conforme Rodrigues *et al.* (2007), uma das grandes vantagens do Dinamica é a questão de alocação de memória. Enquanto outros ambientes de modelagem em geoprocessamento (ex: *MacroModeler* do Idrisi e *ModelBuilder* do ArcGis) utilizam-se de

módulos que escrevem seus resultados em disco para serem novamente lidos em um passo posterior, penalizando desse modo sua performance, o Dinamica utiliza um fluxo contínuo de dados que são mantidos em memória somente enquanto forem necessários à execução do modelo.

Os modelos criados pelo Dinamica EGO são gravados na forma de *scripts* textuais, que podem ser criados em duas sintaxes distintas: XML ou EGO Script. O núcleo do Dinamica EGO, responsável pela criação e execução dos modelos, é escrito em C++, enquanto a interface gráfica é escrita em Java (Rodrigues *et al.*, 2007). O Dinamica é um modelo de autômatos celulares, implementado por meio de algoritmos empíricos de alocação do uso do solo e a natureza de sua interface gráfica baseia-se na teoria de grafos direcionados.

Os modelos conhecidos como autômatos celulares (AC) correspondem a engenhos compostos por conjuntos de células que imprimem determinados movimentos, assemelhando-se a seres animados (Figura 5.10). Em geral, o mecanismo de autômatos celulares consiste num arranjo n-dimensional de células. Neste arranjo, o estado de cada célula depende de seu estado prévio e de um conjunto de regras de transição, de acordo com relações de vizinhança contígua, sendo todas as células atualizadas simultaneamente a passos discretos de tempo (Figura 5.11). O algoritmo que faz as células interagirem localmente é conhecido como regra local do autômato celular (Sirakoulis *et al.*, 2000 in Soares-Filho *et al.*, 2004b). Um AC pode ser considerado como uma categoria de modelos dinâmicos espaciais.

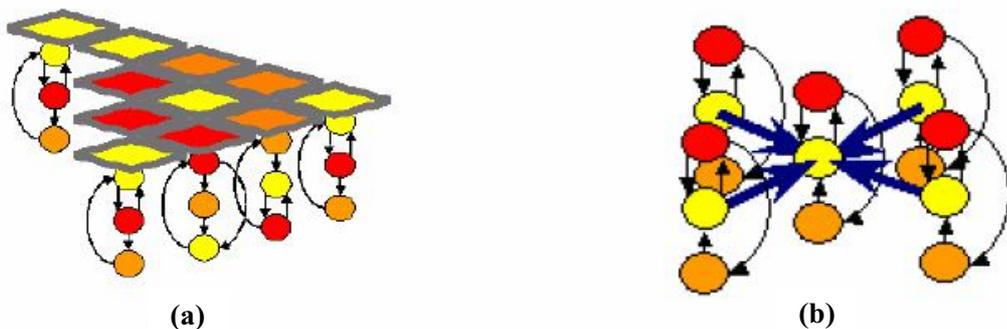


Figura 5.10 – Autômato celular. (a) Um AC homogêneo. (b) Um AC isotrópico, cada vizinho exerce a influência sobre o estado de um determinado autômato finito.

Os modelos de autômatos celulares tornaram-se populares em inúmeros ramos do conhecimento científico, encontrando aplicabilidade em áreas como Ecologia, Biologia, Epidemiologia, Termodinâmica, Hidrologia, Meteorologia, dentre outras. Isto se explica, em grande parte, pelo fato de que essas abstrações são de fácil manuseio computacional e

apreensão lógica. Dessa forma, elas são capazes de gerar dinâmicas que replicam processos tradicionais de mudanças por difusão, mas que ao mesmo tempo, contêm complexidade suficiente para simular padrões inusitados e surpreendentes como aqueles encontrados em fenômenos emergentes (Meirelles *et al.*, 2007).

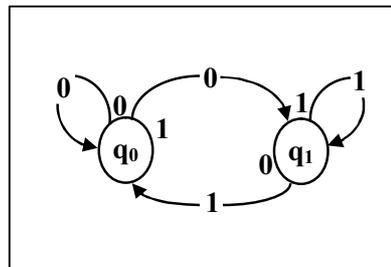


Figura 5.11 – Diagrama de transição de autômatos celulares.

Apesar dos AC não só lidarem com a emergência observável em fenômenos complexos, como também possuem grande flexibilidade para fazer frente aos diversos processos dinâmicos e revelarem uma incrível simplicidade operacional, eles são limitados, a princípio, em virtude de restrições impostas pela maior parte de suas suposições teóricas (Almeida, 2003).

5.2.2 - Entrada de Dados

O bloco inicial apresentado na síntese da modelagem dinâmica de perdas de solo (Figura 5.9) refere-se à seleção dos dados de entrada, os quais correspondem a classificações de uso e ocupação do solo a partir de imagens de sensoriamento remoto multitemporais (mapas dinâmicos) e a dados cartográficos (mapas estáticos). Todos esses mapas em conjunto com os parâmetros obtidos tanto pelo método de pesos de evidência como por regressão logística, também explicados neste capítulo, serão usados para o cálculo das probabilidades de transição das células.

O sensoriamento remoto entra como a principal fonte de dados para o desenvolvimento, calibração e refinamento de modelos dinâmicos. Assim, o primeiro passo na construção do modelo dinâmico de perdas de solo consistiu no mapeamento dos padrões mutáveis de uso e ocupação do solo do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto para uma série de imagens multitemporais.

Modelos de simulação também requerem, como entrada, substanciais dados cartográficos (variáveis estáticas). Estas variáveis estáticas devem ser o mais independente

possível. Elas podem auxiliar no entendimento da dinâmica de perdas de solo na região. No entanto, dificilmente consegue-se reunir um número suficiente de mapas estáticos que expliquem o fenômeno dinâmico estudado.

Para serem utilizadas no *software* Dinamica EGO, as variáveis dinâmicas bem como as estáticas devem ter as mesmas características geográficas e devem estar no formato ERS (formato *raster* do *software* ERMapper), ou no formato Geotiff.

5.2.3 - Análise Multitemporal

A segunda fase da modelagem correspondeu à análise multitemporal e a construção de um modelo conceitual das mudanças no uso e na ocupação do solo do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto. Nesse sentido, foram desenvolvidos os seguintes trabalhos: construção de um modelo conceitual de mudanças, seleção das variáveis que provavelmente afetam a dinâmica de perdas de solo e, por fim, realização de uma análise multitemporal das mudanças no uso e na ocupação do solo da bacia.

Conforme já mencionado, a seleção de variáveis para a modelagem dinâmica deve considerar a avaliação da independência entre pares de variáveis explicativas selecionadas para esclarecer as transições de uso do solo. A meta é a extração do mínimo e, ao mesmo tempo, melhor conjunto de variáveis para se explicar as transições, uma vez que a escolha das variáveis é um fator determinante para o sucesso do modelo. Estas variáveis estáticas, que possivelmente afetam as mudanças, foram selecionadas do banco de dados levantado na primeira etapa da pesquisa e serão testadas como pesos de evidências do modelo.

A construção do modelo conceitual de mudanças, bem como a análise multitemporal dessas mudanças na bacia basearam-se na tabulação cruzada entre os mapas de uso e ocupação do solo inicial e final de cada período de simulação. Esta tabulação cruzada foi realizada utilizando a extensão *Spatial Analyst* para ArcGis e visou a detecção e a quantificação das mudanças que ocorreram no período analisado. O resultado desse processo consiste numa matriz de transição para todo intervalo considerado, refletindo as probabilidades globais de transição detectadas.

5.2.4 - Modelagem Dinâmica de Perdas de Solo

Após a definição do conjunto de variáveis explicativas para as transições, a construção do modelo conceitual de mudança e a análise multitemporal das mudanças chega-

se ao estágio da elaboração do modelo dinâmico para simulação de cenários tendenciais de perdas de solo.

O desenvolvimento do modelo de simulação de mudanças do uso e ocupação do solo pode ser descrito matematicamente pela equação 16 que expressa as mudanças nos padrões espaciais de um tempo t para um novo padrão espacial no tempo $t + v$, tal como:

$$X_{t+v} = f(X_t, Y_t) \quad (16)$$

onde X_t é o padrão espacial no tempo t e Y_t é o vetor ou conjunto escalar de variáveis que afetam a transição (Soares-Filho *et al.*, 2004b). Desse modo, os componentes básicos de qualquer modelo de mudança no uso e ocupação do solo são: configuração inicial, funções de mudança e configuração de saída.

A configuração inicial consiste em um mapa que pode ser derivado de uma série de dados, incluindo dados históricos de uso do solo obtidos por meio de sensoriamento remoto. A função de mudança pode usar ambas as matemáticas contínuas ou discretas. Além de poder envolver desde uma simples equação linear diferencial, no caso do tempo ser considerado como uma variável contínua, ou ao contrário, uma equação de diferença, até exemplos mais complexos, como a utilização de seqüências de regras de decisão, conjunto complexo de equações não-lineares, com interações recursivas ou não (Baker, 1989 *in* Soares-Filho *et al.*, 2004b). Quanto ao espaço de estados, embora ele possa ser contínuo, em geral, assume-se uma representação discreta. Assim, à medida que o número de estados aumenta, a capacidade computacional e o requisito de dados para esses modelos crescem consideravelmente.

A construção de uma função de mudança não é trivial, consistindo, via de regra, na parte mais complexa do modelo. Na verdade, ela pode ser decomposta em duas funções, uma de quantificação das mudanças e outra dedicada à alocação espacial das mudanças. De acordo com Soares-Filho *et al.* (2004b), as mudanças em uma paisagem não se dão ao acaso, mas sim condicionadas a uma estrutura espacial.

Diante desse raciocínio, o primeiro passo na construção de um modelo de simulação de mudanças do uso e ocupação inicia-se pela definição de um modelo conceitual, elaborado na etapa de análise multitemporal, no qual foram definidos os elementos ou estados do uso e ocupação do solo e suas possíveis transições. Uma maneira simplificada de

representar esse modelo de estado e transições dá-se pelo uso da matriz de transição (Soares-Filho *et al.*, 2004b).

5.2.4.1 - Matriz de Transição

A matriz de transição (Equação 19), por si só, não consiste em um modelo espacial. Ela representa a distribuição da quantidade de mudanças por toda a paisagem, ou seja, o primeiro componente da função de mudança. A matriz de transição é responsável por fornecer ao algoritmo de simulação o percentual de alteração de um uso para outro. Essa informação é gerada externamente e pode ser obtida por meio da tabulação cruzada do mapa de cobertura de uso da terra inicial com outro mapa, desse mesmo tipo, em um instante de tempo ulterior (Soares-Filho *et al.*, 2004b). Em outras palavras, a matriz de transição é que determina os possíveis tipos de alteração de uso do solo e a respectiva extensão.

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=v} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{21} & P_{\cdot 1} & P_{j1} \\ P_{12} & P_{22} & P_{\cdot 2} & P_{j2} \\ P_{1\cdot} & P_{2\cdot} & P_{\cdot\cdot} & P_{j\cdot} \\ P_{1j} & P_{2j} & P_{\cdot j} & P_{jj} \end{bmatrix}^v * \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \cdot \\ j \end{bmatrix}_{t=0} \quad (17)$$

A matriz P_{ij} (Equação 18) é conhecida como matriz de transição, na qual as colunas representam as probabilidades de um determinado estado i permanecer no mesmo estado ou mudar para o estado j durante o intervalo de tempo de $t \rightarrow t + v$, de modo que:

$$\sum_{i=1}^n P_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n. \quad (18)$$

Sendo o estimador de P_{ij} dado pela equação 19, onde n é o número de classes de uso (Soares-Filho *et al.*, 2004b).

$$\hat{P}_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{j=1}^n n_{ij}} \quad (19)$$

5.2.4.2 Pesos de Evidência

Pesos de evidência (*weights of evidence*) consiste em um método baseado no teorema da probabilidade condicional de Bayes, tradicionalmente usado por geólogos para

indicar áreas favoráveis para algum fenômeno geológico, por exemplo, mineralização ou sismicidade (Bonham-Carter, 1994). O peso de evidência representa a influência de cada categoria (faixa de valores) de certa variável nas probabilidades espaciais de uma transição $i \rightarrow j$, sendo calculado pelas equações 20 e 21 (Soares-Filho *et al.*, 2004b).

$$O\left\{\frac{D}{B}\right\} = O\{D\} \frac{P\{B/D\}}{P\{B/\bar{D}\}} \quad (20)$$

$$\log\left\{\frac{D}{B}\right\} = \log\{D\} + W^+ \quad (21)$$

onde $O\{D\}$ e $O\{D/B\}$ são as razões de chances, respectivamente, de ocorrer *a priori* o evento D e ocorrer D dado um padrão espacial B , por exemplo, de um determinado tipo de solo ou faixa de distância à hidrografia. W^+ (*Positive Weight of Evidence*) é, portanto, o peso de evidência de ocorrer o evento D , dado um padrão espacial B . Quanto mais elevado o valor de W^+ , maior será a chance de ocorrer a transição em função da presença prévia da respectiva variável (Bonham-Carter, 1994). A probabilidade *a posteriori* de uma transição $i \rightarrow j$ expressada pela equação 22, dado um conjunto de dados espaciais e considerando que $O\{D\}=1$ já é fornecida ao modelo via matriz de transição.

$$P(i \rightarrow j(x, y)/V) = \frac{e^k \sum Wkn_{i \rightarrow j(V)}^{XY}}{1 + \sum_{ij} e^k} \quad (22)$$

onde V representa um vetor de k variáveis espaciais, medidas nas localidades x, y e representadas por seus pesos W^+_{k1xy} , W^+_{k2xy} , ..., W^+_{knxy} , sendo n o número de categorias de cada variável k .

De acordo com Bonham-Carter (1994) o método de pesos de evidência apresenta algumas vantagens e desvantagens, podendo-se destacar como vantagens:

- objetividade, que impede a escolha subjetiva de fatores de ponderação;
- a possibilidade de combinação de múltiplos mapas de evidências em um modelo de fácil adaptação a linguagens computacionais;
- a incorporação ao modelo de mapas de entrada com dados incompletos;

- a possibilidade de aplicação de mapas multiclasse, onde cada fatia é tratada como uma evidência presente (ou razão de probabilidade);
 - a modelagem de incertezas devido a variações nos pesos e dados incompletos;
- e como desvantagens:
- a combinação de mapas de entrada assume que estes são condicionalmente independentes entre si;
 - o teste para independência condicional só é possível quando o método for aplicado de maneira orientada aos dados, uma vez que ele requer a tabulação cruzada entre pares de mapas de evidência;
 - a limitação da aplicação do modelo aos casos em que a variável resposta (evento) é bem conhecida.

5.2.4.3 - Correlação entre as Variáveis

O método estatístico de pesos de evidência pressupõe independência espacial, uma vez que este é inteiramente baseado no Teorema de Bayes ou da probabilidade condicional. Essa independência espacial entre as variáveis é calculada pela verificação da correlação existente entre elas, devendo-se, ainda, verificar a dependência entre os mapas de variáveis. Para tanto, foram utilizados o Índice de Cramer (V) e o da Incerteza de Informação Conjunta (JIU – *Joint Information Uncertainty*) (Bonham-Carter, 1994).

Faz-se necessário, em ambos os métodos, obter valores de áreas de uma tabulação cruzada entre os pares de mapas das variáveis objeto de análise. A tabela de áreas entre os mapas *A* e *B* é chamada como matriz *T*, com elementos T_{ij} , onde há $i = 1, 2, \dots, n$ classes do mapa *B* (linhas da tabela) e $j = 1, 2, \dots, m$ classes do mapa *A* (colunas da tabela). Os totais marginais de *T* são definidos como T_i para a soma da *i*-ésima linha, T_j para a soma da *j*-ésima coluna, e $T_{..}$ para o grande somatório de linhas e colunas. Se os dois mapas são independentes um do outro, sem qualquer correlação entre eles, então a área esperada em cada categoria de sobreposição é dada pelo produto entre os totais marginais, dividido pelo somatório total. Portanto, a área esperada T_{ij}^* para a *i*-ésima linha e a *j*-ésima coluna são:

$$T_{ij}^* = \frac{T_i \cdot T_j}{T_{..}} \quad (23)$$

Assim, a estatística *qui-quadrado* é definida como:

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{(T_{ij} - T_{ij}^*)^2}{T_{ij}^*}, \quad (24)$$

a familiar expressão $(\text{observado} - \text{esperado})^2/\text{esperado}$, que possui um limite inferior de 0 quando as áreas observadas coincidem exatamente com as áreas esperadas, e os dois mapas são completamente independentes (Almeida, 2003). Quando as áreas observadas tornam-se cada vez mais diferentes das esperadas, a *qui-quadrado* cresce e possui limites superiores variáveis. Assim, o Índice de Cramer é então definido por Bonham-Carter (1994) como:

$$V = \sqrt{\frac{X^2}{T..M}} \quad (25)$$

onde M é o mínimo de $(n-1, m-1)$.

A Incerteza de Informação Conjunta pertence à classe das medidas de entropia, também baseadas na matriz de tabulação cruzada T , que podem ser usadas para medir associações. Supondo-se que os valores T_{ij} sejam transformados em proporções de área, p , dividindo-se cada elemento de área pelo somatório total $T_{..}$. Portanto, $p_{ij} = T_{ij} / T_{..}$, e as proporções marginais são definidas como $p_{i.} = T_{i.} / T_{..}$ e como $p_{.j} = T_{.j} / T_{..}$. Medidas de entropia, ou estatísticas da informação, são definidas usando-se as proporções de área como estimativas de probabilidades. Proporções não possuem dimensão, o que faz com que índices de entropia possuam vantagem sobre os de *qui-quadrado*, por não serem afetados por unidades de medida (Bonham-Carter, 1994).

Assumindo-se que uma matriz de proporções de área para os mapas A e B tenha sido determinada a partir de T , então a entropia de A e de B são definidas como:

$$H(A) = - \sum_{j=1}^m p_{.j} \ln p_{.j} \quad \text{e} \quad (26)$$

$$H(B) = - \sum_{i=1}^n p_{i.} \ln p_{i.}, \quad (27)$$

onde \ln é o logaritmo natural. A entropia conjunta da combinação, $H(A,B)$, é simplesmente

$$H(A,B) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} . \quad (28)$$

Dessa forma, a Incerteza de Informação Conjunta de A e B , $U(A,B)$, pode ser utilizada como uma medida de associação e é definida por

$$U(A,B) = 2 \left[\frac{H(A) + H(B) - H(A,B)}{H(A) + H(B)} \right], \quad (29)$$

a qual varia entre 0 e 1 . Quando os dois mapas são completamente independentes, então $H(A,B) = H(A) + H(B)$ e $U(A,B)$ é 0 , e quando os dois mapas são completamente dependentes, $H(A) = H(B) = H(A,B) = 1$, e $U(A,B)$ é 1 . O JIU, ao trabalhar com valores relativos de áreas de sobreposição, tende a ser mais robusto que o Índice de Cramer, pois evita o risco de tendenciosidade representado por valores absolutos de áreas (Meirelles *et al.* 2007).

Bonham-Carter (1994) relata que valores menores que $0,5$ para o Índice de Cramer e para a Incerteza de Informação Conjunta sugerem menos e não mais associação. As variáveis correlacionadas são excluídas do modelo ou combinadas em uma terceira variável.

5.2.4.4 - Cálculo das Probabilidades de Transição

O método implementado no Dinamica para o cálculo das probabilidades espaciais de transição baseia-se na aplicação da regressão logística utilizando-se de todas variáveis dinâmicas e estáticas. O resultado é um conjunto de mapas ou *layers* (camadas), discriminando as probabilidades de cada célula do terreno sofrer uma transição de um estado i para um estado j . Estes mapas são utilizados em um momento seguinte pelas funções de transição na eleição de células a serem transicionadas (Soares-Filho *et al.*, 2001).

5.2.4.5 - Simulação

Com as taxas de transição e as probabilidades de transição das células estimadas, executam-se as simulações. Uma simulação se inicia com a leitura de um arquivo contendo os valores de cada parâmetro e o caminho dos arquivos contendo os mapas de entrada. Com base nas tendências de mudanças do uso do solo ao longo de uma série multitemporal suficientemente longa, o modelador encontra-se finalmente apto para conceber cenários de transições futuras. Nesse caso, as taxas de transição podem ser estacionárias, isto é, estimadas

pela cadeia de Markov ou não-estacionárias, as quais são obtidas a partir de modelos de regressão linear relacionando áreas de certos usos do solo com dados que possam justificar as mudanças.

Nas simulações, as variáveis dinâmicas passam por alterações a cada iteração do programa, que são continuamente atualizadas de modo a influenciar o cálculo das probabilidades de transição na próxima iteração. Portanto, a cada iteração do programa, ocorrem mudanças no estado (uso do solo) das células, mudando assim a distância a esses usos, estimados a partir de outras células. As mudanças das células que ocorrem nas sucessivas iterações influenciam na geração do mapa final de uso do solo correspondente ao período previsto. Os mapas gerados na execução da simulação têm formato idêntico ao mapa de uso e ocupação de entrada no modelo (Soares-Filho *et al.*, 2001). As saídas das simulações, por sua vez, são continuamente calibradas até a obtenção de resultados satisfatórios, que serão validados ao final (Almeida, 2003).

5.2.4.6 - Algoritmos de Transição

Uma questão importante em modelos de simulação de uso e ocupação do solo refere-se à influência da vizinhança nas chances de transição e na dinâmica das manchas, uma vez que a maioria das mudanças ocorre na interface entre as inúmeras manchas dos elementos da paisagem. De acordo com Soares-Filho *et al.* (2002), uma maneira encontrada para tratar essa questão, consiste em dividir o mecanismo de eleição de células a serem transicionadas em dois processos, quais são: um primeiro só de expansão ou retração de manchas prévias de uma determinada classe de uso do solo (Função *Expander*) e um segundo de formação ou geração de novas manchas através de um mecanismo de constituição de sementes (Função *Patcher*).

Em suma, a função *Expander* executa transições de um estado *i* para um estado *j* apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado *j*. E a função *Patcher* realiza transições de um estado *i* para um estado *j* apenas nas vizinhanças adjacentes de células com estado diferente de *j* (Almeida, 2003).

Esses dois processos podem se fundir na seguinte equação:

$$Q_{ij} = r \times (\text{função } \textit{Expander}) + s \times (\text{função } \textit{Patcher}) , \quad (30)$$

onde Q_{ij} corresponde à quantia total de transições do tipo ij especificadas por cada período de simulação, e r e s são respectivamente o percentual de transições executadas por cada função, com $r + s = 1$.

Segundo Soares-Filho *et al.* (2002), ambos algoritmos de transição adotam um mecanismo estocástico de seleção. O algoritmo aplicado consiste no escaneamento do mapa inicial de uso do solo para identificar as células com valores de probabilidade mais elevados e dispô-las em um vetor de dados. Seguindo este procedimento, as células desse vetor são selecionadas aleatoriamente em sentido descendente (o mecanismo estocástico de seleção interna pode ser suavizado ou realçado, dependendo do grau de aleatoriedade desejada). Em um estágio final, o mapa de uso do solo é novamente escaneado para se executar as transições selecionadas (Almeida, 2003).

No caso da função *Expander* não executar a quantia de transições desejadas após um número fixo de iterações, ela transfere à função *Patcher* um número residual de transições, de modo que o número total de transições sempre alcance um valor esperado (Soares-Filho *et al.*, 2002).

O algoritmo *Expander* é expresso pela equação a seguir:

$$\begin{aligned} \text{If } n_j > 3 \text{ então } P'_{ij}(x, y) &= P_{ij}(x, y) \text{ senão} \\ P'_{ij}(x, y) &= P_{ij}(x, y) \times (n_j) / 4 \end{aligned} \tag{31}$$

onde n_j corresponde ao número de células do tipo j ocorrendo em uma janela 3 x 3. Este método garante que a máxima P'_{ij} será a P_{ij} original, sempre que uma célula do tipo i esteja cercada por pelo menos 50% de células vizinhas do tipo j (Almeida, 2003).

A função *Patcher*, por sua vez, procura simular padrões de mudanças do uso do solo gerando manchas difusas e impedindo, ao mesmo tempo, a formação de manchas de apenas uma célula. Esta função emprega um dispositivo que procura por células em torno de uma dada localização considerada para transição. Isso é obtido primeiramente pela seleção de uma célula núcleo da nova mancha, e então pela seleção de um número específico de células ao redor da célula núcleo, de acordo com as suas probabilidades de transição P_{ij} (Almeida, 2003). O algoritmo *Patcher* realiza transições de um estado i para um estado j apenas nas vizinhanças contíguas das células com estado diferente de j . Opera a partir do sorteio de

número randômico entre 0 e 255. Se o número sorteado for menor que a probabilidade de transição da célula (no intervalo 0-255), a célula transiciona para o estado j , e vice-versa.

O dispositivo de alocação incorporado nas funções *Expander* e *Patcher* é responsável pela identificação das células com maiores probabilidades para cada transição ij . Este dispositivo armazena as células e as organiza para ulterior seleção. Neste processo, cada célula recém-selecionada formará o núcleo de uma nova mancha ou franja de expansão, que ainda necessita ser consolidada usando-se um dos dois algoritmos de transição. Os tamanhos das novas manchas e franjas de expansão são definidos de acordo com uma distribuição de probabilidade lognormal, cujos parâmetros são determinados em função do tamanho médio e da variância de cada tipo de mancha e franja de expansão a ser gerada (Soares-Filho *et al.*, 2002).

5.2.4.7 - EUPS

Nos cenários de uso e ocupação do solo resultantes do modelo de simulação aplica-se a Equação Universal de Perdas de Solo com fator LS modificado (método descrito no item 5.1.3, a partir da página 60) para avaliação da tendência a perdas de solo no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto.

5.2.5 - Calibração e Validação

5.2.5.1 - Calibração

A calibração visa a seleção do melhor conjunto de variáveis de entrada e parâmetros internos do modelo dinâmico, de forma a produzir o melhor ajuste entre os dados empíricos e a realidade observada (mapa de uso final). Para a calibração do modelo de simulação foram adotados procedimentos empíricos diferenciados.

A tarefa de calibração consiste de dois estágios. O primeiro estágio trata-se de uma análise visual comparativa executado entre: cada tipo de mudança de uso do solo entre as tendências gerais de resultados preliminares de simulação; as dicas fornecidas pelos mapas de transição do uso e de probabilidades de transição; e as informações de diretrizes contidas na sobreposição simultânea de diferentes mapas de variáveis explicativas sobre o mapa real de uso do solo em formato vetorial. Essa comparação objetiva separar aquelas variáveis ou evidências que estão efetivamente contribuindo para explicar os respectivos eventos daquelas que constituem apenas ruído para a modelagem (Almeida, 2003).

Em um segundo momento, após a calibração do conjunto de padrões do modelo de simulação, tem-se início a calibração relativa ao ajuste dos parâmetros internos do *script* do modelo de simulação do Dinamica EGO, tais como: número de iterações; proporção de transições por contigüidade pela função *Expander* e por difusão pela função *Patcher*; e a isometria, o tamanho médio e a variância das manchas a serem geradas pelo *Expander* ou pelo *Patcher* em cada um dos tipos de transição.

5.2.5.2 - Validação

Modelos espaciais requerem uma comparação dentro de um contexto de vizinhança, uma vez que mapas que não coincidem exatamente todos os *pixels* podem apresentar padrões espaciais similares dentro de uma determinada vizinhança do *pixel*. Existem diversos métodos desenvolvidos para validação de similaridade entre mapas baseados na comparação da vizinhança. Entre os métodos existentes destacam-se Costanza (1989), Pontius (2002), Power *et al.* (2001) e Hagen (2003).

Costanza (1989) introduziu um procedimento intitulado “*Método de Múltiplas Resoluções*”, que consiste em um algoritmo que gradualmente diminui a resolução de comparação entre a imagem real e a simulada, aumentando a janela de amostragem. Pontius (2002) apresentou um método similar ao de Costanza (1989), diferenciando os erros de posição e de quantidade. Power *et al.* (2001) elaboraram um método de comparação baseado em testes de padrões hierárquicos *fuzzy*. Por sua vez, Hagen (2003) desenvolveu um método, incluindo o *Kfuzzy*, considerado equivalente ao método estatístico *Kappa* e à similaridade *fuzzy*, que verifica a localização e a categoria dentro da vizinhança da célula.

No que concerne à validação, o método de validação adotado para ratificar a similaridade entre o mapa simulado e o mapa de uso e ocupação observado encontra-se disponível no aplicativo Dinamica EGO e baseia-se numa modificação do método de similaridade *fuzzy* de Hagen (2003).

Segundo Hagen (2003), a validação de similaridade *fuzzy* é baseada no conceito *fuzzy* de localização, na qual a representação de uma célula é influenciada pela própria célula e em curta extensão, pelas células da vizinhança. Não considerando o *fuzzy* da categoria, o vetor *fuzzy* da vizinhança pode representar o *fuzzy* da posição. Primeiramente, um vetor *crisp* (*Vcrisp*) é associado a cada célula do mapa. Este vetor tem tantas posições quanto as

categorias do mapa, assumindo 1 para uma categoria igual a i e 0 para categorias diferentes de i . Assim, o vetor *fuzzy* de vizinhança (V_{nbhood}) para cada célula é determinado como:

$$V_{nbhood} = \begin{pmatrix} \mu_{nbhood_1} \\ \mu_{nbhood_2} \\ \vdots \\ \mu_{nbhood_C} \end{pmatrix} \quad (32)$$

onde o μ_{nbhood_i} representa o membro para a categoria i dentro de uma vizinhança da célula N (geralmente $N = n^2$); o $\mu_{crisp_{i,j}}$ é o membro da categoria i para a vizinhança da célula j , assumindo, como em um vetor *crisp*, 1 para i e 0 para categorias diferentes de i ($i \subset C$) e μ_j é a distância baseada na vizinhança da célula j . A função de decaimento da distância é representada por μ , por exemplo, um decaimento exponencial ($m=2^{-d/2}$). Embora espacialmente contínua, para facilitar o processamento, esta função de decaimento torna-se freqüentemente truncada fora da janela de vizinhança $n \times n$. A função mais apropriada e o tamanho da janela dependem da vacância dos dados e da tolerância de erro espacial permitida (Hagen, 2003).

No Dinamica EGO, para avaliar o ajuste espacial do modelo em várias resoluções, em adição ao decaimento exponencial, também é aplicada uma função constante igual a 1 dentro da vizinhança da janela e 0 fora dela. A equação 34 ajusta a categoria para célula central, assumindo a maior contribuição encontrada dentro de uma janela de vizinhança $n \times n$. Em seguida, é calculada uma medida de similaridade entre um par de mapas (o mapa de uso e ocupação observado e o gerado por simulação) por meio de uma interseção *fuzzy* célula-por-célula entre os vetores *fuzzy* e *crisp* aplicando as seguintes equações:

$$S(V_A, V_B) = \left[\left| \mu_{A,1}, \mu_{B,1} \right|_{Min}, \left| \mu_{A,2}, \mu_{B,2} \right|_{Min}, \dots, \left| \mu_{A,i}, \mu_{B,i} \right|_{Min} \right]_{Max} \quad (33)$$

onde V_A e V_B representam os vetores de vizinhança *fuzzy* para os mapas A e B e o $\mu_{A,j}$ e o $\mu_{B,j}$ são sua vizinhança para categorias $i \subset C$ nos mapas A e B , como mostra a equação 36. De acordo com Hagen (2003), desde que a medida de similaridade $S(V_A, V_B)$ tenda a superestimar o ajuste espacial, a similaridade é aplicada preferencialmente, de modo que:

$$S_{twoWay}(A, B) = \left| S(V_{nbhood_A}, V_{crisp_B}), S(V_{crisp_A}, V_{nbhood_B}) \right|_{Min} \quad (34)$$

A similaridade geral de um par de mapas pode ser calculada pela média dos valores de similaridade para todas as células do mapa, especificando o grau de similaridade

numa escala de 0 a 1. Quanto mais elevado o valor resultante, maior o grau de similaridade entre os mapas. Como mapas randômicos tendem a valores altos, é recomendado adotar o menor valor de similaridade encontrado.

Portanto, os testes de validação podem ser entendidos como procedimentos para verificar se os modelos refletem ou não a realidade no grau desejado (Batty, 1976 *in* Almeida, 2003). Ao obter um ajuste acima de 60%, o modelo de simulação, estará validado para o estudo de caso objeto de pesquisa. Por conseguinte, o modelo poderá ser extrapolado para outras áreas e para casos semelhantes, seguindo as mesmas tendências, ou ainda, ser utilizado para ilustrar ou testar cenários hipotéticos.

5.2.6 - Prognósticos

O produto da etapa de modelagem é a concepção de cenários otimistas e pessimistas, de curto e médio prazos, de mudanças no uso e ocupação do solo para a geração de prognósticos de perdas de solo do Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto.

A base para avaliação dos prognósticos de perdas de solo são os mapas tendenciais de erosão, bem como o mapa de potencial de perdas de solos obtidos com a aplicação da EUPS nos diversos cenários simulados. Para os prognósticos também foram concebidos cenários hipotéticos com super e subestimações de áreas preservadas, considerando, por exemplo, a regeneração da vegetação em áreas anteriormente desmatadas.

Quanto à delimitação de horizontes de projeto, inexistem definições oficiais com relação a curto e médio prazos para fenômenos de mudanças de uso do solo. De modo geral, é sensato definir-se o curto prazo como sendo um período de tempo de até cinco anos, e o médio prazo como um intervalo de tempo compreendido entre mais de cinco e menos de dez anos (Almeida, 2003).

Mudanças de uso do solo de longo prazo são dificilmente previsíveis, e por esse motivo, sujeitas a erro, uma vez que eventualmente podem ocorrer alterações inesperadas ao final do médio prazo e início do longo prazo. Outra limitação está no fato de que para o planejamento estratégico, apenas o curto e médio prazo são relevantes para a definição de prioridades, alocação de recursos e processos de tomada de decisão (Almeida, 2003).

Neste sentido, partindo-se dos mapas de uso e ocupação de 1984, 1994 e 2003 serão simulados cenários para os anos 2003, 2008, 2013 e 2017. A simulação do uso e ocupação de 2003 será utilizada para calibrar e validar o modelo dinâmico.