



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG

**GEOPROCESSAMENTO COMO FERRAMENTA DE
APOIO À GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS
SUBTERRÂNEOS DO DISTRITO FEDERAL**

TATIANA DINIZ GONÇALVES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 225

BRASÍLIA
Abril de 2007

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA GERAL E APLICADA

**GEOPROCESSAMENTO COMO FERRAMENTA DE APOIO À
GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS DO
DISTRITO FEDERAL**

TATIANA DINIZ GONÇALVES

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ ELOI GUIMARÃES CAMPOS

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. HENRIQUE LLACER ROIG

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOLOGIA NA ÁREA DE
PROCESSAMENTO DE DADOS E ANÁLISE AMBIENTAL**

BRASÍLIA
Abril de 2007

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UNB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA GERAL E APLICADA

**GEOPROCESSAMENTO COMO FERRAMENTA DE APOIO À
GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS DO
DISTRITO FEDERAL**

TATIANA DINIZ GONÇALVES

**Dissertação de mestrado submetida ao
Departamento de Geologia Geral e
Aplicada como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do Grau de
Mestre em Geologia.**

APROVADA POR:

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos (IG - UnB)
(Orientador)

Prof. Dr. Henrique LLacer Roig (IG - UnB)
(Co-Orientador)

Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses (IG - UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Dr. Getulio Teixeira Batista (CA - Unitau)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 13 DE ABRIL DE 2007.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GONÇALVES, T.D. (2007). Geoprocessamento como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Tatiana Diniz Gonçalves.

TÍTULO: Geoprocessamento como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal.

GRAU: Mestre

ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Tatiana Diniz Gonçalves

Agradecimentos

Agradeço a Deus e ao Mestre Gabriel pela luz que me ilumina.

Ao meu companheiro Gilson, pela compreensão, paciência e amor.

Ao orientador e amigo, professor José Eloi, pela dedicação e conhecimentos transmitidos.

Ao co-orientador, professor Henrique Roig, pelo apoio e colaboração.

Aos colegas do Instituto de Geociências da UnB, Inara, Toyota, Laiza, Verônica, Tati, Xuxa, Serjão, Fred, Cris e Matheus, que de alguma forma colaboraram para realização deste estudo.

Ao professor e compadre Nabil Eid, pelos textos e dados fornecidos.

Aos meus pais, pela vida que me deram e pelo exemplo de dedicação e garra.

Aos meus irmãos, pelo apoio.

Aos amigos do Núcleo Estrela Matutina, que me acolheram nos momentos mais difíceis.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, pelo apoio logístico para realização desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa concedida.

**“aos meus pais, Alberto e Maria Inês, ao Gilson,
meu marido e aos meus filhos, Pedro, Luíza e
Clara”.**

Sumário

	Página
Índice de Figuras	i
Índice de Tabelas	iii
Resumo	iv
Abstract	v
 CAPÍTULO I – Apresentação	
1.1 Introdução	1
1.2 Localização da Área de Estudo	3
1.3 Objetivos	5
1.4 Estrutura da Dissertação.....	6
 CAPÍTULO II – Caracterização da Área de Estudo	
2.1 Introdução	9
2.2 Clima	9
2.3 Vegetação	9
2.4 Solos	12
2.5 Geomorfologia	13
2.6 Geologia	16
2.7 Hidrogeologia	17
 CAPÍTULO III – Fundamentos Teóricos	
3.1 Gestão de Recursos Hídricos	20
3.1.1 Base Legal	20
3.1.2 Base Institucional	23
3.1.3 Base Técnica	23
3.2 Parâmetros Básicos para a Gestão e Outorga dos Recursos Hídricos	
Subterrâneos	26
3.3 Metodologia do Curva-Número (CN)	29
3.4 Processamento de Dados Geográficos	37
 CAPÍTULO IV - Construção do Banco de Dados Georreferenciado	
4.1 O Banco de Dados	43

4.2 A Escala de Trabalho	43
4.3 Os Planos de Informações	44
4.3.1 Base Planialtimétrica	45
4.3.2 Dados Climatológicos	48
4.3.3 Dados Geológicos	50
4.3.4 Dados Pedológicos	52
4.3.5 Dados de Uso e Cobertura da Terra	54
4.4 Aplicação do método do Curva-Número (CN)	59
4.4.1 Classificação Hidrológica dos solos do DF	59
4.4.2 Composição do Curva-Número pelo Método de Lorbarði-Neto	59
4.4.3 Composição do Curva-Número a partir da ferramenta <i>ArcCN-Runoff</i>	62
4.5 Determinação da Capacidade de Retenção Máxima de Água dos Solos (S)	63
CAPÍTULO V – Integração, Análise dos Produtos e Discussões	
5.1 Introdução	65
5.2 Integração dos dados	65
5.2.1 Solo e uso e cobertura da terra	65
5.2.2 Capacidade de retenção máxima de água dos solos (S) e distribuição pluvial.....	68
5.2.3 Disponibilidade hídrica dos solos e declividade	70
5.2.4 Potencial de recarga e vazão média (\bar{Q}) do meio fraturado	73
5.2.5 Mapa de apoio à outorga de água subterrânea no Distrito Federal	75
CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

Índice de Figuras

	Páginas
Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo contendo os nomes de cidades, regiões, rios e demais referências geográficas citadas ao longo da dissertação.....	4
Figura 1.2 - Fluxograma Metodológico.....	7
Figura 2.1 - Precipitação anual no Distrito Federal.....	10
Figura 2.2 - Campo limpo típico representado por gramínea sem a presença de arbustos.....	11
Figura 2.3 - Cerrado <i>sensu strictu</i> composto por árvores de pequeno porte com caules retorcidos.....	11
Figura 2.4 - Mata ciliar em vale encaixado, desenvolvida a partir da maior disponibilidade hídrica ao longo do eixo da drenagem.....	11
Figura 2.5 - Mata mesofítica desenvolvida sobre solo fértil com espécies arbóreas tipicamente retas e de médio porte.....	11
Figura 2.6 - Perfil de Latossolo Vermelho (espessura total exposta de 220 cm).....	14
Figura 2.7 - Exemplo de Cambissolo com seqüência de horizontes A, B incipiente e C na base.....	14
Figura 2.8 - Neossolo Flúvico com horizonte A recobrando o material aluvionar.....	14
Figura 2.9 - Perfil de Plintossolo Pétrico com horizonte petroplíntico com cerca de 40 cm.....	14
Figura 2.10 - Exposição da porção superficial de Gleissolo com horizonte A sobre Horizonte B glei com coloração clara característica.....	14
Figura 2.11 - Topo de perfil de organossolo com horizonte hístico. Notar a má drenagem da área com nível d'água a cerca de 40 cm de profundidade.....	14
Figura 2.12 - A: região de Dissecação de Vales, com relevo movimentado com vales incisos.....	15
Figura 2.12 - B: exemplo de borda de Chapada e Região de Vales Dissecados tendo uma escarpa em sua transição.....	15
Figura 2.12 - C: paisagem típica do compartimento de Dissecação Intermediária	15
Figura 2.12 - D: rebordo de transição entre Área de Chapada e Área de Dissecação Intermediária.....	15
Figura 2.13 - Quartzitos da Unidade Q₃ , em típico padrão de afloramento em blocos maciços a fraturados.....	16

Figura 2.14 - Frente de lavra em grande lente de metacalcário da Unidade PPC	16
Figura 2.15 - Detalhe de calcifilito, alterado com foliação principal crenulada.....	17
Figura 2.16 - Quartzitos laminados, brancos e micáceos do Grupo Canastra.....	17
Figura 4.1 - Mapa de Declividade do Distrito Federal.....	47
Figura 4.2 - Mapa de Isoietas do Distrito Federal (período 1960-2006).....	49
Figura 4.3 - Mapa hidrogeológico do domínio fraturado do Distrito Federal (adaptado de Campos & Freitas-Silva 1998 e ADASA/PGIRH 2006).....	51
Figura 4.4 - Mapa Solos do Distrito Federal (modificado de EMBRAPA 1978). Entre parênteses perfis ou horizontes diagnósticos.....	53
Figura 4.5 - Imagem Spot 5, composição colorida R - infravermelho próximo (0,78 a 0,89 μm) G - vermelho (0,61 a 0,59 μm) B - verde (0,50 a 0,59 μm).....	57
Figura 4.6 - Mapa de Uso e Cobertura da Terra do Distrito Federal (classificado a partir da imagem Spot 5-2003 e atualizado por meio de trabalho de campo).....	58
Figura 4.7 - Mapa de Grupos hidrológicos de Solos do Distrito Federal (adaptado do <i>CN</i>).....	61
Figura 4.8 - Mapa de Curva-Número (<i>ArcCN-runoff</i>). Quanto maior o valor, maior o escoamento superficial.....	64
Figura 5.1 - Mapa de Capacidade de Retenção Máxima de Água dos Solos (S).....	66
Figura 5.2 - Mapa de Disponibilidade Hídrica Potencial do Distrito Federal.....	69
Figura 5.3 - Potencial de Recarga do Distrito Federal.....	72
Figura 5.4 - Mapa de Favorabilidade à Exploração de Água Subterrânea do Distrito Federal.....	74
Figura 5.5 - Mapa de Apoio à Outorga de Água Subterrânea do Distrito Federal.....	79

Índice de Tabelas

	Páginas
Tabela 2.1 - Características do domínio fraturado.....	18
Tabela 2.2 - Características do domínio poroso.....	19
Tabela 3.1 - Condições antecedentes de umidade de solo.....	31
Tabela 3.2 - Grupos de solos segundo as características hidrológicas estabelecidas pelo SCS.....	32
Tabela 3.3 - <i>CN</i> para campos áridos e semiáridos dos EUA ($I_a = 0,2s$ e Condição II de umidade antecedente).....	33
Tabela 3.4 - <i>CN</i> para terras agrícolas cultivadas ($I_a = 0,2s$ e Condição II de umidade antecedente).....	34
Tabela 3.5 - <i>CN</i> para áreas urbanas ($I_a = 0,2s$ e Condição II de umidade antecedente)...	35
Tabela 3.6 - <i>CN</i> para outros usos agrícolas ($I_a = 0,2s$ e Condição II de umidade antecedente).....	36
Tabela 4.1 - Sistema de Classificação do Uso e Cobertura da Terra do DF.....	56
Tabela 4.2 - Classificação hidrológica do solo para as condições brasileiras.....	60
Tabela 4.3 - Enquadramento das classes de solo do Distrito Federal nos grupos hidrológicos propostos por Lombardi-Neto (1989).....	60
Tabela 4.4 - Proposta de adequação das classes de uso e cobertura da terra do Distrito Federal aos tipos de uso e cobertura definidos pelo <i>CN</i>	62
Tabela 4.5 - Composição do <i>CN</i> pelo método de Lombardi-Neto (1989) e Sartori (2005).....	62
Tabela 4.6 - Capacidade de Retenção Máxima de Água dos Solos (<i>S</i>).....	63
Tabela 5.1 - Integração do uso e cobertura vegetal com os grupos hidrológicos de solos. Destacado em azul o valor mais elevado e em vermelho as condições de menor saturação potencial.....	67
Tabela 5.2 - As classes de favorabilidade à exploração de água subterrânea e suas principais características.....	73
Tabela 5.3 - Classes de outorga e os critérios da vazão nominal a serem considerados..	76

RESUMO

A demanda por água subterrânea no Distrito Federal aumentou significativamente nas últimas décadas. Esta situação decorre, dentre outros motivos, da política do governo local de incentivo a importantes processos migratórios, fazendo com que o crescimento populacional, associado à ocupação desordenada do espaço, comprometa tanto os aspectos qualitativos como os quantitativos dos recursos hídricos subterrâneos da região. Neste sentido, faz-se necessário conhecer o potencial local dos sistemas aquíferos para que diretrizes de gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos sejam estabelecidas a partir de critérios técnicos, capazes de garantir a exploração sustentável do referido recurso. Assim, a principal proposta deste trabalho foi integrar em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), dados preexistentes sobre o meio físico e o tipo de uso e cobertura vegetal da terra para subsidiar os processos de gestão e outorga de água subterrânea no Distrito Federal. Com base num banco de dados georreferenciado e atualizado mediante observações de campo, foi possível definir as condições de infiltração e recarga da área, bem como classificar essas áreas em termos de pressão a que os sistemas aquíferos estão submetidos. Para tanto, utilizou-se o método do Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), o qual permitiu obter a capacidade máxima de retenção de água nos solos. Este dado foi integrado aos valores de precipitação média plurianual resultando no índice de disponibilidade hídrica da área. Este último, associado à declividade, gerou o potencial de recarga, que, agregado à vazão média de cada unidade hidrogeológica, resultou, especialmente, no grau de favorabilidade à exploração de água subterrânea no Distrito Federal. Desse modo, propõe-se cinco classes de outorga, considerando como critérios técnicos o grau de favorabilidade à exploração e o percentual da vazão dos poços. Com base nas observações de campo, foram ainda definidas três subclasses de outorga a partir das restrições impostas, não só pelo tipo de uso antrópico, mas, também, pela pressão de exploração e pelo risco de contaminação dos aquíferos.

Palavras-chaves: água subterrânea, sistema de informação geográfica, gestão e outorga.

ABSTRACT

In the Federal District of Brasilia (Capital of Brazil), the groundwater demand has grown significantly in the last decades. Migratory process promoted by local government policies, population increasing and inadequate territory occupation are the main factors that compromise qualitatively and quantitatively subsurface water resources. In this sense, it is necessary to establish technical criteria for the sustainable management of groundwater resources based on the local aquifer systems potentials. The main aim of the study is to organize and provide new information on the Federal District groundwater management process. The study employs pre-existent data of geology, soil, use and land cover merged into a Geographical Information System (GIS). Based on georeferenced and revised database, it was possible to define infiltration and aquifers recharge conditions as well as to classify aquifer system areas in terms of exploration pressure. In order to evaluate the maximum soil water retention capacity, the Soil Conservation Service (SCS) from United States Department of Agriculture (USDA) was used. Average long term precipitation measures were added to the database, generating the so called Water Resource Potential Map that, associated with a slope information, resulted into the Aquifer Recharge Potential Map of the region. The latter, aggregated with the mean water discharge from each hydrogeologic unit, resulted in the Groundwater Exploitation Favorability Map of the Federal District. After that, five classes of water user rights are introduced considering the aquifers favorability and the yield of the wells as the technical criteria to define the pumping percentage to each water user. Based on field observations, three water user right subclasses are defined related to restrictions imposed by the anthropogenic land use, regime of groundwater pumping and contamination risk assessment.

Keywords: groundwater, Geographical Information System (GIS), management, water user right.

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO

1.1 Introdução

O Brasil ocupa uma posição de destaque no cenário mundial no que diz respeito à disponibilidade de recursos hídricos. Porém, essa situação privilegiada contrasta com o desequilíbrio existente no território nacional quanto à distribuição desses recursos. Tal situação decorre, dentre outros fatores, da predominante concentração populacional nos grandes centros urbanos, da diversidade climática e das desigualdades sócio-econômicas observadas no país.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2006), cerca de 70% da água doce disponível no País encontra-se na bacia Amazônica, região habitada por menos de 10% da população. Portanto, apenas 30% dos recursos hídricos está disponível à maioria da população.

Com o crescimento demográfico brasileiro, associado às transformações econômicas do País, desde a segunda metade do século XX, o consumo de recursos hídricos está, cada vez mais, sendo tema de inúmeras reflexões e debates por parte não só de técnicos, como de toda sociedade. Esta abertura para discussões, quanto ao aproveitamento desses recursos, representa um avanço para que se tenha, no futuro, um modelo sustentável de desenvolvimento.

Nas últimas décadas, com o aumento dos conflitos existentes entre os diversos usuários dos recursos hídricos, a demanda por água subterrânea vem crescendo de forma acelerada e as previsões são de que essa tendência deverá continuar.

A utilização de água subterrânea no Brasil tem sido uma alternativa para diversos setores usuários, tais como: atividades industriais, irrigação, engarrafamento de águas minerais e potáveis de mesa, usos termais, turismo, agropecuária, abastecimento da população, etc. Estima-se que existam, hoje, no País, mais de 100.000 poços para abastecimento de indústrias, hospitais, hotéis de luxo, condomínios e clubes, além de milhares de poços para abastecimento da população mais carente (ANA 2006).

Segundo o IBGE (2006), aproximadamente 60% da sociedade brasileira é abastecida por água subterrânea e cerca de 90% dos rios, lagos e lagoas recebe, durante períodos de seca, contribuição de águas subterrâneas, estimada em 3.144 km^3 (60% de sua vazão).

Assim, conhecer a disponibilidade dos sistemas aquíferos e a qualidade de suas águas torna-se primordial para o estabelecimento de um sistema de gestão de águas subterrâneas que possibilite o comprometimento consciente da sociedade e dos usuários e, também, vise ao desenvolvimento sistêmico das bacias hidrográficas.

Um modelo de gerenciamento caracterizado por uma estrutura sistêmica adota, primordialmente, o planejamento estratégico por bacia hidrográfica, as tomadas de decisão através de deliberações multilaterais e descentralizadas e o estabelecimento de instrumentos legais e financeiros, tendo por base as informações técnicas. Essa mesma estrutura deve ser levada em consideração na gestão das águas subterrâneas.

Nesse tipo de gerenciamento, a organização é um sistema aberto e, portanto, o que nela ocorre depende ou resulta do que também ocorre no ambiente. A rede resultante das relações formadas em decorrência das demandas surgidas e das respostas emitidas leva à valorização do papel das negociações sociais e do ambiente em que se insere a organização.

Os maiores problemas relacionados à exploração de águas subterrâneas no Distrito Federal estão relacionados, principalmente, à impermeabilização das áreas de recarga, desmatamento, compactação da superfície, construção inadequada dos sistemas de captação, contaminação dos aquíferos, subdimensionamento e má conservação das redes adutoras e dos sistemas de reservação, falta de controle dos volumes bombeados e falta de conhecimento sobre os sistemas aquíferos e seu potencial.

No Distrito Federal, a Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal - ADASA é o órgão responsável pelo gerenciamento dos recursos hídricos. Verifica-se, contudo, que a implantação de ações, por parte da referida Agência, capazes de assegurar a gestão integrada dos recursos hídricos no Distrito Federal, ainda se apresenta de forma dispersa e incipiente no que diz respeito aos recursos hídricos subterrâneos.

A este fato é atribuída, principalmente, a ausência de um sistema de informações que garanta a efetiva implantação do processo de outorga de direito de uso de recursos hídricos, um dos instrumentos da gestão integrada que vigora no Distrito Federal desde a promulgação da Lei nº 512, de 28 de julho de 1993 e cujo objetivo é: “assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água”.

Dentre os sistemas de informações existentes, está aquele denominado Sistema de Informações Geográficas (SIGs), largamente utilizado como instrumento de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos. O uso dessa ferramenta ajuda a sintetizar as informações de campo e a prever as conseqüências de ações que serão realizadas.

As informações mais relevantes sobre os sistemas aquíferos do Distrito Federal, estão disponíveis nos trabalhos de Romano & Rosas (1970), Costa (1975), Barros (1987 e 1994), Mendonça (1993), Campos & Freitas Silva (1998 e 1999), Zoby (1999) Campos & Tröger (2000), Souza (2001), Joko (2002), Cadamuro (2002), Cadamuro & Campos (2005), Lousada (1999 e 2005), Silva (2003), Campos (2004) e Moraes (2004).

Entretanto, apesar do amplo conhecimento, pouco se investigou à respeito dos limites de sustentabilidade dos sistemas aquíferos do Distrito Federal. A situação atual desses sistemas vem preocupando diversos segmentos sociais, visto que, já se verifica a diminuição das vazões e o rebaixamento dos níveis freáticos. Além disso, os dados existentes ainda não foram compilados num SIG que vise quantificar o potencial exploratório dos aquíferos da região para subsidiar o processo de outorga de direito de uso dos recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal.

Em função das principais comunidades abastecidas por poços (São Sebastião e condomínios) e do uso pelos setores industrial, de serviços e institucional (escolas, clubes esportivos, etc.), estima-se que pelo menos 15% da população do DF seja abastecida por água subterrânea e que existam cerca de 10.000 poços artesianos na região. Tomando como base essas estimativas, pode-se afirmar que apenas 20% dos poços existentes são cadastrados/registrados e o restante funciona irregularmente. A construção de poços sem controle ou em desacordo com as normas técnicas representa risco efetivo de contaminação e já compromete o abastecimento de água em diversos condomínios.

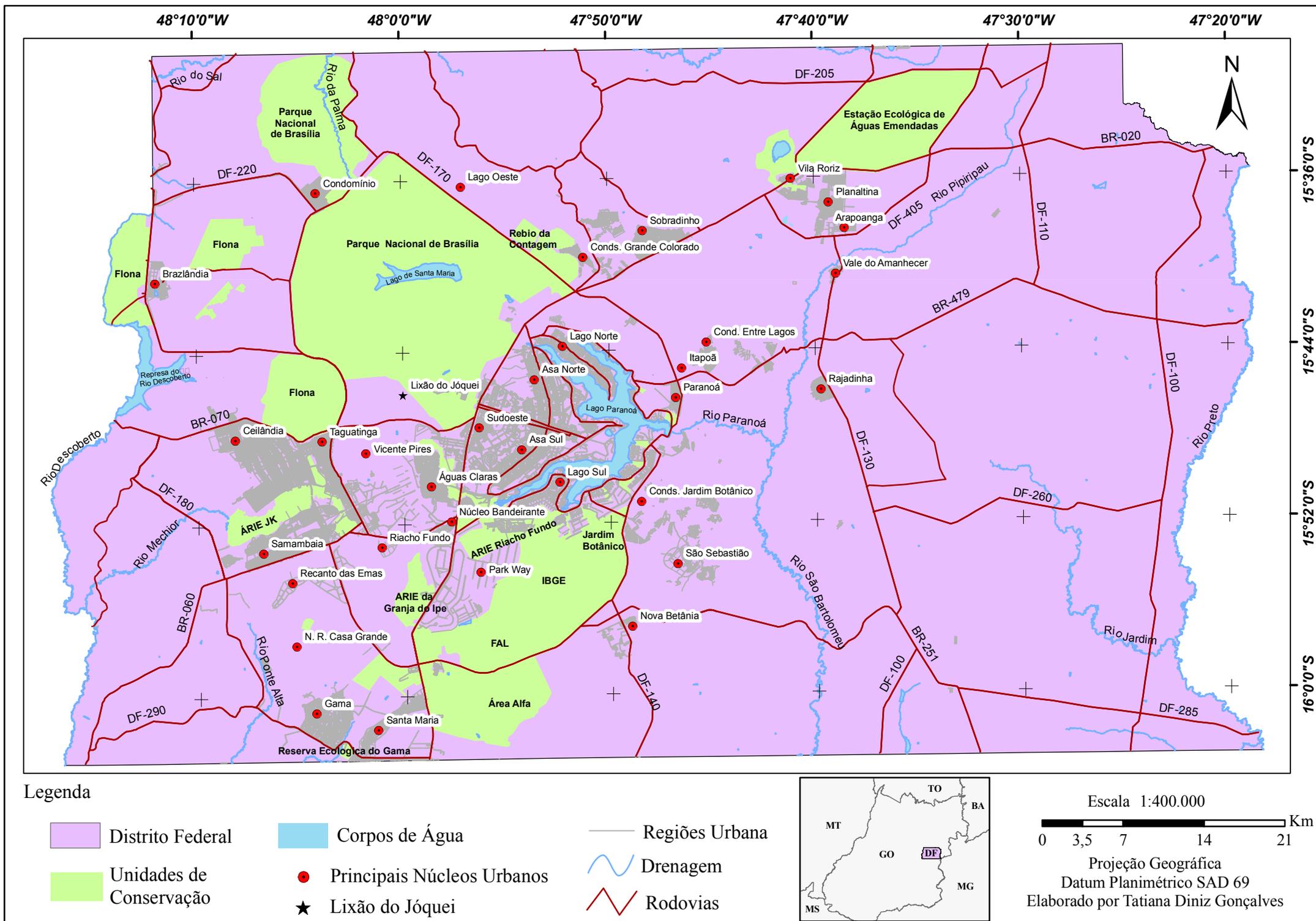
Um estudo realizado pelo Tribunal de Contas da União, em 2001, revelou que o Distrito Federal tem a terceira menor disponibilidade de água por habitante, ficando atrás apenas de Pernambuco e Paraíba, estados tradicionalmente castigados pela seca.

Assim, este trabalho propõe reunir em um SIG, dados necessários à construção de um modelo de gestão e outorga de água subterrânea que garanta o uso sustentável das águas da região, ou seja, pretende-se subsidiar a gestão de recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal a partir da integração de informações preexistentes.

1.2 Localização da Área de Estudo

Localizada no Planalto Central brasileiro, a região em estudo compreende o polígono do Distrito Federal, em altitudes que variam de 750 a 1.344 metros. Abrange uma área de aproximadamente 5.800 Km², limitada pelos paralelos de 15^o30'S e 16^o03'S; a leste, pelo rio Preto e, a oeste, pelo rio Descoberto (Figura 1.1).

Embora as bacias hidrográficas sejam unidades territoriais básicas para estudos hidrológicos, a delimitação da área por fronteiras político-administrativas justifica-se devido ao fato de integrar região subordinada ao poder público, possibilitando, assim, agilizar a execução das políticas públicas locais. Por outro lado, sabe-se que os limites geográficos das bacias hidrogeológicas não coincidem com os limites das bacias hidrográficas.



No caso do DF, por se tratar de bacias de pequeno porte, as variações quali-quantitativas, associadas às diferenças geográficas, são menos significativas do que em unidades maiores, onde a bacia hidrográfica como um todo pode apresentar dinâmica hídrica bem diferente daquela observada em pequenos trechos.

Porém, devido à similaridade entre os contextos hidrogeológicos da região em estudo e da área total das bacias hidrográficas da região, a metodologia empregada neste trabalho pode ser utilizada não só para subsidiar o processo de outorga de águas subterrâneas no Distrito Federal, mas, também, para embasar processos semelhantes nas demais áreas das bacias hidrográficas do Corumbá, Maranhão, Descoberto, Preto, São Marcos e São Bartolomeu.

Contudo, vale ressaltar que além dos fatores anteriormente mencionados, a escolha do polígono do DF como área de estudo levou, ainda, em consideração, a disponibilidade de dados existentes.

O Distrito Federal está localizado em um grande divisor de águas. A região é drenada por rios que pertencem a três das mais importantes bacias fluviais da América do Sul: bacias do Paraná, São Francisco e Araguaia-Tocantins. Possui 26 regiões administrativas e é marcado por um histórico de ocupação em que a retirada da vegetação nativa, a intensidade e a forma desordenada do uso do solo e dos recursos naturais, principalmente na periferia das áreas urbanas, propiciam a degradação do meio ambiente como um todo.

1.3 Objetivos

O objetivo geral do presente estudo é subsidiar a outorga de recursos hídricos subterrâneos no Distrito Federal a partir de técnicas de geoprocessamento. Assim, os objetivos específicos são:

- ◇ Investigar os processos de gestão e outorga, com enfoque nos recursos hídricos subterrâneos;
- ◇ Analisar os parâmetros hidrogeológicos e determinar aqueles que servirão de base ao estabelecimento de critérios para o processo de outorga;
- ◇ Coletar e reunir dados quali-quantitativos disponíveis relativos a águas subterrâneas, visando avaliar as principais características hidrodinâmicas (circulação e armazenamento) dos sistemas aquíferos existentes no DF;
- ◇ Montar um banco de dados georreferenciado e atualizado mediante observações de campo, com auxílio de imagens de satélite e estudos inéditos;
- ◇ Obter a capacidade máxima de retenção de água nos solos pelo método do Curva-Número;
- ◇ Definir as condições de infiltração e recarga da região em estudo, a partir da integração de mapas específicos;

- ◇ Classificar as áreas de uso da água subterrânea em termos de pressão a que o sistema está submetido, incluindo aspectos relacionados à exploração das águas, à impermeabilização das áreas de recarga e ao comprometimento da qualidade das águas;
- ◇ Gerar mapas, a partir de técnicas de geoprocessamento, que mostrem a distribuição espacial da disponibilidade hídrica, em escala adequada aos trabalhos hidrogeológicos, para subsidiar a outorga de recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal.
- ◇ Propor critérios para definição das vazões de poços tubulares profundos a serem outorgadas no Distrito Federal.

1.4 Estrutura da dissertação

Inicialmente será apresentado um capítulo introdutório que versa sobre a caracterização geral da área de estudo no que diz respeito aos aspectos diretamente relacionados aos recursos hídricos subterrâneos, contendo a descrição da geologia, clima, solos, geomorfologia e hidrogeologia do DF.

Em seguida, o trabalho apresenta o referencial teórico relativo às questões da gestão de recursos hídricos, ao método do Curva-Número (*CM*) e ao processamento de dados geográficos.

No capítulo seguinte é revelada a procedência dos dados e mostrado como o banco de dados georreferenciado foi construído, com destaque para a descrição de cada um dos planos de informação utilizados na modelagem, incluindo: mapa plani-altimétrico, mapa geológico, mapa de solos, mapa de uso e cobertura vegetal e mapa de capacidade de retenção de água no solo (derivado do Curva-Número).

No Capítulo V, os planos de informação (PIs) foram integrados e analisados com vistas a alcançar os objetivos propostos. Em virtude de serem dados oriundos de diversas fontes, para que os PIs pudessem ser manipulados adequadamente, foi necessário reprojeta-los para um mesmo sistema cartográfico. Para o presente trabalho foi considerado o sistema de projeção UTM e *datum* horizontal SAD69. Os PIs foram integrados, no formato matricial, dois a dois, por meio de operações algébricas cumulativas, no *software ArcGis*, com o auxílio das ferramentas do aplicativo *Spatial Analyst*.

Por fim, buscou-se tecer conclusões e recomendações, a respeito dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal, voltadas não só para atender aos objetivos acadêmicos, mas, sobretudo, para nortear práticas conscientes, fundamentadas no trabalho científico.

A Figura 1.2 mostra o fluxograma contendo as etapas e os métodos utilizados para a construção do banco de dados georreferenciado.

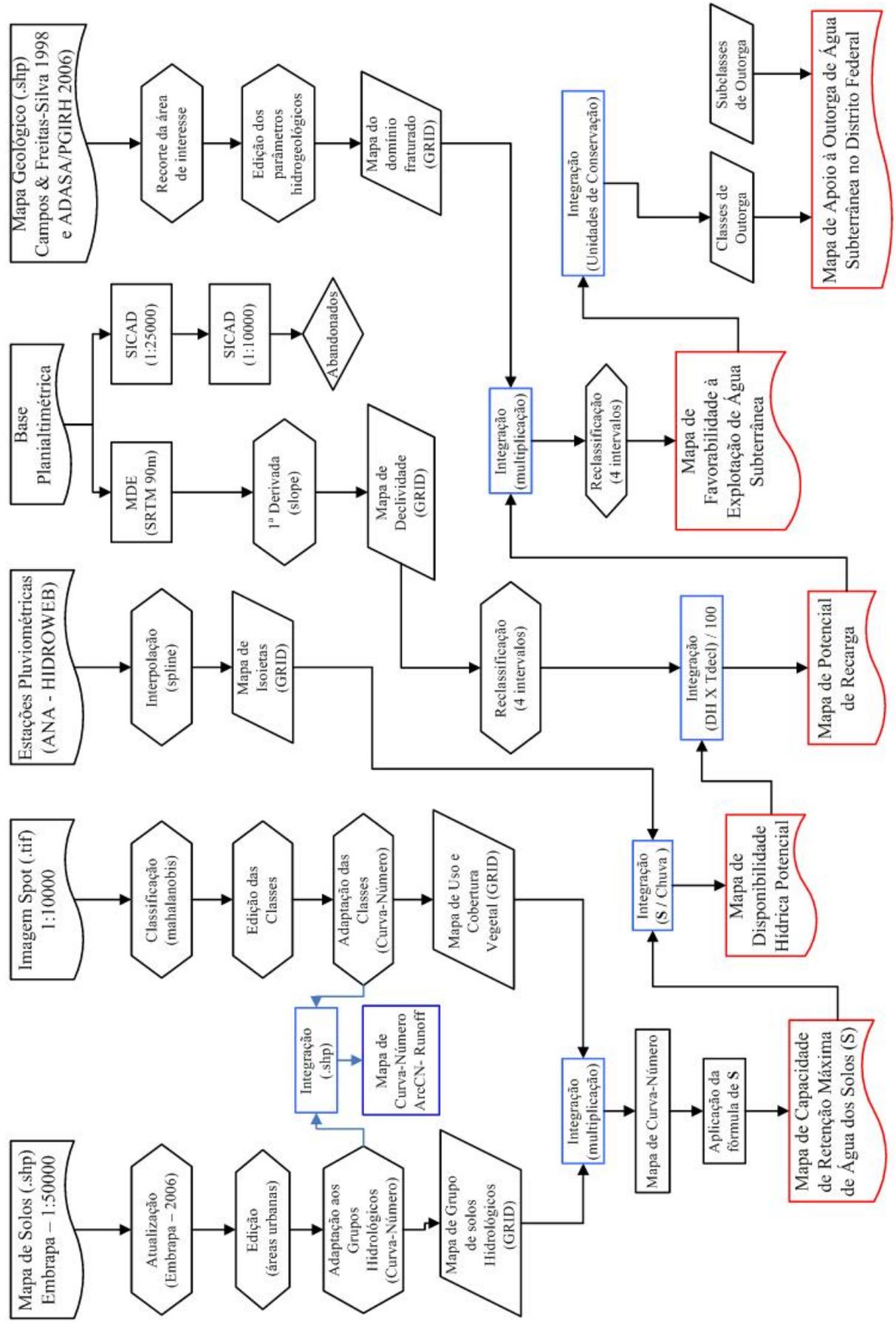


Figura 1.2 - Fluxograma Metodológico ([] - documento; { } - documento; \diamond - processo; \square - dados; \diamond - decisão).

Todo o desenvolvimento do presente estudo foi subsidiado por trabalhos de campo, os quais objetivaram confirmar aspectos específicos, tais como, o tipo de abastecimento de água da população (se por manancial superficial ou subterrâneo), a forma de esgotamento sanitário (se por redes de coleta ou *in situ*), a presença de focos potenciais de contaminação e demais características locais.

CAPÍTULO II

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais aspectos do meio físico do Distrito federal de forma que se tenha uma síntese dos conhecimentos fundamentais que controlam a distribuição e as disponibilidades de água subterrânea na região. Serão apresentados dados secundários resumidos sobre o clima, a vegetação, os solos, a geomorfologia, a geologia e a hidrogeologia do Distrito Federal.

2.2 Clima

De acordo com a classificação climática de Köppen (*in* CODEPLAN, 1984), no Distrito Federal podem ocorrer, em função de variações de temperaturas médias e de altitude, os seguintes tipos de clima: Tropical Aw, Tropical de Altitude Cwa e Tropical de Altitude Cwb.

O clima do Distrito Federal é caracterizado pela existência de forte sazonalidade: uma estação chuvosa e quente, entre outubro e abril, e outra fria e seca, de maio a setembro. A média pluviométrica anual varia entre 1.200 e 1.800 mm, onde o mês de janeiro apresenta o maior índice pluviométrico médio (320 mm/mês) e os meses de junho, julho e agosto registram os menores (50 mm/mês). A Figura 2.1 apresenta a distribuição anual da precipitação no Distrito Federal.

A temperatura média mensal varia entre 13 e 22°C, sendo setembro e outubro os meses mais quentes (20 a 22°C) e junho, o mais frio (16 a 18°C). A umidade relativa pode, durante alguns dias de agosto e setembro, atingir o valor mínimo de 11%, enquanto que nos meses mais úmidos varia em torno de 75%. A média de insolação no período mais seco, de abril a setembro, é de 200 h/mês e no período chuvoso, de outubro a março, é bem menor, com média de 130 h/mês.

2.3 Vegetação

Conforme Sema (1988 *in* Carvalho *et al.* 2006), a vegetação do Distrito Federal está situada na Província Fitogeográfica dos Cerrados. A paisagem descrita abrange dois grupos distintos: campos (limpo e sujo) e cerrados (campo-cerrado, cerrado e cerradão), com formações adicionais como matas ciliares, matas mesófilas e veredas. A seguir, estão descritas as principais características de cada tipo de vegetação.

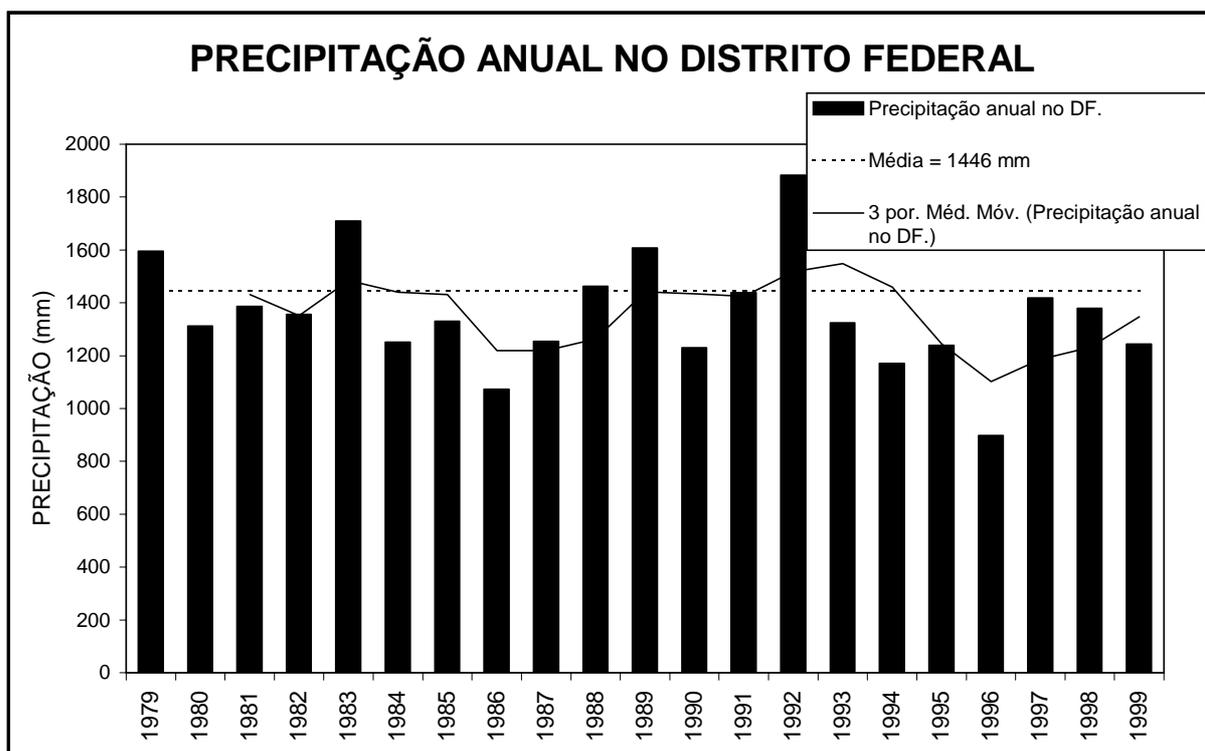


Figura 2.1 - Precipitação anual no Distrito Federal. (Fonte: CAESB 2001).

- ◇ **Campo Limpo:** caracteriza-se pela grande quantidade de gramíneas e outras ervas que raramente alcançam um metro de altura. Usualmente, esta vegetação é encontrada sobre solos arenosos, rasos e duros, nos quais ocorre deficiência de água nos meses secos. Pode chegar a recobrir a totalidade das chapadas arenosas, topos e encostas de morros (Figura 2.2);
- ◇ **Campo Sujo:** tem composição florística semelhante a do cerrado típico e a do cerrado ralo, entretanto, a cobertura de árvores e arbustos é mínima (cerca de 15%). Os arbustos e subarbustos que se destacam da camada graminosa têm caules relativamente finos. O solo é, em sua maior parte, recoberto por gramíneas que podem ultrapassar um metro. Nesse tipo de vegetação é comum o agrupamento de formas lenhosas do tipo “ilhas” de vegetação, os chamados campos de murundus;
- ◇ **Cerrado:** também denominado cerrado típico, é o mais freqüente do Distrito Federal. Caracteriza-se por árvores mais espaçadas e de menor porte; possui uma camada lenhosa que se destaca da camada rasteira (Figura 2.3);
- ◇ **Cerrado Ralo ou Campo Cerrado:** é uma forma intermediária de vegetação entre o cerrado típico e o campo sujo. O cerrado ralo difere do cerrado típico por ser mais aberto e pelas espécies que o compõe, pois, embora comum às outras fisionomias, apresenta porte mais reduzido;

- ◇ **Mata Galeria:** também chamada de Mata Ciliar quando margeia grandes cursos d'água, ocorre ao longo dos rios, córregos e outros cursos d'água. Pode ser subdividida em duas: a mata ciliar úmida ou inundada e a mata ciliar seca (Figura 2.4);
- ◇ **Mata Mesófica:** formação vegetal desenvolvida em tipos especiais de solos dos interflúvios que às vezes é confundida com a mata ciliar. Essa mata pode ser subdividida em: mata mesofítica Sempre Verde e Subcaducifólia/Caducifólia, dependendo do grau de deciduidade de seus componentes (Figura 2.5);
- ◇ **Vereda:** ambiente bastante peculiar em que o solo apresenta uma constante saturação d'água, formando verdadeiros pântanos. Ocorre geralmente em solos rasos, mas aparece também em encostas de morros e afloramentos rochosos;
- ◇ **Campo rupestre:** formação xerofítica, isto é, de aparência seca, de porte baixo, composto por ervas, subarbustos e formas anãs de espécies arbóreas das formações adjacentes. Acha-se estabelecido sobre terrenos rasos, rochosos, situados em altitudes elevadas.



Figura 2.2 - Campo limpo típico representado por gramínea sem a presença de arbustos.



Figura 2.3 - Cerrado *sensu strictu* composto por árvores de pequeno porte com caules retorcidos.



Figura 2.4 - Mata ciliar em vale encaixado, desenvolvida a partir da maior disponibilidade hídrica ao longo do eixo da drenagem.



Figura 2.5 - Mata mesofítica desenvolvida sobre solo fértil com espécies arbóreas tipicamente retas e de médio porte.

2.4 Solos

Com base no mapeamento pedológico realizado pelo Serviço Nacional de Levantamentos de Solos (EMBRAPA 1978), as classes de solos, denominadas Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Cambissolo Distrófico (Cd), recobrem cerca de 90% da área do Distrito Federal, e o processo pedogenético de laterização é o principal controlador da formação de solos na região.

A seguir, são apresentadas e descritas as principais classes de solo mapeadas pela EMBRAPA (1978) no Distrito Federal. A nomenclatura utilizada nessa síntese foi atualizada segundo os critérios de classificação brasileira dos solos (Santos *et al.* 2006).

- ◇ **Latossolos (Vermelho - LV e Vermelho Amarelo - LVA):** resultam de um alto grau de intemperismo e lixiviação, formando uma estrutura bastante porosa. Abrange a maior área do Distrito Federal, cerca de 55%, com mantos de até 20 metros de espessura, profundos e bem drenados, formados a partir de rochas metamórficas de baixo grau (ardósia, siltitos, metarritmitos, quartzitos e filitos) ricas em quartzo e sílica. Tais solos apresentam horizonte B com óxidos hidratados de ferro e alumínio, variável proporção de argila com estrutura 1:1 e minerais silicatados altamente resistentes, como o quartzo e o rutilo (Figura 2.6). A diferença entre os Latossolos Vermelho e os Vermelho Amarelo está relacionado com a cor do horizonte B, que varia de acordo com o tipo de óxido de ferro (Santos *et al.* 2006).
- ◇ **Cambissolos (Cb):** são solos caracterizados por apresentar horizonte B incipiente, com certo grau de desenvolvimento, porém, ainda não suficiente para decompor minerais primários de fácil intemperização (Figura 2.7). Apresentam-se pouco evoluídos onde os horizontes A e B são pouco espessos, com espessura inferior a um metro. São extremamente erodíveis e friáveis quando expostos. Cobrem cerca de 30% da região do Distrito Federal e ocorrem preferencialmente nas vertentes das áreas dissecadas das bacias dos rios Maranhão, Descoberto, Paranoá e Preto (Cardoso 2002, *in* Carvalho *et al.* 2006).
- ◇ **Neossolos (Flúvico - RU e Quartzarênico - RQ):** compreendem solos pouco desenvolvidos, em geral com espessura variável (desde centímetros até mais de 2 metros) e não apresentam qualquer tipo de horizonte B diagnóstico, porém, esta classe admite diversos tipos de horizontes superficiais, incluindo o horizonte O ou o H (hístico) pouco espesso (Figura 2.8). São geralmente ricos em minerais primários ou matéria orgânica e na região do DF ocorrem, preferencialmente, em condições de topografia acidentada.

- ◇ **Plintossolos (FF):** solos que apresentam horizonte plíntico, dentro dos primeiros 40 centímetros do perfil (Figura 2.9). São formados sob condições de restrição à percolação de água e, comumente, são fortemente ácidos, com baixa saturação por bases. Ocorrem normalmente em terrenos de várzeas, áreas com relevo plano ou suavemente ondulado.
- ◇ **Gleissolos (GX):** desenvolvidos sob grande influência do lençol freático, próximo ou mesmo na superfície, evidenciada pela acumulação de matéria orgânica na parte superficial ou pela presença de cores acinzentada, indicando redução de ferro (Figura 2.10). São permanentes ou periodicamente saturados por água, o que resulta na deficiência ou ausência de oxigênio causado pelo encharcamento. Estes solos ocorrem em áreas planas e em 4,2% da região do Distrito Federal.
- ◇ **Nitossolos (Vermelho - NV):** são profundos e bem desenvolvidos. Apresentam horizonte B nítico e argila de baixa atividade. São, em geral, moderadamente ácidos a ácidos, com saturação por bases variável.
- ◇ **Argissolos (PV):** são de profundidade variável, apresentam horizonte B textural e argila de atividade baixa. São geralmente ácidos com saturação por bases alta.
- ◇ **Chernossolos (MX):** compreendem solos com alta saturação por bases, argila de atividade alta e horizonte A chernozêmico. São pouco coloridos e imperfeitamente drenados.
- ◇ **Organossolos (O):** possuem horizonte hístico com mais de 40 cm de espessura, sobre qualquer outro tipo de horizonte subsuperficial (Figura 2.11). No DF comumente ocorrem em forte associação com gleissolos.

2.5 Geomorfologia

Segundo Ab'Saber (1964), as características geomorfológicas da paisagem do domínio morfoclimático do cerrado resultam de uma prolongada interação do regime climático tropical semi-úmido com fatores litológicos, edáficos e bióticos.

O Distrito Federal está localizado no Planalto Central do Brasil e caracteriza-se pela ocorrência de extensos níveis planos e suave ondulados (região de chapadas), por níveis inclinados que se estendem da base das chapadas e morros residuais em direção aos vales (pediplanos) e por áreas entalhadas e dissecadas pelos rios Paranoá, São Bartolomeu, Preto, Maranhão e Descoberto (Novais Pinto 1994ab).

As unidades geomorfológicas do Distrito Federal agrupam-se basicamente em três tipos de paisagens (macro-unidades):



Figura 2.6 - Perfil de Latossolo Vermelho (espessura total exposta de 220 cm).



Figura 2.7 - Exemplo de Cambissolo com seqüência de horizontes A, B incipiente e C na base.



Figura 2.8 – Neossolo Flúvico com horizonte A recobrendo o material aluvionar.



Figura 2.9 - Perfil de Plintossolo Pétrico com horizonte petroplíntico com cerca de 40 cm.



Figura 2.10 – Exposição da porção superficial de Gleissolo com horizonte A sobre Horizonte B glei com coloração clara característica.



Figura 2.11 – Topo de perfil de organossolo com horizonte hístico. Notar a má drenagem da área com nível d'água a cerca de 40 cm de profundidade.

- ◇ **Região de Chapada:** ocupa 35% da área do Distrito Federal, está acima da cota 1.000 metros e caracteriza-se por topografia plana e plano-ondulada. Destaca-se a Chapada da Contagem, onde ocorrem os latossolos predominantemente (Figura 2.12);
- ◇ **Área de Dissecação Intermediária:** ocupa 31% do Distrito Federal, correspondente às áreas fracamente dissecadas, drenadas por pequenos córregos, modeladas sobre ardósias, quartzitos e metarritmitos do Grupo Paranoá, onde também predominam os latossolos. Na unidade Depressão do Paranoá, igualmente situada acima da cota de 1.000 metros, com topografia suave, rodeada pelas chapadas, estão o Lago Paranoá e a cidade de Brasília (Figura 2.12); e
- ◇ **Região Dissecada de Vale:** ocupa 35% do Distrito Federal e corresponde à depressão sobre litologias de resistências variadas, ocupadas pelos principais rios da região (Figura 2.12).

Além dos três compartimentos anteriormente apresentados, ocorrem, também, em áreas mais restritas, as faixas de transição entre Região de Chapada e Região Dissecada de Vale denominadas de Escarpas e as de limites entre Região de Chapada e Área de Dissecação Intermediária denominadas de Rebordos (Martins & Baptista 1998).



A



B



C



D

Figura 2.12 - **A:** região de Dissecação de Vales, com relevo movimentado com vales incisivos; **B:** exemplo de borda de Chapada e Região de Vales Dissecados tendo uma escarpa em sua transição; **C:** paisagem típica do compartimento de Dissecação Intermediária e **D:** rebordo de transição entre Área de Chapada e Área de Dissecação Intermediária.

2.6 Geologia

A coluna estratigráfica do DF, considerando a ordem deposicional da base para o topo, é composta pelos grupos Canastra, Paranoá, Araxá e Bambuí. Em função de falhas de empurrão de baixo ângulo, hoje, o Grupo Canastra está posicionado sobre os grupos Paranoá e Bambuí (Freitas-Silva & Campo 1998).

O Grupo Paranoá ocupa cerca de 65% da área total do Distrito Federal, onde são reconhecidas sete das suas onze unidades regionais. A coluna estratigráfica a partir da base é: Quartzito conglomerático (**Q₂**) Metassiltitos / metarritmitos arenosos (**S**), Ardósias (**A**), Metarritmito arenoso / metassiltitos (**R₃**), Quartzitos (**Q₃**) (Figura 2.13), Metarritmitos argilosos (**R₄**); e a unidade Psamo-pelito-carbonatada (**PPC**) composta por lentes de metacalcários (Figura 2.14) e quartzitos intercalados em metassiltitos e metargilitos. O Grupo Canastra ocupa 15% da área do Distrito Federal, ocorrendo, principalmente, na porção sul do vale do rio São Bartolomeu. É essencialmente constituído por filitos (Figura 2.15) e, subordinadamente, por corpos lenticulares de mármore e quartzitos (Figura 2.16). O Grupo Araxá é formado essencialmente por xistos, ocupa a porção sudoeste, perfazendo cerca de 5% do Distrito Federal. O Grupo Bambuí ocorre na porção leste do DF, em cerca de 15% da área e é formado por metassiltitos e arcóseos.

A evolução estrutural do conjunto mostra que a atuação de várias fases tectônicas, afetando as rochas e gerando estruturas de diferentes idades, direções e estilos, sejam primárias ou secundárias foram resultantes da superposição de deformações de diferentes ciclos. As grandes estruturas do tipo falhas regionais são bem evidenciadas, como as identificadas no extremo sul do DF, no vale do rio São Bartolomeu e na porção centro-oeste norte, onde as rochas do Grupo Canastra foram jogadas sobre o Grupo Paranoá, por uma falha de empurrão (Freitas-Silva & Campos 1998).



Figura 2.13 - Quartzitos da Unidade **Q₃**, em típico padrão de afloramento em blocos maciços a fraturados.



Figura 2.14 - Frente de lavra em grande lente de metacalcário da Unidade **PPC**.

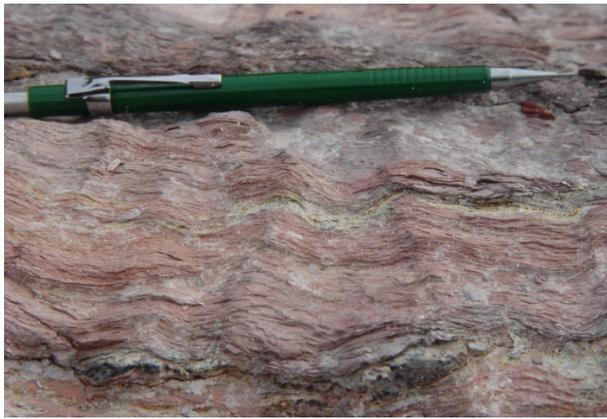


Figura 2.15 - Detalhe de calcifilito, alterado com foliação principal crenulada.



Figura 2.16 – Quartzitos laminados, brancos e micáceos do Grupo Canastra.

As fases de dobramentos resultaram em domos e bacias assimétricas que ocorrem na parte central do DF, condicionando um padrão de drenagem semi-angular, como aquele observado no ribeirão Paranoá e seus afluentes. O centro da estrutura é constituído basicamente por ardósias em uma seqüência rítmica com quartzitos e metassiltitos, circundado por um anel de quartzito que sustenta a chapada. O fraturamento é bem marcante, podendo ser destacado dois sistemas principais: direção N-NW e secundariamente, E-NE, com ângulo de mergulho vertical e subvertical.

2.7 Hidrogeologia

O contexto geológico do Distrito Federal possui dois domínios: o poroso e o fraturado. O domínio fraturado caracteriza-se pelo meio rochoso, em que os espaços ocupados pela água são representados pelos planos fraturados, microfraturas, diáclases, juntas, zonas de cisalhamentos e falhas. De acordo com as características geológicas, as feições estruturais e os dados de vazões de poços, o domínio fraturado foi classificado em quatro sistemas aquíferos: Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí. O sistema Paranoá foi dividido em cinco subsistemas: S/A; A; Q₃/R₃; R₄ e PPC. O sistema Canastra foi dividido em dois subsistemas: F e F/Q/M. Na Tabela 2.1, pode-se observar as principais características desses sistemas.

O domínio poroso no Distrito Federal é representado pelos solos aluviais e por aluviões. A importância local desses aquíferos está vinculada, principalmente, a dois parâmetros: a espessura saturada e a condutividade hidráulica (K). Em função desses parâmetros, esse domínio divide-se em quatro subsistemas denominados P₁, P₂, P₃ e P₄ (Campos & Freitas-Silva 1998) cujas características podem ser observadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 - Características do domínio fraturado.

Sistemas	Subsistemas	Condutividade Hidráulica	Vazão Média dos poços (L/h)	Importância Hidrogeológica	Tipo de Aquífero
Paranoá	S/A	$2,5 \times 10^{-6}$ a $1,7 \times 10^{-7}$ (m/s)	12.500	Elevada	Livres ou confinados, descontínuos, de meios anisotrópicos fissurais.
	A	Pequena	4.500	Muito pequena	Descontínuos, livres, com extensão lateral restrita.
	Q ₃ /R ₃	$1,7 \times 10^{-5}$ a $5,3 \times 10^{-7}$ (m/s)	12.500	Muito Alta	Descontínuos, com extensão lateral variável, livres ou confinados e anisotrópicos.
	R ₄	Baixa	6.500	Mediana	Restritos lateralmente, descontínuos e livres.
	PPC	Baixa a elevada	9.000	Variável	Descontínuos com alta variabilidade lateral.
Canastra	F	Baixa	7.500	Média a Moderada	Descontínuos e livres.
	F/Q/M	Muito elevada	33.000	Muito grande	Restritos lateralmente, livres ou confinados, descontínuos, heterogêneos e anisotrópicos.
Bambuí		Média a baixa	6.500	Mediana	Livres, descontínuos lateralmente e anisotrópicos.
Araxá		Muito baixa	3.500	Muito pequena	Descontínuos livres e anisotrópicos.

Fonte: Campos & Freitas-Silva (1998).

Tabela 2.2 - Características do domínio poroso.

Domínio	Tipo de Aquífero	Condutividade Hidráulica	Espessura Média do Saprolito	Vazão dos poços (l/s)	Importância Hidrogeológica	Solos
P₁	Intergranulares, contínuos, livres e grande extensão lateral.	Alta $2,8 \times 10^{-4}$ a $1,7 \times 10^{-5}$ (m/s)	20 a 25m	< 800	Elevada	Latossolo Vermelho Amarelo (arenoso) e Neossolo Quartzarênico
P₂	Intergranulares, contínuos, livres e grande distribuição lateral.	Média 10^{-5} a 10^{-6} (m/s)	> 20m	< 800	Mediana	Latossolo Vermelho Amarelo (argiloso)
P₃	Intergranulares, descontínuos, livres e distribuição lateral ampla.	Baixa $2,3 \times 10^{-6}$ a $1,4 \times 10^{-7}$ (m/s)	< 15m	< 800	Pequena	Latossolo Vermelho Amarelo (argiloso) e Cambissolos
P₄	Intergranulares, descontínuos, livres e muito restritos lateralmente.	Muito Baixa	< 2m	< 800	Muito Pequena	Cambissolos

Fonte: Campos & Freitas-Silva (1998).

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Gestão de Recursos Hídricos

A gestão de recursos hídricos pode ser entendida como o meio pelo qual se pretende mensurar e resolver as questões de escassez relativa dos recursos hídricos, bem como fazer o uso adequado, com vistas à otimização desses recursos em benefício da sociedade (Setti *et al.* 2001).

Segundo Schubart (2000), a gestão de recursos hídricos tem como objetivo assegurar o suprimento de água em quantidade e qualidade para atender às necessidades da sociedade e conduzir de forma sistêmica, as interações entre as intervenções humanas e o meio natural.

Para Setti *et al.* (2001), uma eficiente gestão de águas deve ser constituída por uma política que estabeleça as diretrizes gerais, um modelo de gerenciamento que defina a organização legal e institucional e um sistema de gerenciamento que reúna os instrumentos para o preparo e a execução do planejamento de uso, controle e proteção das águas.

No Brasil, o instrumento jurídico que trata do gerenciamento das águas é a Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997, que instituiu a Política e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Por introduzir mecanismos que possibilitam a existência de um sistema administrativo participativo, pautado na democracia, a referida Lei apresenta desafios para sua implementação. Porém, tais desafios se constituem numa oportunidade de caminhar no sentido da construção de um estilo de desenvolvimento sustentável para o Brasil (Lanna 2000).

A Lei nº 9.433, de 1997, estabelece cinco instrumentos essenciais à boa gestão do uso da água: o Plano Nacional de Recursos Hídricos, a outorga de direito de uso, a cobrança e o enquadramento dos corpos de água em classes de uso.

A outorga e a cobrança são importantes instrumentos de controle do uso dos recursos hídricos, na medida em que conferem ao usuário o direito de consumo de uma determinada vazão ou volume de água, de fonte específica, para certo fim, por um período definido, em condições inalienáveis. Porém, a eficácia desses instrumentos de política depende também de um eficiente sistema de fiscalização.

A implantação e a operacionalização do regime de outorga do direito de uso dos recursos hídricos respaldam-se em bases legal, institucional e técnica.

3.1.1 Base Legal

A legislação engloba os instrumentos jurídicos e normativos indispensáveis para assegurar a transparência do processo e a articulação entre os diferentes atores envolvidos no gerenciamento dos recursos hídricos.

A Constituição Federal de 1988 (Brasil 1988) estabelece duas classes de dominialidade para os corpos hídricos existentes no país, quais sejam: de domínio da União, os lagos, rios e quaisquer correntes de água em terrenos de seu domínio, ou que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a território estrangeiro ou dele provenham; e de domínio dos Estados ou do Distrito Federal, as águas superficiais ou subterrâneas, afluentes, emergentes e em depósito, ressalvadas, neste caso, na forma da lei, as decorrentes de obras da União. Ainda, estabelece que os potenciais de energia hidráulica sejam de domínio da União.

Quanto à base legal da outorga de direito de uso dos recursos hídricos de domínio da União, os principais instrumentos jurídicos são: a Lei nº 9.433 (Brasil 1997); a Lei nº 9.984, (Brasil 2000b) e a Resolução CNRH nº 16, (Brasil 2001); e a Resolução Conama nº 357 (Brasil 2005)

Conforme a Lei nº 9.433, de 1997, sujeitam-se à outorga os seguintes usos de recursos hídricos: derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo produtivo; extração de água de aquífero para consumo final ou insumo de processo produtivo; lançamento em corpo de água de efluentes e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final; aproveitamento dos potenciais hidrelétricos; e outros usos que alterem o regime ou a qualidade da água existente em um corpo de água.

Independem de outorga pelo poder público: o uso de recursos hídricos para satisfação das necessidades de pequenos núcleos populacionais, distribuídos no meio rural; as derivações, captações, lançamentos; e as acumulações de volumes de água insignificantes.

Toda outorga de direito de uso estará condicionada às prioridades de uso estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos e deverá respeitar a classe em que o corpo hídrico estiver enquadrado e preservar o uso múltiplo dos recursos hídricos.

A referida Lei também estabelece que a outorga de direito de uso poderá ser suspensa parcial ou totalmente, em definitivo ou por prazo determinado, nas seguintes circunstâncias: não cumprimento pelo outorgado dos termos da outorga; ausência de uso por três anos consecutivos; necessidade premente de água para atender a situações de calamidade, inclusive as decorrentes de condições climáticas adversas; necessidade de se prevenir ou reverter grave degradação ambiental; necessidade de se atender a usos prioritários, de interesse coletivo, para os quais não se disponha de fontes alternativas; e necessidade de serem mantidas as características de navegabilidade do corpo hídrico.

Os limites de prazos das outorgas de direito de uso de recursos hídricos de domínio da União, contados da data de publicação dos respectivos atos administrativos de autorização, estão definidos na Lei nº 9.984, de 2000, e são os seguintes: até dois anos, para início da implantação

do empreendimento objeto de outorga; até seis anos, para conclusão da implantação do empreendimento projetado e até trinta e cinco anos, para vigência da outorga de direito de uso.

A Lei nº 9.984, de 2000, estabelece, ainda, que a natureza e o porte do empreendimento, e também o período de retorno do investimento, quando for o caso, devem ser levados em conta no estabelecimento dos prazos, observando-se que, no caso de concessionárias e autorizadas de serviços públicos e de geração de energia, os mesmos coincidam com os dos respectivos contratos de concessão e atos administrativos.

Outorgas preventivas poderão ser concedidas com a finalidade de declarar a disponibilidade de água para os requerentes, possibilitando, aos investidores, o planejamento de empreendimentos que necessitem desses recursos, em conformidade com a Lei nº 9.984, de 2000. O prazo de validade da outorga preventiva será fixado levando-se em conta a complexidade do planejamento do empreendimento, limitando-se ao máximo de três anos.

Para licitar a concessão ou autorizar o uso de potencial de energia hidráulica em corpo de água de domínio da União, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL deverá promover, junto à Agência Nacional de Águas - ANA, a prévia obtenção de declaração de reserva de disponibilidade hídrica. A referida declaração será transformada automaticamente, pelo respectivo poder outorgante, em outorga de direito de uso de recursos hídricos à instituição ou empresa que receber da ANEEL a concessão ou autorização de uso do potencial de energia hidráulica.

A Resolução nº 16, de 2001, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, estabelece que a suspensão da outorga também pode ocorrer no caso de indeferimento ou cassação da licença ambiental.

Em atendimento ao previsto na Resolução CNRH nº 16, de 2001, a autoridade outorgante manterá cadastro dos usuários de recursos hídricos contendo, para cada corpo de água, no mínimo:

- registro das outorgas emitidas e dos usos que independem de outorga; vazão máxima instantânea e volume diário outorgado no corpo de água e em todos os corpos de água localizados a montante e a jusante;
- vazão máxima instantânea e volume diário disponibilizado no corpo de água e nos corpos de água localizados a montante e a jusante, para atendimento aos usos que independem de outorga;
- vazão mínima do corpo de água necessária à prevenção da degradação ambiental, à manutenção dos ecossistemas aquáticos e à manutenção de condições adequadas ao transporte aquaviário, quando couber, dentre outros usos.

3.1.2 Base Institucional

A base institucional é essencialmente constituída pelos Conselhos de Recursos Hídricos, órgãos gestores de recursos hídricos e Comitês de Bacia Hidrográfica e pelas Agências de Água, além de outras entidades intervenientes.

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos foi regulamentado através do Decreto nº 2.612, de 03 de junho de 1998 (Brasil 1998), tendo, entre suas competências, o estabelecimento de diretrizes complementares para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, em particular, de critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos.

Através da Resolução CNRH nº 7, de 21 de junho de 2000 (Brasil 2000a), foi aprovada a instituição da Câmara Técnica Permanente de Integração de Procedimentos, Ações de Outorga e Ações Reguladoras, com a atribuição de propor: diretrizes para integração de procedimentos entre as instituições responsáveis por ações de outorgas e ações reguladoras ligadas a recursos hídricos, ações conjuntas entre as instituições, visando a otimizar os procedimentos relacionados com assuntos afins; diretrizes e ações conjuntas para soluções de conflitos nos usos múltiplos dos recursos hídricos; ações mitigadoras e compensatórias.

A Lei nº 9.433, de 1997, estabelece que a outorga será efetivada por ato da autoridade competente do Poder Executivo Federal, dos Estados ou do Distrito Federal, podendo o Poder Executivo Federal delegar aos Estados e ao Distrito Federal competência para conceder outorga de direito de uso de recurso hídrico de domínio da União.

Com a aprovação da Lei nº 9.984, em 2000, a atribuição de outorgar o direito de uso de recursos hídricos, em corpos de água de domínio da União, passou a ser competência da Agência Nacional de Águas - ANA.

Entre as competências dos Comitês de Bacia Hidrográfica está a de propor ao respectivo Conselho Nacional ou Estadual de Recursos Hídricos, de acordo com os domínios destes, as acumulações, derivações, captações e lançamentos de pouca expressão, que não necessitam obrigatoriamente de outorga, como também a aprovação dos planos de bacia, que devem apresentar as prioridades de uso de recursos hídricos a serem observadas na emissão das outorgas de direito de uso.

Com relação ao instrumento de outorga, cabe às Agências de Água: manter balanço da disponibilidade de recursos hídricos em sua área de atuação; manter cadastro de usuários de recursos hídricos; e propor o enquadramento dos corpos hídricos.

3.1.3 Base Técnica

O embasamento técnico compreende: informações quanto às disponibilidades do corpo hídrico, em termos de quantidade e qualidade; cadastro de usuários; informações

hidrometeorológicas para avaliar, principalmente, as necessidades de demandas dos usuários de irrigação; critérios técnicos para análise das demandas dos pedidos; e modelos de análise dos impactos do uso no corpo hídrico, os chamados modelos de suporte à decisão.

A outorga de direito de uso deve respeitar as prioridades de uso estabelecidas nos planos de bacia e as classes de enquadramento, bem como preservar o uso múltiplo dos recursos hídricos.

A solicitação de outorga deve ser encaminhada ao respectivo órgão gestor, através de formulários específicos para o uso de recursos hídricos a que se destina, explicitando, além de dados gerais do usuário e do empreendimento, a necessidade de água para a sua atividade, e o seu regime de variação. É conveniente que os formulários sejam encaminhados com os estudos técnicos que embasaram a definição dos dados apresentados nos mesmos, o que pode ser dispensado no caso de pequenos volumes de captação.

O procedimento técnico para expedição de outorga segue basicamente as seguintes etapas: avaliação da compatibilidade entre a demanda apresentada pelo usuário e os usos para os quais se destina; avaliação da disponibilidade hídrica em termos quantitativos e qualitativos no local do empreendimento; e avaliação do seu impacto no corpo hídrico.

Para a avaliação dos impactos devem ser necessariamente utilizados métodos embasados em critérios científicos e computacionais para responder satisfatoriamente às necessidades de análise e auxiliar na tomada de decisão.

No caso das outorgas concedidas pela União, os principais sistemas de suporte à decisão utilizados pelos técnicos da Superintendência de Outorga são: o Sistema de Controle de Outorgas, para o controle administrativo; o Sistema de Informações Georreferenciadas de Outorgas, utilizado na visualização/processamento espacial dos pleitos de outorga; e o Sistema Quali-Quantitativo de Análise de Outorgas, empregado na análise técnica dos aspectos quantitativos e qualitativos dos usos da água. Os três sistemas mencionados compõem os Sistemas de Apoio ao Gerenciamento de Usuários da Água, cujo texto de referência está disponível no *site*: <http://mma.gov.br/port/srh/ACERVO/estudos/docsisag.html>.

Um sistema em planilhas eletrônicas que permite o controle quantitativo dos usuários foi desenvolvido para as bacias do rio Pardo (MG e BA), rio Preto (DF, GO e MG) e rio São Marcos (GO e MG). Trata-se de uma ferramenta que, embora pareça prática e de fácil manutenção, depende de informações regionais detalhadas de difícil acesso.

Tem surgido no Brasil uma série de sistemas de suporte à gestão de recursos hídricos representados por sistemas computacionais que realizam transformações chuva-vazão, dimensionamento e operação de reservatórios, alocação de água para diferentes usos, controle de usuários e armazenamento de informações georreferenciadas. Dentre esses sistemas estão: o

MODSIM (Universidade do Colorado e USP); o PROPAGAR (IPH –UFRGS); o SSDACO (UFPE), o Sistema da Bacia do rio Paraíba do Sul (UFRJ - COPPE); e o Sistema de Informações Territoriais Aplicado à Gestão de Recursos Hídricos – SITER (UFSM – Rio Grande do Sul). Entretanto, ainda não foi desenvolvido nenhum aplicativo específico para a outorga de recursos hídricos subterrâneos.

Alguns Estados, como Ceará, São Paulo e Rio Grande do Sul, avançaram bastante na implementação de seus sistemas de gestão das águas, entretanto, percebe-se a fragilidade no estabelecimento de critérios de outorga para águas subterrâneas. Apesar da importância e do amparo legal, a outorga, hoje, no Brasil, ainda é um instrumento não consolidado na maioria dos estados.

No Distrito Federal, a outorga está prevista na Lei nº 2.725, de 13 de junho de 2001 (DF 2001a), e encontra-se regulamentada pelos Decretos nºs 22.358 (DF 2001b) e 22.359 (DF 2001c), de 31 de agosto de 2001, que dispõem, respectivamente, sobre a outorga do direito de uso de água subterrânea e superficial.

A Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal - ADASA, criada pela Lei nº 3.365, de 16 de junho de 2004 (DF 2004), tem a competência de outorgar o direito de uso de recursos hídricos em corpos de água de domínio do DF ou delegados pela União ou Estados.

Os usos dos recursos hídricos sujeitos à outorga no DF incluem: a derivação ou a captação de água, superficial ou subterrânea, para consumo final ou insumo de processo produtivo e o aproveitamento dos potenciais hidrelétricos e outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade de um corpo d'água.

O art. 12 da Lei nº 2.725, de 2001, estabelece que os usos não sujeitos à outorga no DF incluem as acumulações de água, as derivações, as captações e os lançamentos considerados insignificantes, conforme critérios definidos pelos órgãos gestores dos recursos hídricos.

O Decreto n 22.359, de 2001, institui as seguintes modalidades de outorga: **Outorga Prévia**: aplicada ao uso superficial quando for necessária a reserva de volume de água durante a implantação de projetos e para a perfuração de poços; **Outorga do Direito de Uso**: aplicada ao uso superficial ou subterrâneo; **Reserva de Disponibilidade Hídrica**: aplicada ao setor elétrico; e **Registro**: aplicado às captações e acumulações consideradas insignificantes.

No que diz respeito ao uso de água subterrânea, está sujeito à outorga prévia a extração de água de aquífero para consumo final ou insumo de processo produtivo, por meio de poços tubulares e/ou manuais com vazão superior a 5m³/dia. Quanto aos usos considerados insignificantes, necessitam de registro os poços manuais com vazão menor ou igual a 5m³/dia e os poços construídos para pesquisa.

De acordo com o Decreto nº 22.358, de 2001, “Os volumes definidos pelas outorgas serão determinados com base nos quantitativos da vazão nominal de cada poço tubular, e/ou na vazão de segurança de cada subsistema aquífero, e/ou nas características hidrogeológicas de cada subsistema aquífero, observando o grau de ocupação da área e seu grau de favorabilidade ao uso da água subterrânea”. Dessa forma, as outorgas são analisadas caso a caso, a depender das condições existentes em cada bacia e/ou região.

3.2 Parâmetros Básicos para a Gestão e Outorga dos Recursos Hídricos Subterrâneos

A gestão de recursos hídricos subterrâneos visa, não só, preservar esse recurso, mas otimizar o seu uso por meio da ampliação da oferta de água ou da solução de problemas relativos ao abastecimento de águas provenientes de aquíferos.

Para um efetivo gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, é fundamental conhecer os parâmetros hidrogeológicos que caracterizam os sistemas aquíferos de determinada região e compreender a dinâmica de uso e cobertura da terra para que medidas, visando à eliminação ou mitigação de impactos negativos, sejam tomadas com base em critérios científicos, capazes de garantir a sustentabilidade atual e futura dos sistemas aquíferos.

Os principais parâmetros necessários à gestão e outorga dos recursos hídricos subterrâneos podem ser determinados em função do potencial dos sistemas aquíferos, da disponibilidade regional desses sistemas e da demanda dos usuários da água.

Os parâmetros a serem considerados para que seja estabelecido o potencial dos sistemas aquíferos, devem, segundo Almeida *et al.* (2006), ser:

- ◇ Geologia – constitui o principal componente para a compreensão sobre as características dos aquíferos, sua distribuição espacial, extensão lateral, áreas de recarga e exutório, camadas confinantes e bases impermeáveis. Fornece informações quanto a litologia (tipos de rochas e variações), estratigrafia (empilhamento das diversas unidades), tectônica e estruturação (deformações por dobramentos e falhamentos), sedimentologia (ambientes de formação das rochas supracrustais) e geoquímica (composição química das rochas). De acordo com a importância das rochas para os aquíferos, as unidades geológicas podem ser classificadas em função das suas propriedades intrínsecas (porosidade e permeabilidade), condições de ocorrência (extensão, espessura e estrutura) e grau de explotabilidade (boa, regular ou difícil). Os aquíferos do domínio fraturado são caracterizados pelos meios rochosos, onde os espaços ocupados pela água são representados por discontinuidades planares como fraturas, microfraturas, diáclases, juntas, zonas de cisalhamento e falhas. Os parâmetros hidrodinâmicos com a condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S)

são muito variáveis em função do tipo de rocha e da densidade de interconexão das estruturas planares. Esses parâmetros, associados à espessura saturada, porosidade eficaz e área de distribuição dos aquíferos, são fundamentais para a outorga de água subterrânea, uma vez que, a partir deles é possível estabelecer as reservas renováveis, permanentes e exploráveis dos reservatórios subterrâneos.

- ◇ Geomorfologia – representa o padrão de relevo que predomina em cada compartimento morfológico. É caracterizado pelo tipo de rocha, pendente regional e estruturas e pode ser modificado por processos de erosão, transporte, sedimentação, intemperismo, oscilação de nível freático, entre outros. Para estudos hidrogeológicos deve-se avaliar o funcionamento hídrico do relevo e como os compartimentos geomorfológicos influenciam nas condições gerais de circulação, recarga e descarga dos aquíferos. O padrão de relevo, a densidade de drenagem, o comprimento das rampas, a hipsometria, assimetria dos vales, tipos de coberturas e demais aspectos geomorfológicos podem ser utilizados como critério de avaliação do potencial dos aquíferos. O relevo também é um fator fundamental que controla a presença de sistemas de fluxo locais, intermediários ou regionais em determinada região.
- ◇ Clima – elementos climáticos como a temperatura do ar, a precipitação pluvial, a insolação e a evaporação, exercem grande influência na quantificação dos recursos hídricos disponíveis, pois estão diretamente relacionados ao ciclo hídrico e, portanto, são determinantes de excedentes ou déficits hídricos. A precipitação pluvial é uma das etapas do ciclo hidrológico e constitui fator importante para os processos de escoamento superficial, infiltração, evaporação, transpiração, recarga dos aquíferos, vazão básica dos rios e outros. Para melhor compreensão da distribuição espacial e temporal da precipitação pluvial é necessário utilizar séries históricas de dados. As alturas de chuvas informam as tendências pluviométricas de certa região e são utilizadas para o cálculo do balanço hídrico. O balanço hídrico é um sistema fechado com armazenamento de água na superfície do terreno, em rios e lagos, oceanos, na atmosfera e no subsolo (Tucci 2000). O cálculo do balanço hídrico obedece ao princípio da conservação da massa segundo o qual, em um sistema qualquer, a diferença entre as entradas e as saídas é igual à variação do armazenamento dentro do sistema (Manoel-Filho 2000). Uma formulação simplificada do balanço hídrico pode ser representada da seguinte maneira:

$$P - ER - R - I = \Delta S \quad (3.1)$$

onde: P = precipitação; ER = evapotranspiração; R = deflúvio ou fluxo superficial total (*run off*); I = infiltração e; ΔS = variação de estoque

Na prática, o problema em resolver esta equação decorre da dificuldade de medir e quantificar os seus vários termos.

- ◇ Solo – constitui a camada natural mais externa da superfície da terra e, é por onde, se iniciam os processos de recarga dos aquíferos. O estudo do funcionamento hídrico dos solos é fundamental para o entendimento dos processos de circulação hídrica subterrânea tendo em vista as três funções primordiais que os solos desempenham: função filtro, função reguladora e função recarga. Um importante parâmetro a ser considerado para a análise e classificação de aquíferos do domínio poroso é a capacidade de infiltração do solo, determinado pela condutividade hidráulica vertical da zona vadosa (K_v).

Para quantificar a disponibilidade dos sistemas aquíferos deve-se avaliar, além do meio físico, a dinâmica do uso e da cobertura da superfície, considerando que, o grau de impermeabilização em zonas de recarga é inversamente proporcional à infiltração.

O gerenciamento da demanda por água subterrânea requer considerar os interesses de distintos atores, bem como os tipos de uso (consuntivos e não consuntivos). Segundo Costa (2000), a elaboração de um inventário socioeconômico regional, que contenha o cadastro de usuários, as demandas específicas, a qualidade da água requerida e os problemas relacionados à cobrança pelo uso da água são informações relevantes tanto para a avaliação e outorga quanto para o controle e o acompanhamento da demanda hídrica.

Dentre os principais critérios técnicos utilizados para a determinação das vazões a serem outorgadas destacam-se:

1 - a vazão média do aquífero: essa vazão é determinada a partir de uma população de poços com diferentes características construtivas. Alguns órgãos responsáveis pela outorga, adotam um percentual da vazão média como referência para a distribuição das reservas entre os diversos usuários;

2 - o percentual da vazão nominal do poço: nesse caso é utilizada uma fração da vazão obtida a partir da estabilização do nível dinâmico após o bombeamento contínuo por 24 horas. O percentual deve variar em função do grau de comprometimento da região em que se solicita a outorga.

3 - a vazão de base: esse critério considera que todo o fluxo de água em cursos superficiais nos períodos críticos de recessão de chuvas representa fluxo subterrâneo. Assim a outorga é feita com base em um percentual da vazão de base, usualmente até 30%. Esse critério apresenta limitações importantes, uma vez que não pode ser aplicado em regiões semi-áridas com rios intermitentes (com fluxo de base igual a zero) e em regiões onde não existam dados históricos de vazões;

4 - a análise qualitativa dos dados de ensaios de bombeamento: nessa avaliação utilizam-se os dados de ensaios de bombeamento com destaque para a capacidade específica do poço. A razão da vazão pelo rebaixamento (nível estático menos o nível dinâmico) pode ser utilizada como critério relativo, de forma que quando o valor for muito reduzido a vazão a ser outorgada deve ser muito inferior que a vazão do ensaio. Por outro lado, quando o valor for elevado (o que é comum em sistemas cársticos e intergranulares de grande transmissividade) a vazão outorgada pode ser próxima à vazão do ensaio de bombeamento.

5 - o rebaixamento disponível: esse parâmetro é obtido a partir de uma análise matemática sobre dados de ensaio de bombeamento escalonados, com pelo menos três estágios com vazões crescentes. O rebaixamento disponível pode ser utilizado como valor máximo a que o nível dinâmico pode alcançar, independentemente da vazão do ensaio.

6 - a vazão de segurança: corresponde à espacialização das reservas explotáveis por unidade unitária de área (km^2 ou hectare, por exemplo). As reservas explotáveis são obtidas a partir da soma da reserva renovável com um percentual da reserva permanente do aquífero. Nesse caso a vazão outorgável será função da área de aquífero a que cada usuário tem a sua disponibilidade.

Além dos critérios para se definir a vazão a que cada usuário terá direito, outro aspecto importante é a definição do tempo diário de bombeamento de forma que os sistemas aquíferos se tornem sustentáveis.

Costa (2000) propõe, para sistemas fraturados um tempo máximo diário de 16 horas de bombeamento. Esse tempo é adequado para que o nível d'água no interior do sistema de fraturas se recupere e mantenha uma área de exploração mais reduzida.

3.3 Metodologia do Curva-Número (CN)

O método do Curva-Número (CN) foi desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo - SCS; atualmente chamado de Serviço de Conservação de Recursos Naturais (NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e sua primeira publicação data de 1954.

O referido método é comumente usado para determinar a quantidade de chuva que infiltra no solo ou no aquífero e a quantidade de chuva que escoa superficialmente numa determinada região (Zhan & Huang 2004). Originalmente foi elaborado para áreas rurais, mas com o seu aprimoramento, o método se difundiu, ganhou credibilidade e passou a ser aplicado em áreas urbanas de diversos países.

De acordo com Pickbrenner *et al.* (2005), as principais vantagens deste método são a existência de um parâmetro único, o CN, e a ampla bibliografia sobre experiências de sua

utilização. As principais desvantagens referem-se à desconsideração da percolação e da recuperação da capacidade de infiltração dos solos.

Por outro lado, a popularidade do referido método está ligada a sua simplicidade em relacionar apenas três variáveis: precipitação, umidade antecedente do solo e o chamado complexo hidrológico solo-cobertura.

A altura de chuva precipitada até o início da formação do escoamento superficial constitui aquilo que o SCS designa por perdas iniciais e representa por I_a . Essas perdas são constituídas por três parcelas: interceptação, retenção em depressões e infiltração até a saturação da camada superficial do solo. Em função dessas três variáveis raramente serem conhecidas, o SCS propôs a seguinte relação linear entre as variáveis S e I_a :

$$I_a = \lambda S \quad (3.2)$$

onde S representa a capacidade de retenção máxima de água dos solos.

A partir de dados obtidos de diversas bacias hidrográficas dos Estados Unidos, dos quais 50% apresentaram valores variando entre 0,0095 e 0,38, o SCS adotou um valor médio para $\lambda = 0,2$. Assim tem-se:

$$I_a = 0,2S \quad (3.3)$$

De acordo com os princípios adotados pelo SCS, não existe precipitação efetiva até que as perdas iniciais sejam integralmente satisfeitas. Isso quer dizer que, a ocorrência de escoamento superficial está condicionada a verificar se:

$$P > I_a \quad (3.4)$$

onde P representa a precipitação ocorrida desde o início e I_a representa as perdas iniciais.

Após verificar a condição indicada pela expressão (3.4), o SCS considera que a precipitação efetiva pode ser calculada pela seguinte equação:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (3.5)$$

em que P representa a altura de água precipitada e Q representa a altura de precipitação efetiva.

O CN é um parâmetro adimensional e os valores encontram-se tabelados de acordo com a combinação do grupo hidrológico do solo com o tipo de cobertura e tratamento da terra, ambos associados a uma condição de umidade antecedente do solo.

O CN representa uma curva média de infiltração que separa a parte da precipitação que escoará superficialmente. O número de cada curva está relacionado com a capacidade de retenção máxima dos solos (S), dado pela equação 3.6.

$$S (mm) = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3.6)$$

Resolvendo a equação 1 para *CN* tem-se:

$$CN = \frac{25400}{254 + S (mm)} \quad (3.7)$$

Os valores do *CN* retratam as condições do solo, variando desde uma cobertura muito permeável (limite inferior, valor = 0) até uma cobertura completamente impermeável (limite superior, valor = 100). Observa-se, contudo, a existência de condições teóricas extremas de *S*, ora tendendo ao infinito, ora sendo nulo.

A condição de umidade antecedente do solo foi usada como um parâmetro representativo da variabilidade natural de umidade. Desse modo, a variabilidade do *CN* depende do volume precipitado num período de 5 a 30 dias antecedente a uma determinada chuva. Tendo em vista tal fato, o SCS definiu três condições de umidade antecedente de solo, como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Condições antecedentes de umidade de solo.

Condição I	Situação em que os solos estão secos, mas não no ponto de murcha das plantas.
Condição II	Caso em que os solos se encontram nas condições que precederam a ocorrência de uma enchente máxima anual. A umidade do solo deve corresponder à capacidade de campo.
Condição III	Condição em que os solos se apresentam quase saturados, quando da ocorrência de precipitações consideráveis durante cinco dias anteriores.

Fonte: McCuen 1989 *in* Sartori 2004.

Segundo Ogrosky & Mockus (1964) *in* Sartori (2004), os solos podem ser classificados de acordo com suas propriedades hidrológicas, independentemente da cobertura e da declividade da bacia.

O SCS definiu quatro grupos hidrológicos de solo, conforme as taxas de infiltração ou condutividade hidráulica aparente de cada solo. Os grupos foram estabelecidos com base na premissa de que solos com características semelhantes responderão de forma semelhante a uma chuva de longa duração e intensidade apreciável.

A tabela 3.2 apresenta os grupos de solos definidos pelo SCS e as características hidrológicas que os distinguem.

Tabela 3.2 - Grupos de solos segundo as características hidrológicas estabelecidas pelo SCS.

Grupo	Característica hidrológica
A	Compreende os solos com baixo potencial de escoamento, contendo alta taxa de infiltração uniforme quando completamente molhados, consistindo, principalmente, de areias e cascalhos, ambos profundos e excessivamente drenados. Estes solos têm uma alta taxa de transmissão de água (*taxa mínima de infiltração: > 7,62 mm/h).
B	Compreende os solos contendo moderada taxa de infiltração quando completamente molhados, consistindo, principalmente, de solos moderadamente profundos a profundos, moderadamente a bem drenados, com textura moderadamente fina a moderadamente grossa. Estes solos possuem uma moderada taxa de transmissão de água (*taxa mínima de infiltração: 3,81 - 7,62 mm/h).
C	Compreende os solos contendo baixa taxa de infiltração quando completamente molhados, principalmente com camadas que dificultam o movimento da água das camadas superiores para as inferiores, ou com textura moderadamente fina e baixa taxa de infiltração. Estes solos têm uma baixa taxa de transmissão de água (*taxa mínima de infiltração: 1,27 – 3,81 mm/h).
D	Compreende os solos que possuem alto potencial de escoamento, tendo uma taxa de infiltração muito baixa quando completamente molhados, principalmente solos como os argissolos que possuem alto potencial de expansão. Pertencem a este grupo, solos com uma grande permanência do lençol freático, solos com argila dura ou camada de argila próxima a superfície e solos expansivos agindo como materiais impermeabilizantes próximos da superfície. Estes solos têm taxa muito baixa de transmissão de água (*taxa mínima de infiltração: 0 - 1,27 mm/h).

Fonte: Ogrosky e Mockus 1964, Mockus 1972, * McCuen 1989, *in* Sartori 2004.

A partir da análise em um grande número de bacias, foi possível ao SCS, tabelar os valores do *CN* com base no tipo de solo, sua utilização e condição de superfície no que diz respeito à potencialidade de infiltrar água ou de gerar escoamento superficial.

As Tabelas 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 mostram os números da curva de escoamento superficial para os complexos hidrológicos solo-cobertura em condição II de umidade antecedente da bacia e perdas iniciais (I_a) igual à $0,2S$.

Conforme já mencionado, os valores do *CN* variam de 0 a 100 e quanto menor for o valor, maior será a taxa de infiltração no solo.

Vale ressaltar que o número da curva apresentado nas tabelas 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 é um valor obtido para as condições médias correspondentes à condição II de umidade antecedente. Para que o método seja aplicado em outras condições é necessário converter o *CN* da condição II para uma das outras duas.

Tabela 3.3 - *CN* para campos áridos e semiáridos dos EUA ($I_a = 0,2s$ e Condição II de umidade antecedente).

Descrição da cobertura		Número da curva para os grupos hidrológicos dos solos			
Tipo de cobertura	Condição Hidrológica	A	B	C	D
Herbáceos – mistura de gramíneas, ervas e pequeno cultivo de arbustos, sendo estes em maior quantidade.	má		80	87	93
	média		71	81	89
	boa		62	74	85
Carvalho e choupo – mistura de carvalho, choupo, mogno, borbo e outros arbustos.	má		66	74	79
	média		48	57	63
	boa		30	41	48
Pinheiro, Zimbro ou ambos – gramíneas em menor quantidade.	má		75	85	89
	média		58	73	80
	boa		41	61	71
Artemíseas com gramíneas em menor quantidade.	má		67	80	85
	média		51	63	70
	boa		35	47	55
Arbustos do deserto.	má	63	77	85	88
	média	55	72	81	86
	boa	49	68	79	84

Fonte: Rawls *et al.* 1996 in Sartori 2004.

Equações que correlacionam o *CN* da condição II com as demais condições foram desenvolvidas por Hawkins *et al.* (1985) e podem ser usadas para converter o *CN* nas condições I e III de umidade antecedente, entretanto as correlações estabelecidas são válidas apenas para o intervalo $50 \leq CN \leq 95$. As referidas equações são:

$$CN_I = \frac{CN}{2,281 - 0,01281.CN} \quad (3.8)$$

$$CN_{III} = \frac{CN}{0,427 + 0,00573.CN} \quad (3.9)$$

Fonte: Sartori 2004.

Tabela 3.4 - *CN* para terras agrícolas cultivadas ($I_a = 0,2s$ e Condição II de umidade antecedente).

Descrição da cobertura			Número da curva para os grupos hidrológicos dos solos				
Tipo de cobertura	Tipo de manejo do solo ¹	Condição Hidrológica	A	B	C	D	
Terra arada	Solo exposto	---	77	86	91	94	
	CR	má	76	85	90	93	
boa		74	83	88	90		
Plantios em Linha	SR	má	72	81	88	91	
		boa	67	78	85	89	
	SR + CR	má	71	80	87	90	
		boa	64	75	82	85	
	C	má	70	79	84	88	
		boa	65	75	82	86	
	C + CR	má	69	78	83	87	
		boa	64	74	81	85	
	C & T	má	66	74	80	82	
		boa	62	71	78	81	
	C & T + CR	má	65	73	79	81	
		boa	61	70	77	80	
	Pequenos grãos ou cereais	SR	má	65	76	84	88
			boa	63	75	83	87
SR + CR		má	64	75	83	86	
		boa	60	72	80	84	
C		má	63	74	82	85	
		boa	61	73	81	84	
C + CR		má	62	73	81	84	
		boa	60	72	80	83	
C & T		má	61	72	79	82	
		boa	59	70	78	81	
C & T + CR		má	60	71	78	81	
		boa	58	69	77	80	
Semeação densa de leguminosas ou dos pastos em rodízio	SR	má	66	77	85	89	
		boa	58	72	81	85	
	C	má	64	75	83	85	
		boa	55	69	78	83	
	C & T	má	63	73	80	83	
		boa	51	67	76	80	

¹Cobertura com resíduos de colheita, aplicada somente se o resíduo está em no mínimo 5% da superfície por todo o ano. CR: cobertura com resíduo de colheita; SR: linha reta; C: curva de nível e T: terraceamento

Fonte: Rawls *et al.* 1996 *in* Sartori 2004.

Tabela 3.5 - CN para áreas urbanas ($I_a = 0,2s$ e Condição II de umidade antecedente).

Descrição da cobertura		Número da curva para os grupos hidrológicos dos solos			
Tipo de cobertura e condição hidrológica	Porcentagem média da área impermeável	A	B	C	D
<i>1 - Áreas urbanas desenvolvidas</i>					
1.1. Espaço aberto (gramados, parques, campos de golfe, cemitérios, etc.):					
- Condição ruim (cobertura com grama < 50%)		68	79	86	89
- Condição média (cobertura com grama 50 a 75%)		49	69	79	84
- condição boa (cobertura com grama > 75%)		39	61	74	80
1.2. Áreas Impermeáveis:					
- Lotes de estacionamentos pavimentados, telhados, estradas, etc.		98	98	98	98
1.3. Ruas e rodovias:					
- Pavimentadas com calçadas, guias e galeria de drenagem		98	98	98	98
- Pavimentadas com abertura de valas ou fossos para drenos		83	89	92	93
- Pedregulhadas		76	85	89	91
- De terra		72	82	87	89
1.4. Áreas urbanas no deserto (meio oeste dos EUA):					
- Paisagem natural do deserto (somente áreas permeáveis)		63	77	85	88
- Paisagem artificial do deserto (barreiras de ervas impermeáveis, arbustos do deserto com 25 a 50 mm de material em decomposição com areia ou pedregulho na borda do caule)		96	96	96	96
1.5. Zonas urbanas:					
- comerciais e escritórios	85%	89	92	94	95
- Industriais	72%	81	88	91	93
- Residenciais pela média do tamanho dos lotes:					
- 500 m ² ou menor	65%	77	85	90	92
- 1000 m ²	38%	61	75	83	87
- 1300 m ²	30%	57	72	81	86
- 2000 m ²	25%	54	70	80	85
- 4000 m ²	20%	51	68	79	84
- 8000 m ²	12%	46	65	77	82
<i>1 - Áreas urbanas em desenvolvimento:</i>					
- Áreas mudadas recentemente (somente áreas permeáveis, sem vegetação)		77	86	91	94

Fonte: Rawls *et al.* 1996 in Sartori 2004.

Tabela 3.6 - CN para outros usos agrícolas ($I_a = 0,2s$ e Condição II de umidade antecedente).

Descrição da cobertura		Número da curva para os grupos hidrológicos dos solos			
Tipo de cobertura	Condição Hidrológica	A	B	C	D
Pastagem, pastos ou campos de pastagem (forragem contínua para pastoração).	má	68	79	86	89
	média	49	69	79	84
	boa	39	61	74	80
Campinas ou prado (gramíneas contínuas, protegidas da pastoração e destinadas geralmente a meda de feno).		30	58	71	78
Capoeira (mistura de arbustos com ervas e gramas, sendo os arbustos em maior quantidade).	má	48	67	77	83
	média	35	56	70	77
	boa	30	48	65	73
Reflorestamento – combinação de gramas e pomares ou árvores (CN computado para 50% de bosques e 50% de pastagem).	má	57	73	82	86
	média	43	65	76	82
	boa	32	58	72	79
Reflorestamento.	má	45	66	77	83
	média	36	60	73	79
	boa	30	55	70	77
Fazendas e chácaras (construções, travessas e lotes).		59	74	82	86

Fonte: Rawls *et al.* 1996 in Sartori 2004.

No Brasil, existem algumas propostas de classificação hidrológica dos solos. Setzer & Porto (1979) enquadraram 41 tipos de solos, registrados naquela época no Estado de São Paulo, em doze zonas ecológicas, as quais possuem cinco grupos de solo determinados conforme sua natureza física e tipo de perfil. Os autores se basearam em estudos pedológicos havidos para todas as formações geológicas do Estado e em fotografias aéreas.

Outra classificação relevante é o trabalho de Lombardi-Neto *et al.* (1989), em que foram estabelecidos quatro grupos de solos de acordo com seu funcionamento hídrico e características, visando sua aplicação em práticas conservacionistas, também, no Estado de São Paulo. Esta proposta foi baseada no trabalho de Levantamento e Reconhecimento dos Solos do Estado de São Paulo (Brasil, 1960) e os solos foram enquadrados nos referidos grupos segundo a profundidade, permeabilidade, textura da camada superficial e subsuperficial e a relação textural da argila entre os horizontes A e B.

Sartori (2005) propôs, seguindo os mesmos princípios de Lombardi-Neto, uma classificação hidrológica para as unidades de solos do Estado de São Paulo e adaptou a tabela do CN para áreas agrícolas. Seus estudos se embasaram na comparação dos resultados dos CN's definidos a partir de dados de campo com os CN's estimados pelas classificações hidrológicas do SCS (Ogrosky & Mockus 1964) e de Lombardi-Neto *et al.* (1989).

Os resultados obtidos revelaram que a proposta de Lombardi-Neto é mais adequada às condições brasileiras, tendo em vista o comportamento diferenciado dos solos usados no desenvolvimento da classificação hidrológica original do SCS.

Como pode ser observado, existem diversas maneiras de se determinar o *CN*. Atualmente, técnicas de geoprocessamento têm sido frequentemente utilizadas. Para obter o valor do *CN* médio para cada sub-bacia de contribuição da bacia do rio Criciúma - SC, Pickbrenner *et al.* (2005) efetuaram o cruzamento dos seguintes mapas: Mapa de Sub-Bacias, Mapa de Tipos de Solos e Mapa de Uso do Solo.

A partir do mapa pedológico do município de Criciúma, foi feita uma reclassificação dos solos considerando aspectos como geração de escoamento superficial, taxa de infiltração, porcentagens de areia, silte e argila na sua composição e grau de permeabilidade, conforme definido por Tucci (2000). O mapa de uso do solo foi definido a partir de 27 ortofotocartas que passaram pelos processos de segmentação, classificação e transformação em categoria temática.

O *CN* também pode ser determinado a partir da ferramenta *ArcCN - Runoff* em formato *.dll* do aplicativo *ArcMap* do *software ArcGis*, desenvolvida por Zhan & Huang (2004). O mapa de solos, em formato vetorial, já classificado segundo os grupos hidrológicos, é associado ao mapa de uso e cobertura da terra, também em formato vetorial, com auxílio da mencionada ferramenta, gerando, automaticamente, um mapa de variação espacial do *CN*. O conjunto de dados do *CN* utilizado pelo programa foi construído com base no estudo de várias bacias hidrográficas.

3.4 Processamento de Dados Geográficos

O processamento de dados geográficos ou geoprocessamento pode ser definido como a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais no tratamento de informações geográficas (Câmara *et al.* 2004).

O Sistema de Informações Geográfica (SIG) é a principal ferramenta de Geoprocessamento que realiza o tratamento computacional de dados geográficos e recupera informações com base na sua localização e relacionamento espacial, bem como nas suas características alfanuméricas.

A multiplicidade de usos e possíveis perspectivas dos SIGs são algumas das razões pelas quais o seu conceito vem sendo amplamente discutido. Autores como Maguirre *et al.* (1992), Bonham-Carter (1994), Burrough & McDonnell (1998), Câmara *et al.* (2004) e outros, procuram definir, cada um a seu modo, a utilização interdisciplinar dessa ferramenta.

De fato, os SIGs apresentam o ferramental necessário para, através da localização e do processamento de dados geográficos, correlacionar várias áreas do conhecimento e realizar