



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Recursos Hídricos no Distrito Federal: Modelagem
Hidrológica para subsidiar a gestão sustentável na
bacia do Ribeirão Pípiripau**

TESE DE DOUTORADO

N° 04

Tatiana Diniz Gonçalves

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos
Orientador

**Brasília
2012**

TATIANA DINIZ GONÇALVES

**Recursos Hídricos no Distrito Federal: Modelagem
Hidrológica para subsidiar a gestão sustentável na
bacia do Ribeirão Pípiripau**

**Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Geociências Aplicadas da Universidade de Brasília, como
requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em
Geociências Aplicadas. Área de concentração:
Geoprocessamento e Análise Ambiental**

Orientador : Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos

Brasília

2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Recursos Hídricos no Distrito Federal: Modelagem Hidrológica para subsidiar a gestão sustentável na bacia do Ribeirão Pípiripau

Tatiana Diniz Gonçalves

TESE SUBMETIDA AO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS PRÉ-REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos
(Instituto de Geociências - Universidade de Brasília)
(ORIENTADOR)

Prof. Dr. Chang Hung Kiang
(Instituto de Geociências e Ciências Exatas/ Universidade Estadual Paulista)
(EXAMINADOR EXTERNO)

Prof. Dr. Almany Costa Santos
(Centro de Tecnologia e Geociências/ Universidade Federal de Pernambuco)
(EXAMINADOR EXTERNO)

Prof^a. Dr^a. Noris Costa Diniz
(Instituto de Geociências/ Universidade de Brasília)
(EXAMINADORA INTERNA)

Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha
(Instituto de Geociências/ Universidade de Brasília)
(EXAMINADOR INTERNO)

BRASÍLIA/DF, 4 de julho de 2012.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília. Acervo 1004237.

G635r Gonçalves, Tatiana Diniz.
Recursos hídricos no Distrito Federal : modelagem hidrológica para subsidiar a gestão sustentável na bacia do Ribeirão Pípiripau / Tatiana Diniz Gonçalves. -- 2012.
xiv, 148 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) - Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, 2012.

Inclui bibliografia.

Orientação: José Eloi Guimarães Campos.

1. Recursos hídricos - Desenvolvimento.
2. Gestão ambiental. 3. Geomorfologia.
4. Hidrogeologia. 5. Distrito Federal (Brasil).
1. Campos, José Eloi Guimarães. II. Título.

CDU 502.656

Agradecimentos

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

Ao orientador e amigo, professor José Eloi, pela dedicação, colaboração, conhecimentos transmitidos e, acima de tudo, por acreditar em mim.

Ao professor Edson Sano, pelas sugestões e correções dos artigos em inglês.

Ao professor Detlef, pelo apoio e por ter me despertado o interesse em ir para a Alemanha.

Ao professor Weiss, pela orientação e prontidão em atender minhas solicitações.

Ao professor Kolditz, pela orientação na Alemanha.

Ao meu marido Gilson, pela compreensão, paciência, amor e dedicação incondicional em cuidar da nossa casa e dos nossos filhos, aqui e na Alemanha.....serei eternamente grata.

Aos meus filhos Pedro, Luíza e Clara por sobreviverem na minha ausência.

Aos meus pais Alberto e Maria Inês, pela vida e oportunidades que me deram e, também, pelo exemplo de dedicação e garra.

Às minhas irmãs Patrícia e Carol, e o meu irmão Rodrigo, por auxiliar em cuidar dos meus filhos na minha ausência.

Ao meu tio, médico e amigo Hélio, pelos cuidados com a minha saúde física, mental e espiritual.

À minha prima Maria Virginia, pelo auxílio com as traduções.

Ao meu amigo Pedro, pelo companheirismo nessa luta que vencemos.....*"a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem."* (Guimarães Rosa).

Aos colegas do Instituto de Geociências da UnB, prof. Paulo Menezes, prof^a. Tati, prof. Roig, Serjão, Elusai, Laiza, Júlia, Ph e Gervásio, que de alguma forma colaboraram para realização deste estudo.

Aos colegas do UFZ, Christoph, Agnes, Tom, Karsten, Wenging, Anne, Sebastian, Nadine, Renê, Ralf, Pablo, Michael e Reiner, que contribuíram na pesquisa e me auxiliaram na Alemanha.

Aos funcionários do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, em especial, à Stela e Bubu, pelo apoio logístico.

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

***“ao Gilson, meu marido, e aos meus
filhos Pedro, Luíza e Clara dedico”.***

A efetiva gestão de bacias hidrográficas e dos ecossistemas que as constituem exige um conhecimento abrangente dos processos hidrológicos e dos impactos que tenham relevância para as comunidades humanas. No entanto, as interações, os fluxos e as retro-alimentações próprias dos hidrossistemas são dinâmicas, complexas e de difícil entendimento. Como apoio ao entendimento e à avaliação dos sistemas hidrológicos, os modelos matemáticos são ferramentas amplamente utilizadas em estudos voltados à recuperação e à proteção de mananciais. Para compreender os processos hidrológicos e subsidiar a gestão dos recursos hídricos no Distrito Federal (DF), este estudo propõe um modelo matemático destinado a representar as interações de fluxo na bacia do Ribeirão Pipiripau. O modelo foi desenvolvido com base nos levantamentos de dados geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, climatológicos e pedológicos. Devido à escassez de dados hidrogeológicos, parâmetros como condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e capacidade específica (Cs), foram estimados para os aquíferos da região do DF. Testes de infiltração foram aplicados em diferentes tipos de solo, considerando as características texturais e estruturais de cada classe. Para tanto, foram utilizados os métodos “open-end-hole”, o ensaio de permeabilidade de Heitfeld e funções de pedotransferência para estimar K dos aquíferos porosos. Os resultados foram comparados entre si e com trabalhos anteriores, mostrando que a amplitude de variação de K é de 10^{-8} m.s⁻¹ a 10^{-6} m.s⁻¹. Os Latossolos apresentam valores mais elevados de K, enquanto os Cambissolos possuem valores reduzidos. Observou-se também que K diminui com a profundidade devido ao aumento do conteúdo de argila. As variações de K mostraram a heterogeneidade dos aquíferos porosos, condicionadas pelas características texturais e estruturais dos solos. Diferentes métodos para o tratamento de dados de teste de bombeamento foram aplicados em mais de 80 poços profundos do DF, a fim de estimar parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos fraturados. Foram aplicados os métodos de Theis para aquífero totalmente confinado, de Cooper & Jacob para aquífero confinado, de Agarwal para dados de recuperação de poço e de Cooper & Jacob para estimar T a partir de dados de capacidade específica. Os resultados mostraram que valores de T obtido por meio do método modificado de Cooper & Jacob utilizando dados de capacidade específica são mais coerentes para o tipo de aquífero estudado. Os processos hidrogeológicos da bacia do Pipiripau foram simulados no *software OpenGeoSys* (OGS) para representar a região de estudo. A estrutura 3-dimensional da área foi gerada no *software Groundwater Modeling System* (GMS), a partir de dados de poços e do Modelo Digital de Elevação (DEM). A aplicação do método numérico no OGS considerou as condições de contorno, as propriedades hidráulicas dos materiais e as taxas de recarga dos aquíferos. A calibração foi realizada no aplicativo PEST, integrado ao OGS com a utilização dos dados disponíveis. Os resultados da calibração mostraram a distribuição da carga hidráulica do modelo estacionário onde os maiores valores ocorrem nas áreas de recarga de leste à oeste e os menores valores na porção sudoeste da bacia. Os resultados do modelo estacionário podem ser usados como condição inicial para a simulação do modelo transiente. Os valores simulados indicam boas estimativas das condições hidrodinâmicas, no entanto, é preciso adicionar ao modelo numérico, dados relativos ao bombeamento dos poços, uso do solo, irrigação entre outros, para otimizar a modelagem hidrológica e, de modo sistêmico, subsidiar a gestão de recursos hídricos na bacia do Pipiripau. Com base nos dados compilados da literatura e de observações de campo, foi desenvolvido um método de análise a partir da interação dos sistemas ambientais e socioeconômicos da área de estudo. Os resultados mostraram os padrões espaciais que refletem a degradação biótica, física e socioeconômica da área. Constatou-se também, que a integridade dos recursos hídricos vem sendo ameaçada não só pelo aumento da demanda por água, mas também pela supressão da vegetação nativa e pelo uso indiscriminado de insumos agrícolas. Contudo, ressalta-se que a inclusão de módulos de análise dos parâmetros sociais nos aplicativos de modelagem, como por exemplo, gerenciadores de concorrência entre usuários, determinação de usuários preferenciais e de critérios objetivos para distribuição das vazões em diferentes períodos do ano, etc., pode ser uma alternativa para mediação de conflitos pelo uso da água.

Palavras-chave: gestão integrada, recursos hídricos, modelagem

ABSTRACT

The effective management of watersheds and their ecosystems demands a broad knowledge of the hydrological processes and of the relevant impacts for human communities. However, the interactions, the outflows and the feedbacks inherent to hydrosystems are, at the same time, dynamic, complex and of difficult understanding. As a base for the understanding and evaluation of the hydrological systems, the mathematical models are the most used tools in studies whose objectives are the recovering and protection of watersheds. In order to understand the hydrological processes and to support the management of hydro resources in the Federal District (FD), this study proposes a mathematical model aimed to represent the flow interactions in the Pipiripau Stream basin. The development of this model was based on surveys of geological, hydrogeological, geomorphologic, climatological and soil data. Due to the lack of hydrogeological data, parameters as hydraulic conductivity (K), transmissivity (T) and specific capacity (Cs) were estimated for the Federal District region aquifers. To do so, it was used the methods of "open-end-hole", the Heitfeld permeability essay, and the functions of pedotransfer to estimate K of the shallow aquifers. The results were compared with each other and with previous studies results, showing that the range of variation of K goes from 10^{-8} m/s to 10^{-6} m/s. The Oxisols presented higher values for K, whilst the Inceptisols showed lower values. It was observed also that K gets lower to depth due to the increasing content of clay. K variations showed the heterogeneous nature of the porous aquifers, conditioned to the soils textural and structural features. Several methods of treating data from pumping test were applied to more than eighty deep wells in the FD in order to estimate the hydrodynamic parameters for the fractured aquifers. The methods of Theis applied to fully confined aquifers, the Cooper & Jacob method to confined aquifers, the Agarwal method for wells recovery data, and the Cooper & Jacob method to estimate T from specific capacity data. The results showed that the T values, which were obtained from Cooper & Jacob method, using data of specific capacity, are more consistent to the studied aquifers. The hydrogeological processes of the Pipiripau basin were simulated through the OpenGeoSys (OGS) software in order to represent the region of study. The 3-dimensional structure of the area was generated through the Groundwater Modeling System (GMS) software, taking the wells data and the Digital Elevation Model (DEM). The application of the numerical method in the OGS considered the contour conditions, the hydraulic proprieties of the materials, and the recharge of the aquifers. The calibration was done in the PEST application, integrated with the OGS. The results showed the distribution of the steady-state hydraulic head in the model domain, where the highest values occurred in the east and west recharge areas and the lowest values were found in the southwest of the basin. The results of this first study can be a used as initial condition for the transient simulation and to provide a scientific basis for water resource management. The results of calibration showed a good estimates of the hydrodynamic conditions, but it is necessary to add the data concerning to the discharge rates of wells, use of the soil, irrigation, and social economical characteristics to the numerical model in order to optimize the hydrogeological modeling and, systemically, support the management of the water resources in the Pipiripau basin. Based on the compiled data from the literature and on field observation, starting from the interaction of environmental and socioeconomic systems of the studied area, an analysis method was developed. The results showed spatial patterns, which reflect the biotical, physical and socioeconomic degradation of the area. It was also found that the integrity of the water resources is endangered, not only by the increased demand for the use of the water, but also by the destruction of the native vegetation and by the widespread use of agricultural inputs. However, it is noteworthy that the inclusion of analysis modules of social parameters in the modeling applications like, for example, the managers of competition among users, the preferential users determination and of the objective flows distribution criteria, in different times of the year, and others, could be an alternative to mediate the existing conflicts for the use of the water.

Keywords: integrated management, water resources, modeling

AGRADECIMENTOS	V
RESUMO	VII
ABSTRACT.....	VIII
INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO	3
1.2 - JUSTIFICATIVA E HIPÓTESE.....	3
1.3 - OBJETIVOS	4
1.4 - ESTRUTURA DA TESE.....	4
CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO.....	5
2.1 - LOCALIZAÇÃO	5
2.2 - CLIMA	6
2.3 - VEGETAÇÃO E USO DO SOLO.....	7
2.4 - SOLOS	12
2.5 - GEOMORFOLOGIA	15
2.6 - GEOLOGIA	18
2.7 - HIDROGEOLOGIA.....	20
2.8 - HIDROLOGIA.....	23
CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	28
3.1 - GESTÃO INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS.....	28
3.1.1 - <i>Outorga de águas superficiais e subterrâneas</i>	29
3.1.2 - <i>Outorga de Uso de Águas no Distrito Federal</i>	33
3.2 - PARÂMETROS BÁSICOS PARA A GESTÃO INTEGRADA DOS RECURSOS HÍDRICOS.....	35
3.3 - O CICLO HIDROLÓGICO E O BALANÇO HÍDRICO	38
3.4 - INTERAÇÕES ENTRE CORPOS D'ÁGUA SUPERFICIAIS E AQUÍFEROS.....	41
3.5 - MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	45
CAPÍTULO 4 - POROUS AQUIFERS FROM THE FEDERAL DISTRICT, BRAZIL: CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF HYDRAULIC CONDITIONS.....	50
ABSTRACT.....	50
4.1 - INTRODUCTION	51
4.2 - STUDY AREA.....	52
4.3 - METHODS.....	55
4.3.1 - <i>Open-End-Hole Method</i>	55
4.3.2 - <i>Pedotransfer Functions - Rosetta Software (Schaap et al, 2001)</i>	58
4.4 - RESULTS AND DISCUSSIONS.....	61

4.4.1 - <i>Open-End-Hole and Permeability Test after Heitfeld (1979)</i>	62
4.4.2 - <i>K-Values Obtained by the Rosetta Method</i>	63
4.5 - CONCLUSIONS.....	66
CAPÍTULO 5: EVALUATION OF DIFFERENT PUMPING TESTS METHODS APPLIED TO FRACTURED AQUIFERS: CASE STUDY IN THE FEDERAL DISTRICT, BRAZIL	67
ABSTRACT.....	67
5.1 - INTRODUCTION	67
5.2 - HYDROGEOLOGIC SETTING OF STUDY AREA.....	68
5.3 - PUMPING TEST METHODS	70
5.4 - RESULTS AND DISCUSSIONS.....	72
5.4.1 - <i>Data Analysis</i>	73
5.4.2 - <i>Results of the Hydrodynamics Parameters</i>	78
5.5 - CONCLUSIONS AND RECOMMENDATION.....	79
CAPÍTULO 6: GROUNDWATER MODEL OF THE PIPIRIPAU WATERSHED, FEDERAL DISTRICT OF BRAZIL	80
ABSTRACT.....	80
6.1 - INTRODUCTION	80
6.2 - STUDY SITE AND HYDROGEOLOGICAL SETTING	82
6.2.1 - <i>Climate</i>	82
6.2.2 - <i>Aquifer system</i>	83
6.2.3 - <i>Input data of the model</i>	86
6.3 - MODEL DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION	88
6.3.1 - <i>Conceptual Flow Model</i>	88
6.3.2 - <i>Governing Equations</i>	91
6.3.3 - <i>Spatial and Temporal Discretization</i>	91
6.3.4 - <i>Boundary Conditions</i>	92
6.3.5 - <i>Material Properties</i>	95
6.3.6 - <i>Calibration Procedure</i>	95
6.4 - RESULTS AND DISCUSSION.....	96
6.5 - CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS.....	98
CAPÍTULO 7: PROPOSTA DE ANÁLISE INTEGRADA PARA A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIBEIRÃO PIPIRIPAU, DISTRITO FEDERAL	99
RESUMO	100
ABSTRACT.....	100
7.1 - INTRODUÇÃO.....	100

7.2 - CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE SOCIOAMBIENTAL	102
7.2.1 - Meio Físico.....	102
7.2.2 - Meio Biótico	111
7.2.3 - Meio Socioeconômico	112
7.3 - MODELOS HIDROLÓGICOS APLICADOS À GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS.....	115
7.4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	117
7.5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	121
CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	123
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125

Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa de Localização do Distrito Federal	5
Figura 2 - Climatologia do Distrito Federal. Média história mensal de longo período entre 1961 e 1990 (Estação Brasília - 83377). Fonte: INMET (2012)	7
Figura 3 - Balanço hídrico climatológico (1961 e 1990) - Estação Brasília (83377).	7
Figura 4 - Mata ciliar em vale encaixado, desenvolvida a partir da maior disponibilidade hídrica ao longo do eixo da drenagem.	11
Figura 5 - Mata seca desenvolvida sobre solo fértil com espécies arbóreas tipicamente retas e de médio porte.	11
Figura 6 - Cerrado stricto sensu composto por árvores de pequeno porte.	11
Figura 7 - Campo limpo típico representado por gramínea sem a presença de arbustos.	11
Figura 8 - Mapa de Uso e Cobertura Vegetal - ano 2009. Elaborado à partir de imagem ALOS, com 2,5m de resolução espacial (GREENTEC, 2010).	12
Figura 9 - Perfil de Latossolo Vermelho.	14
Figura 10 - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico com horizonte plintossólico.	14
Figura 11 - Exemplo de Cambissolo com sequência de horizontes A, B incipiente e C na base.	14
Figura 12 - Perfil de Plintossolo Pétrico com horizonte petroplíntico com cerca de 40 cm.	14
Figura 13 - Organossolo Háptico distrófico.	14
Figura 14 - Gleissolo com horizonte A sobre Horizonte AB e B glei com coloração clara característica.	14
Figura 15 - Mapa de Solo do Distrito Federal (modificado de EMBRAPA, 1978).	15
Figura 16 - A: região de Vale Dissecado, com relevo movimentado e 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.	17
Figura 17- Compartimentação Geomorfológica do Distrito Federal. Campos (in ZEE, 2011), adaptado de Novaes Pinto, 1994 e Martins & Baptista, 1998)	17
Figura 18 - Quartzitos da Unidade Q ₃ , em típico padrão de afloramento em blocos maciços a fraturados.	19
Figura 19 - Frente de lavra em grande lente de metacalcário da Unidade PPC.	19
Figura 20 - Detalhe de calcifilito, alterado com foliação principal crenulada.	19
Figura 21 - Quartzitos laminados, brancos e micáceos do Grupo Canastra.	19
Figura 22 - Geologia do Distrito Federal (adaptado de Campos & Freitas-Silva, 1998)	20
Figura 23 - Sistemas aquíferos do Distrito Federal. Gonçalves (2007), atualizado de Campos & Freitas-Silva (1998).	23
Figura 24 - Rede de drenagem do Distrito Federal e as regiões hidrográficas brasileiras Paraná, São Francisco e Tocantins/Araguaia.	27
Figura 25 - Relações entre as superfícies líquidas e o nível de água subterrâneo: (a) sistema superfície-aquífero hidraulicamente conectado (condição efluente); (b) sistema hidraulicamente conectado (condição influente); (c) sistema hidraulicamente desconectado (nível freático alto); (d) sistema hidraulicamente desconectado (nível freático baixo) (adaptado de Peterson & Wilson 1998, apud Sophocleous 2002).	45
Figura 26 - Classificação simplificada dos modelos (Adaptado de Machado, 2002)	47

Figure 27 - Location map of the study area (Federal District of Brazil).	52
Figure 28 - Schematic view of open-end-hole (left) and infiltration test (right).	57
Figure 29 - Correction factor for temperature (Ct). Source: Earth Manual (1951, after Scheytt & Hengelhaupt, 2001).	58
Figure 30 - Correction factor for length of filter material (Cu). Source: Earth Manual (1951, after Scheytt & Hengelhaupt, 2001).	58
Figure 31 - Triangular textural classification of the soils applied in the study (data source: Lemos & Santos 1984).	62
Figure 32 - Comparison of K-values of soils from Federal District and Goiás State obtained by different authors.	63
Figure 33 - Location of the study area.	68
Figure 34 - Fractured aquifers and wells location of the study area.	70
Figure 35 - Distribution of transmissivity recovered by different methods for Paranoá aquifer (A subsystem).	74
Figure 36 - Transmissivity (m ² /day) calculated by different methods for S/A subsystem.	74
Figure 37 - Estimated transmissivity results from fractured aquifers of the Federal District region, acquired by different pumping test treatment methods (R ₃ /Q ₃ subsystem).	75
Figure 38 - Transmissivity calculated by different methods for Paranoá system (R ₄ subsystem).	75
Figure 39 - Transmissivity calculated by different methods for PPC subsystem (Federal District region).	76
Figure 40 - Estimated transmissivity results from fractured aquifers of the Federal District region, acquired by different pumping test treatment methods (Bambuí system).	76
Figure 41 - Estimated transmissivity results from fractured aquifers of the Federal District region, acquired by different pumping test treatment methods (F subsystem, Canastra system).	77
Figure 42 - Location of the Pípiripau watershed in the Federal District of Brazil.	82
Figure 43 - Climatic Water Balance for Thornthwaite & Mather (1955) in Pípiripau's region. Source: INMET - National Institute of Meteorology (2009).	83
Figure 44 - Hydrogeological map (1:100,000 scale) and location of wells in the study area. Source: adapted from Campos and Freitas-Silva (1998).	84
Figure 45 - Stratigraphy of Paranoá Group. Highlighted colors are the present rocks in study area. A - clay, S - silt, AF - fine sand, AM - medium sand, AG coarse sand and C - gravel. Source: Faria, 1995.	86
Figure 46 - Average monthly precipitation in the study area (2004 – 2007 time period). Source: INMET - National Institute of Meteorology (2009).	87
Figure 47 - Stream hydrograph of the Pípiripau watershed at the Frinocap station (2004 – 2007 time period).	88
Figure 48 - Model with two potentiometric surfaces (Lousada and Campos, 2005).	89
Figure 49 - Model with one potentiometric surface with confinement (Lousada and Campos, 2005).	89
Figure 50 - Geological Map of the Pípiripau region. Modified from Campos and Freitas-Silva (1998).	90
Figure 51 - Geological profile of the Pípiripau area.	90
Figure 52 - 3D mesh file generated for the Pípiripau watershed into GMS and displayed on OGS, showing the different materials.	92
Figure 53 - Measured water level, DEM and wells of the study area	93
Figure 54 - Main boundary conditions of the study area.	94
Figure 55 - Recharge areas.	94

<i>Figure 56 - The workflow of OGS/PEST integration. Source: adapted from Sun et al. (2011).</i>	96
<i>Figure 57 - Visualization of flow filed comparison between simulated heads and measured head in selected wells. A-Simulation Head; B-Head Isosurfaces; C -Measured Head.</i>	97
<i>Figure 58 - Measured vs. simulated groundwater level in monitoring wells.</i>	98
<i>Figure 59 - Localização da bacia do Ribeirão Pipiripau.</i>	103
<i>Figure 60 - Precipitação média plurianual da bacia do Ribeirão Pipiripau - Estação Taquara.</i>	104
<i>Figura 61 - Vazão média plurianual da bacia do Ribeirão Pipiripau - Estação Frinocap.</i>	104
<i>Figura 62- Mapa de Uso e Cobertura dos Solos em 2009 (ANA, 2010).</i>	109
<i>Figura 63 - Vazão mínima $Q_{7,10}$ na estação Frinocap.</i>	111

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 - Resumo da classificação dos sistemas aquíferos do Distrito Federal com respectivas vazões médias e condutividades hidráulicas.</i>	22
<i>Tabela 2 - Divisão Hidrográfica do Distrito Federal</i>	24
<i>Tabela 3 - Vazões Q_{50} e Q_{95} para as áreas das unidades hidrográficas do DF</i>	26
<i>Table 4 - Locations of soil samples in the Federal District.</i>	56
<i>Table 5 - Textural and structural characterization of major soil types from Federal District.</i>	61
<i>Table 6 - Results of unsaturated hydraulic conductivity (K) values obtained by open-end-hole and permeability tests after Heitfeld (1979).</i>	62
<i>Table 7- Bulk density (D_b), gravimetric water content (W) and hydraulic conductivity obtained from PTFs developed by Benites et al. (2007) and Tomasella et al. (2003), based on Rosetta software, and on EMBRAPA's data. RO = Red Oxisols; RYO = Red Yellow Oxisols; A = Alfisols; H = Histosols; I = Inceptisols.</i>	64
<i>Table 8 - K-values of Federal District soils</i>	65
<i>Table 9 - Main characteristics (rock type, saturated thickness and average discharge) of the fractured aquifers in the Federal District region, central Brazil.</i>	69
<i>Table 10 - Statistics of transmissivity data obtained by different methods for pumping test of wells constructed in fractured aquifers of the Federal District.</i>	77
<i>Table 11 - Main hydrodynamic parameters for the fractured aquifers in the Federal District (discharge rate after Campos 2004).</i>	78
<i>Table 12 - Hydrodynamic parameters of the aquifers in the Federal District.</i>	95
<i>Table 13 - Initial values and range for hydraulic conductivity induced to the model and optimized values.</i>	97
<i>Tabela 14 - Síntese dos aquíferos dos domínios poroso e fraturado presentes na bacia do Pipiripau e suas principais características</i>	105
<i>Tabela 15 - Estimativa de demanda hídrica para cultivos irrigados da bacia do Pipiripau.</i>	110

A gestão de recursos hídricos busca, mediante a implementação de ações capazes de proteger os mananciais, atender com mais eficiência as demandas de água da população e minimizar impactos sobre os ecossistemas. No entanto, a complexidade dos processos hidrológicos e das relações que envolvem o homem e a natureza dificulta a implementação dessas ações.

Países como: Israel, Reino Unido, França, Alemanha, Canadá, Estados Unidos e Austrália, a partir da década de 1990, elegeram como prioridade, solucionar alguns dos inúmeros problemas que dizem respeito à disponibilidade e à qualidade da água consumida, sobretudo nos grandes centros urbanos. Observou-se que, nesses países, os órgãos competentes, antes mesmo de formularem planos de gestão adequados, investiram em estudos que levam à compreensão da complexidade que envolve o processo de inter-relação entre os mananciais superficiais e subterrâneos, dos biomas que deles dependem e da sustentabilidade do sistema como um todo.

No Brasil, embora haja legislação adequada que menciona o caráter integrado do ciclo hídrico e considera a unidade desse ciclo como fundamento jurídico-institucional de sua concepção, na prática, muitas regiões brasileiras adotam medidas desarticuladas, raramente abordando o aspecto interdependente dos hidrossistemas e dos sistemas socioeconômicos. Assim, decorrem dessa desarticulação, inúmeros conflitos pelo uso da água. Além disso, em virtude da escassez de informações hidroclimatológicas e, em particular, hidrogeológicas, no que diz respeito à quantificação e usos da água, não existem critérios claramente definidos para o uso integrado dos recursos hídricos.

Por outro lado, a unidade de gerenciamento instituída legalmente, no Brasil, são as bacias hidrográficas de superfície. Como essas bacias não têm seus limites necessariamente coincidentes com as subterrâneas, ao isolar os componentes do ciclo hidrológico, as políticas destinadas à gestão das águas não consideram o caráter integrado dos dois fluxos e, portanto, ferem um princípio básico da sustentabilidade. A meta da sustentabilidade é utilizar adequadamente os recursos naturais e, desse modo, a gestão integrada dos recursos hídricos representa avanço nessa área, o que requer conhecimento aprofundado dos processos de distribuição e de captação das águas.

No Distrito Federal, as indefinições relacionadas às pertinências das responsabilidades legais sobre a gestão das águas subterrâneas têm dificultado o estabelecimento de critérios para o uso dessas águas. Para definir as competências de gestão, faltam à Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento do DF – ADASA e ao Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Distrito Federal - IBRAM informações suficientes tanto no que diz respeito aos aspectos qualitativos e quantitativos dos mananciais quanto ao controle e à fiscalização das demandas.

A outorga de direito de uso dos recursos hídricos é um dos instrumentos da política de recursos hídricos do Distrito Federal, estabelecida pela Lei nº 2.725/2001 (DF, 2001a), que se sustenta na racionalização, na multiplicidade e na abordagem integrada dos usos da água, tendo como objetivo básico assegurar o controle qualitativo e quantitativo. Segundo a mencionada Lei, a outorga para o uso de água superficial se baseia numa visão macro do limite de uso e considera as vazões mínimas para sua manutenção. Quanto à outorga de água subterrânea, o foco é o ponto de captação, uma visão micro do limite de uso, que se baseia nas especificidades e características do poço e nos efeitos adjacentes, tais como: poços vizinhos e/ou cursos d'água. Desse modo, não são considerados os limites de retirada dessas águas na bacia hidrográfica, não existe uma unidade no planejamento para o uso desses recursos hídricos e tampouco dispõe de informações capazes de subsidiar uma avaliação adequada do aspecto integrado da gestão e dos usos.

A obtenção dos dados e das informações hidrológicas necessárias à efetiva gestão, demanda mão-de-obra, equipamentos e tempo, recursos esses normalmente escassos diante do acelerado processo de degradação ambiental, que se configurou nos últimos anos. A escassez dos referidos recursos levou à necessidade de se adotar novos métodos de pesquisa. Graças aos avanços da capacidade computacional e das técnicas de obtenção e de análise de dados espaciais foi possível, nos últimos 30 anos, o desenvolvimento de sofisticadas ferramentas voltadas à representação e à modelagem do ciclo hidrológico.

Existem hoje, algoritmos capazes de representar, em modelos físicos, diferentes processos de fluxo e armazenamento de água. *Softwares* de modelagem como *SWAT* (Arnold *et al.*, 1998), *MODFLOW2000* (Harbaugh *et al.*, 2000), *HydroGeoSphere* (Therrien *et al.*, 2009), *FEFLOW* (Trefry & Muffels, 2007), *GMS* (Owen *et al.*, 1996) e *OpenGeoSys* (Kolditz & Shao, 2010), tratam e acoplam diferentes processos usando uma variedade de simuladores que descrevem a complexidade dos fluxos de água para subsidiar soluções estratégicas voltadas à gestão dos recursos hídricos.

1.2 - Justificativa e Hipótese

No Brasil, a escassez de conhecimento científico dos hidrossistemas e as influências que sofrem decorrentes das atividades antrópicas impõem grandes limitações à efetiva gestão das águas. Dessa maneira, é necessário o desenvolvimento de pesquisas voltadas ao levantamento de dados hidrológicos que possam subsidiar processos decisórios da gestão de recursos hídricos.

A aplicação de modelos matemáticos é uma alternativa não apenas em regiões com escassez de informações hidroclimatológicas, mas, também é útil em locais com dados disponíveis, pois possibilita a calibração, a verificação e a previsão de cenários futuros.

Aqui, os dados e a representação dos parâmetros referentes ao processo de observação e aferição do ciclo hídrico costumam ser bem mais detalhados quando voltados à modelagem da parte superficial do que da subterrânea. Comumente, a representação de fluxos de água subterrânea é simplificada devido, principalmente, à complexidade de representação do meio, à dificuldade de aplicação dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero e à inserção de questões práticas relacionadas à gestão dos recursos hídricos, como por exemplo, as vazões outorgáveis, as reservas disponíveis e as condições de recarga.

Da mesma maneira, quando se trata de representar a interação entre as águas dos rios e o bombeamento dos poços circunvizinhos, o modelo rio-aquífero considera, na maioria das vezes, apenas as influências locais dos bombeamentos entre os poços ou entre os rios adjacentes, como mostrado nos trabalhos de Girrard *et al.* (2003) e Barreto *et al.* (2006). Contudo, alguns estudos mencionam o caráter integrado dos recursos hídricos e do uso responsável das águas. Dentre eles, pode-se destacar os trabalhos de Tucci & Braga (2003), Collischonn *et al.* (2005), Silva (2007) e Tundisi (2008).

Entretanto, a aplicação de modelos voltados à avaliação integrada dos usos e processos hídricos é ainda escassa. Assim, estudos que integram os hidrossistemas e analisam as influências das atividades antrópicas sobre os recursos naturais são relevantes e oportunos à efetiva gestão dos recursos hídricos.

Desse modo, a hipótese deste estudo pode ser colocada da seguinte maneira: os processos hidrodinâmicos e socioeconômicos, mesmo em locais com escassez de informações hidroclimatológicas podem ser modelados por meio de modelos numéricos a fim de subsidiar a gestão de recursos hídricos?

1.3 - Objetivos

O objetivo geral deste estudo é compreender a dinâmica dos hidrossistemas e apontar os principais parâmetros norteadores à efetiva gestão dos recursos hídricos no Distrito Federal.

Devido a escassez de informações hidrogeológicas no Distrito Federal, para atingir ao objetivo proposto são necessários os seguintes objetivos específicos:

- Obter valores de condutividade hidráulica, transmissividade e porosidade dos aquíferos rasos e profundos da região;
- Desenvolver um modelo de fluxo de água para a região do Ribeirão Pípiripau, que seja consistente e dinâmico, e considere a complexidade dos elementos componentes dos sistemas hídricos, seus atributos e as relações existentes entre eles;
- Propor um método de investigação integrada dos hidrossistemas e das inter-relações entre os usos e a conservação dos recursos hídricos na bacia do Ribeirão Pípiripau, que seja útil às práticas de gestão em outras regiões do Distrito Federal.

1.4 - Estrutura da Tese

Esta tese, precedida por uma introdução, foi escrita em sete capítulos, assim compreendidos:

O primeiro apresenta as razões que motivaram o desenvolvimento da pesquisa e seus objetivos.

O capítulo seguinte trata das características do meio físico que são relevantes ao entendimento dos processos que controlam a distribuição e a disponibilidade dos recursos hídricos da região do Distrito Federal.

O terceiro, versa sobre os fundamentos teóricos acerca da gestão dos recursos hídricos, dos parâmetros básicos necessários à gestão, dos conceitos fundamentais à respeito do ciclo hídrico, das interações entre corpos d'água superficiais e aquíferos e dos métodos de modelagem.

O quarto capítulo é constituído por um artigo que trata da aplicação do método “*open-end-hole*”, do ensaio de permeabilidade de Heitfeld e de funções de pedotransferência para estimar valores de condutividade hidráulica (K) dos aquíferos do Distrito Federal.

O quinto trata da avaliação dos métodos de Theis, de Cooper & Jacob, de Agarwal e de Cooper & Jacob com dados de capacidade específica, para obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos fraturados do Distrito Federal.

O seguinte consta de um artigo que versa sobre o desenvolvimento e a aplicação do modelo numérico na bacia do Ribeirão Pípiripau.

No último capítulo, são analisados os sistemas ambientais e socioeconômicos na bacia do Ribeirão Pípiripau, a fim de subsidiar a gestão de recursos hídricos no Distrito Federal.

Capítulo 2 - Caracterização do Meio Físico

As características do meio físico são aspectos fundamentais ao entendimento dos processos que controlam a distribuição e a disponibilidade dos corpos hídricos de uma região. Segundo Freeze & Cherry (1979), Fetter (2000), Winter *et al.* (1998), Sophocleous (2002), Tucci (2004) e Feitosa *et al.* (2008), os parâmetros a serem considerados para que seja estabelecido o potencial hídrico dos rios e dos aquíferos devem ser estabelecidos com base nos seguintes temas: clima, vegetação e uso do solo, tipos de solos, geomorfologia, geologia, hidrologia e hidrogeologia. Neste estudo, os referidos temas foram descritos para a área do Distrito Federal a partir da compilação das informações disponíveis na literatura.

2.1 - Localização

O Distrito Federal (DF) situa-se no Planalto Central Brasileiro, em altitudes que variam de 750 a 1.344m. Ocupa uma área de 5.789,16 Km², entre os paralelos 15°30' e 16°03' de latitude sul, sendo limitada a Oeste pelo Rio Descoberto, e a Leste pelo Rio Preto (Figura 1).

A área de estudo está dividida em 31 regiões administrativas, cuja população, conforme o Censo 2010, é de 2.570.160 habitantes (IBGE, 2011). O referido Censo estimou que a população do DF é uma das que mais cresce em todo o país, com taxa média em torno de 1,9% ao ano. De acordo com o IBGE, a componente migratória contribui significativamente para esse crescimento.

Embora a região tenha sido concebida de maneira planejada, sua ocupação se deu de forma desordenada e é marcada por intensa retirada da cobertura vegetal, principalmente na periferia das áreas urbanas, o que propicia degradação do solo, aceleração dos processos erosivos, supressão de nascentes, impermeabilização das áreas de recarga e contaminação dos corpos hídricos da região.

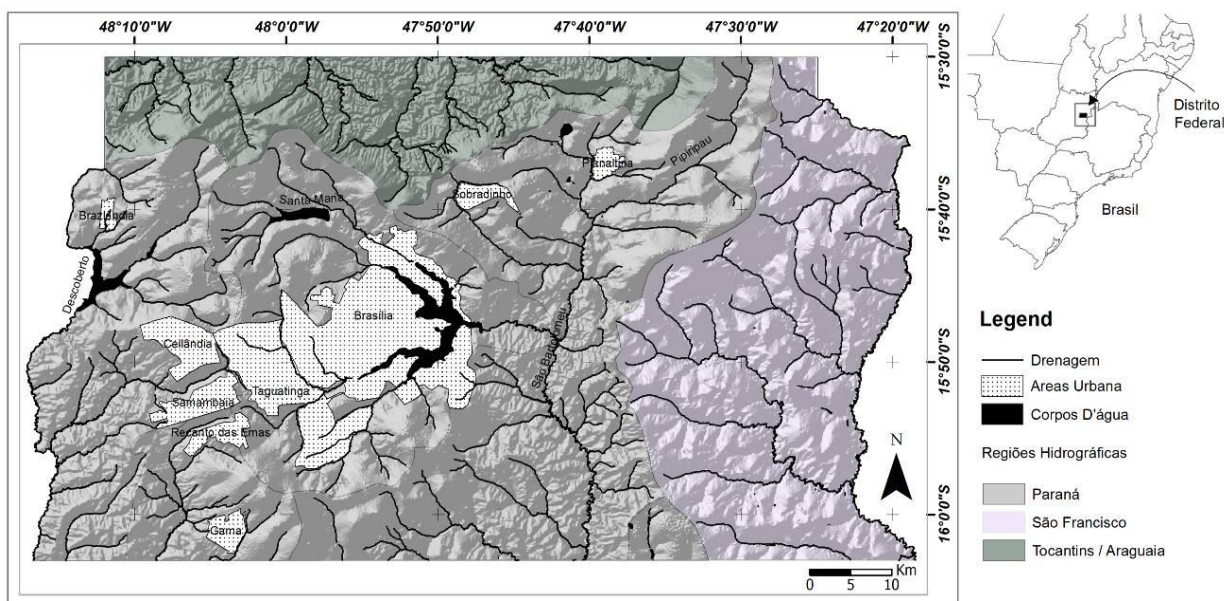


Figura 1 - Mapa de Localização do Distrito Federal

2.2 - Clima

Os 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.

As alturas de chuvas informam as tendências pluviométricas de certa região e são utilizadas para calcular o balanço hídrico. Entretanto, o clima tem como principal característica a alta variabilidade espacial e temporal.

Para melhor compreensão da distribuição espacial e temporal da precipitação pluvial é necessário utilizar séries históricas de dados. Ocorre que, existem poucas séries de dados hidrometeorológicos com períodos superiores a 80 anos. Para Tucci & Braga (2003), o comportamento climático deve ser avaliado com séries superiores a 100 anos. Os referidos autores alertam para o fato de que amostras de períodos curtos podem ser tendenciosas.

A variabilidade climática gera impactos em todo o sistema de recursos hídricos demandando adaptações e ajustes a esta realidade, dos instrumentos e práticas de gestão dos recursos hídricos. 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 1.500 mm, onde o mês de janeiro apresenta o maior índice pluviométrico médio (248 mm/mês) e os meses de junho, julho e agosto registram os menores (11 mm/mês).

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, 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 237 h/mês e no período chuvoso, de outubro a março, é bem menor, com média de 157 h/mês.

A Figura 2 apresenta as normais climatológicas de precipitação, umidade relativa, insolação e temperatura, da média histórica mensal calculada para o Distrito Federal, no período de 30 anos, entre 1961 e 1990.

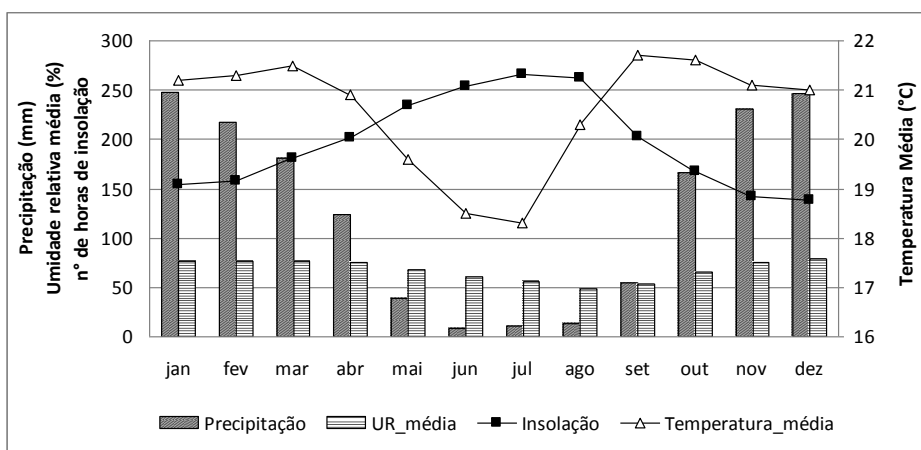


Figura 2 - Climatologia do Distrito Federal. Média histórica mensal de longo período entre 1961 e 1990 (Estação Brasília - 83377). Fonte: INMET (2012)

O balanço hídrico climatológico da área de estudo, obtido pelo método de Thornthwaite & Mather (1955), utiliza variáveis climáticas de precipitação e temperatura do ar para mostrar, quantitativamente, os excedentes (EXC) e déficits (DEF-1) de água no solo. A Figura 3 mostra o gráfico do balanço hídrico para o período de 1961 a 1990, onde se observa o déficit hídrico entre maio e outubro e o superávit desde o início de novembro até meados de abril.

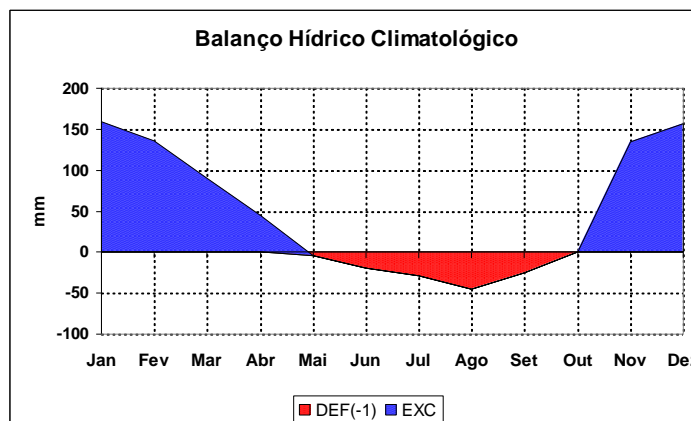


Figura 3 - Balanço hídrico climatológico (1961 e 1990) - Estação Brasília (83377). Fonte: INMET (2012)

2.3 - Vegetação e Uso do Solo

A cobertura vegetal, assim como a ocupação antrópica da terra, interfere sobremaneira na dinâmica hídrica, em decorrência dos fatores que interferem na infiltração natural de água nos solos. A vegetação natural minimiza processos erosivos provocados pelo impacto das gotas de chuva no solo e aumenta a porosidade através da bioturbação pelo enraizamento. Por outro lado, a depender do tipo de uso antrópico, solos compactados e até impermeabilizados provocam processos erosivos, alagamentos e inundações, além de reduzirem a recarga dos reservatórios subterrâneos, comprometendo a utilização dos recursos hídricos.

A vegetação do Distrito Federal está situada na Província Fitogeográfica do Cerrado, considerado o segundo maior bioma do País em área (2.000.000 Km²) e um dos 34 *hotspots* para a conservação da biodiversidade (Myers *et al.*, 2005). A distribuição espacial deste bioma

está condicionada, predominantemente, a fatores climáticos, tais como: temperatura, pluviosidade e umidade do ar.

A paisagem descrita enquadra-se na categoria savana e está localizada no Planalto Central Brasileiro, onde ocorrem as formações florestais, savânicas e campestres. Ribeiro & Walter (2008) adaptaram o sistema de classificação de vegetação do IBGE, segundo Veloso *et al.* (1991) e propuseram a seguinte classificação: as formações Florestais são representadas pelas matas Ciliares, de Galeria, Seca e Cerradão; o Cerrado *stricto sensu*, o Parque Cerrado, o Palmeiral e a Vereda são formações savânicas; e as formações campestres são representadas pelo Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre.

A seguir, estão descritas as principais características de cada tipo de vegetação segundo Ribeiro & Walter (2008).

Formações Florestais

- ◇ **Mata Ciliar:** ocorre ao longo dos rios, córregos e outros cursos d'água da região do Cerrado, geralmente sobre terrenos acidentados, em locais de transição para outras fisionomias, como Mata Seca e Cerradão. A preservação desses ambientes é fundamental para os recursos hídricos, tendo em vista o importante papel da conservação das encostas dos rios, evitando o desbarrancamento e, conseqüentemente, o assoreamento dos cursos d'água (Figura 4);
- ◇ **Mata Galeria:** é uma vegetação florestal do tipo perenifólia que acompanha rios e córregos de pequeno porte, formando corredores fechados sobre o curso d'água. Geralmente, localiza-se nos fundos dos vales ou nas cabeceiras de drenagem. Quase sempre é circundada por faixas de vegetação não florestal e quando em transição com Matas Ciliares, Secas ou Cerradão, estas são praticamente imperceptíveis. A Mata Galeria, dependendo das características topográficas ou variações na altura do lençol freático, pode ser subdividida em dois tipos: Mata de Galeria não Inundável e Mata de Galeria Inundável;
- ◇ **Mata Seca:** a ocorrência deste tipo de vegetação não está associada a cursos d'água, mas dependem das condições químicas e físicas dos solos. Ocorrem, comumente, em locais ricos em nutrientes como nos níveis de relevos que separam os fundos de vales (interflúvios). Em função do tipo de solo, da composição florística e em consequência da queda de folhas no período seco, a Mata Seca pode ser Sempre-Verde, Semidecídua, a mais comum, e Decídua (Figura 5);
- ◇ **Cerradão:** apresenta características esclerófilas (grande ocorrência de órgãos vegetais rijos, principalmente folhas) e xeromórficas (com características como folhas reduzidas, suculência, pilosidade densa ou com cutícula grossa que permitem conservar água e, portanto, suportar condições de seca). Caracteriza-se pela presença preferencial de espécies que ocorrem no Cerrado *stricto sensu* e, também, por espécies de florestas,

particularmente as da Mata Seca Semidecídua e da Mata de Galeria não Inundável. Do ponto de vista fisionômico, é uma floresta, mas, quanto às flores, se assemelha mais ao Cerrado sentido restrito.

Formações Savânicas

- ◇ **Cerrado *stricto sensu*:** caracteriza-se por possuir árvores lenhosas de porte baixo, retorcidas com cortiça espessa, inclinadas, tortuosas e com ramificações irregulares. Os arbustos e subarbustos encontram-se espalhados, com algumas espécies apresentando órgãos subterrâneos perenes (xilopódios), que permitem a rebrota após queima ou corte. Na época chuvosa, as camadas subarbutivas e herbáceas tornam-se exuberantes, devido ao rápido crescimento. Fatores climáticos e a fertilidade dos solos derivam subdivisões fisionômicas desta vegetação (Figura 6);
- ◇ **Parque de Cerrado:** é uma formação savânica caracterizada pela presença de árvores agrupadas em pequenas elevações do terreno, algumas vezes imperceptíveis e outras com muito destaque, que são conhecidas como murundus. Embora parecido com a vegetação do Cerrado *stricto sensu*, as espécies desta fisionomia provavelmente apresentam maior tolerância à saturação hídrica do solo, considerando que apenas uma parte do volume de terra do murundu permanece livre de possíveis inundações, ou da constante má drenagem nas depressões;
- ◇ **Palmeiral:** esta formação é marcada pela presença de uma única espécie de palmácea arbórea, denominada Palmeiral. Existem pelo menos quatro subtipos de palmeira que varia em estrutura, segundo a espécie dominante. Em geral, ocorrem em terrenos bem drenados, embora o tipo Buritizal ocorra em terrenos mal drenados, onde pode haver a formação de galerias acompanhando linhas de drenagem;
- ◇ **Vereda:** é um tipo de vegetação como a palmeira arbórea, os Buritis, mas não formam dossel, como ocorre no Buritizal. São circundadas por campos típicos, geralmente úmidos, em ambiente bastante peculiar em que o solo apresenta uma constante saturação d'água, formando verdadeiros pântanos. As Veredas exercem papel fundamental na distribuição dos rios e seus afluentes e na manutenção da fauna do Cerrado, funcionando como local de pouso para a fauna de aves, atuando como refúgio, abrigo, fonte de alimento e local de reprodução para a fauna terrestre e aquática. Apesar desta importância, esta fisionomia tem sido pressionada e descaracterizada pela construção de pequenas barragens e açudes, por estradas, pela agricultura, pela pecuária e até mesmo por queimadas excessivas. O simples pisoteio do gado pode causar processos erosivos e compactação do solo, que afetam a infiltração de água nos solos e, conseqüentemente, a recarga dos reservatórios subterrâneos.

Formações Campestres

- ◇ **Campo Sujo:** é um tipo exclusivamente arbustivo-herbáceo, com arbustos e subarbustos espaços, cujas plantas são menos desenvolvidas que as árvores do Cerrado *stricto sensu*. Em função de particularidades ambientais, o Campo Sujo pode apresentar três subtipos fisionômicos distintos. Na presença de um reservatório subterrâneo de água (lençol freático) profundo, ocorre o Campo Sujo Seco. Se o lençol freático é alto, próximo à superfície do solo, há o Campo Sujo Úmido. Quando, na área, ocorrem micro-relevos mais elevados (murundus), tem-se o Campo Sujo com Murundus;
- ◇ **Campo Limpo:** possui vegetação predominantemente herbácea, com raros arbustos e ausência completa de árvores. Caracteriza-se pela grande quantidade de gramíneas e outras ervas que raramente alcançam um metro de altura. Usualmente, esta vegetação é encontrada nas encostas, nas chapadas, nos olhos d'água, circundando as Veredas e na borda das Matas de Galeria, 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 7);
- ◇ **Campo Rupestre:** é uma formação xerofítica, isto é, de aparência seca, de porte baixo, composto por ervas, subarbustos e formas anãs de espécies arbóreas das formações adjacentes. Abrange um complexo de vegetação que agrupa paisagens em micro-relevos com espécies típicas, ocupando trechos de afloramentos rochosos. Acha-se estabelecido sobre terrenos rasos, rochosos, situados em altitudes elevadas e pobres em nutrientes.

Segundo levantamento feito pela GREENTEC em 2009, o Distrito Federal perdeu cerca de 60% da cobertura vegetal nativa (ZEE, 2011). As formações savânicas foram as que apresentaram os maiores percentuais de degradação, 65% do total originalmente existente. De acordo com o Zoneamento Ecológico-Econômico do DF (ZEE, 2011), as formações savânicas são as mais ameaçadas pelos processos antrópicos de ocupação do território, uma vez que sua ocorrência está associada a regiões mais propícias ao uso das terras, coincidindo com sítios onde ocorrem baixas declividades (relevo plano a suave ondulado) e solos mais profundos e bem estruturados (ex.: Latossolos). As formações florestais apresentam perda de 47% e as campestres de 61% do total originalmente existente.

O bioma Cerrado no território do DF está sendo ameaçado, principalmente, pela pressão antrópica provocada pela intensificação das atividades agropecuárias, seguida do crescimento populacional das áreas urbanas. O impacto sobre os ecossistemas naturais provocam, do ponto de vista do meio biótico, a fragmentação e o isolamento das áreas naturais, resultando na perda de biodiversidade que, muitas vezes, é irreversível. Além disso, a degradação desses ecossistemas modificam a dinâmica da paisagem, comprometendo não só o funcionamento dos ecossistemas, mas também a qualidade de vida da população (ZEE, 2011).



Figura 4 - Mata ciliar em vale encaixado, desenvolvida a partir da maior disponibilidade hídrica ao longo do eixo da drenagem.



Figura 5 - Mata seca desenvolvida sobre solo fértil com espécies arbóreas tipicamente retas e de médio porte.



Figura 6 - Cerrado stricto sensu composto por árvores de pequeno porte.



Figura 7 - Campo limpo típico representado por gramínea sem a presença de arbustos.

O mapa de Uso do Solo e Cobertura Vegetal do Distrito Federal (Figura 8) mostra a disposição espacial das unidades da paisagem e os remanescentes da vegetação nativa. Observa-se no referido mapa, que o modelo de ocupação e exploração do território do DF reflete o padrão de ocupação das regiões brasileiras, definido por Pádua (2004) pelas seguintes características essenciais: 1) O mito da natureza inesgotável, baseado na idéia de uma fronteira natural sempre aberta para o avanço da exploração econômica; 2) Um grau considerável de desprezo pela biodiversidade e os biomas nativos; e 3) Uma aposta permanente nas espécies exóticas, especialmente em regime de monocultura, como fonte de enriquecimento econômico e instrumento eficaz de controle sobre o território.

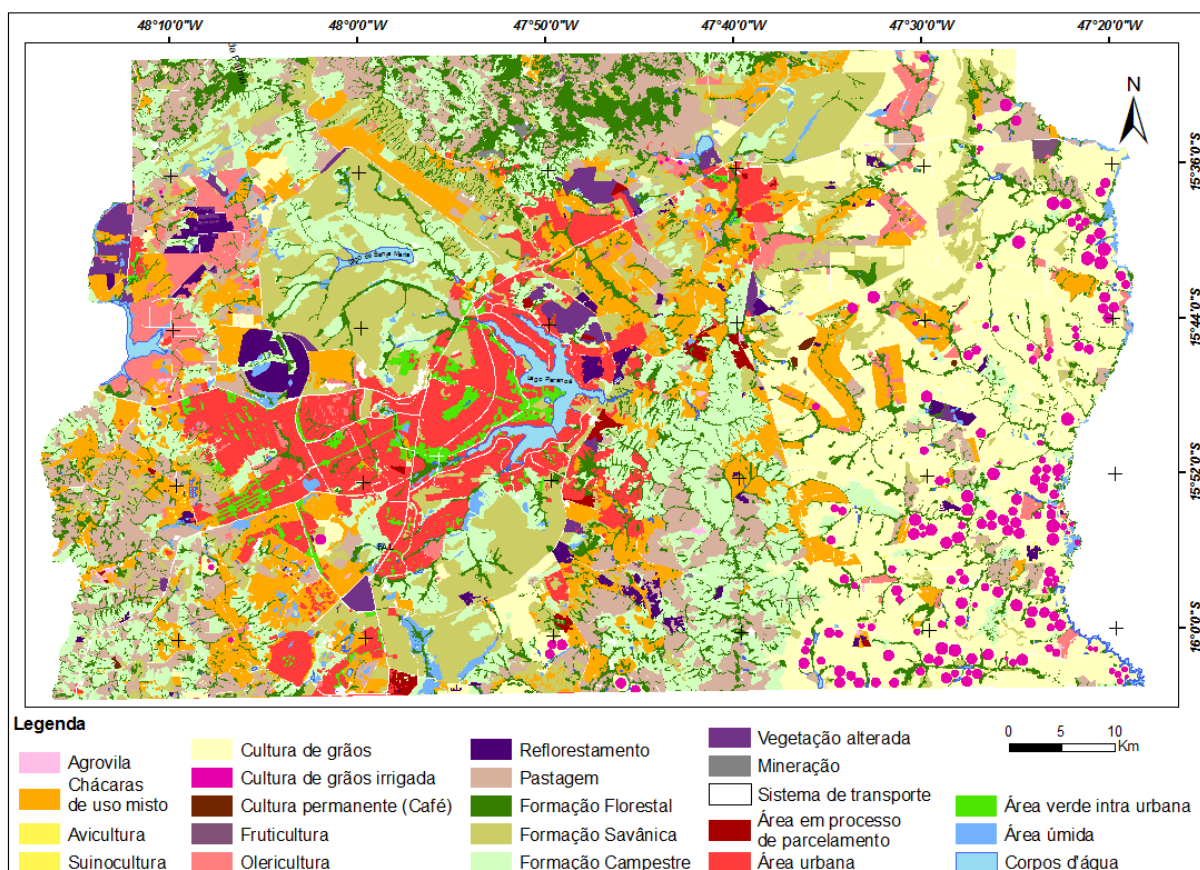


Figura 8 - Mapa de Uso e Cobertura Vegetal - ano 2009. Elaborado à partir de imagem ALOS, com 2,5m de resolução espacial (GREENTEC, 2010).

2.4 - Solos

Nos solos se iniciam os processos de infiltração e a capacidade de retenção, infiltração, transmissão e armazenamento de água dos diferentes tipos de solos, assim como a profundidade, são características fundamentais à caracterização dos fluxos de água em subsuperfície.

A capacidade de infiltração dos solos pode ser determinada pela condutividade hidráulica vertical (K_v) da zona vadosa e, por isso, é um importante parâmetro para a análise e classificação de aquíferos intergranulares (Feitosa *et al.*, 2008).

Os solos desempenham três funções primordiais: função filtro, função reguladora e função recarga. Além disso, condicionam o tipo de vegetação e são indicadores das atividades antrópicas e da interface entre sua conservação e a conservação dos recursos hídricos (Campos & Freitas-Silva, 1998).

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 9). A diferença entre os Latossolos Vermelho e os Vermelho Amarelo (Figura 10) está relacionada 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 11). 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. 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 plântico, dentro dos primeiros 40 centímetros do perfil (Figura 12). 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.
- ◇ **Organossolos (O):** possuem horizonte hístico com mais de 40 cm de espessura, sobre qualquer outro tipo de horizonte subsuperficial (Figura 13). No DF comumente ocorrem em forte associação com gleissolos. Esses solos ainda não foram cartografados.
- ◇ **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 14). 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.

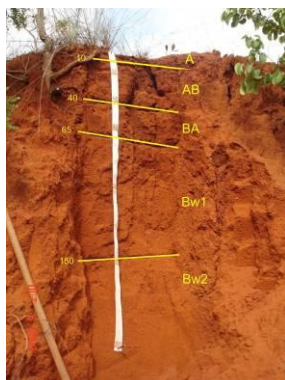


Figura 9 - Perfil de Latossolo Vermelho.

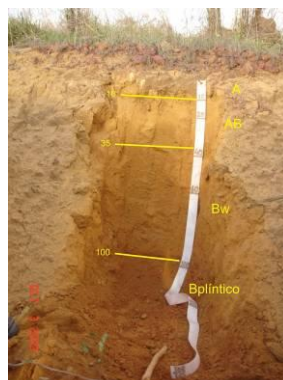


Figura 10 - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico com horizonte plintossólico.



Figura 11 - Exemplo de Cambissolo com sequência de horizontes A, B incipiente e C na base.



Figura 12 - Perfil de Plintossolo Pétrico com horizonte petroplintico com cerca de 40 cm.

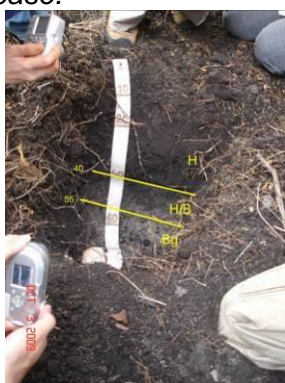


Figura 13 - Organossolo Háptico distrófico.

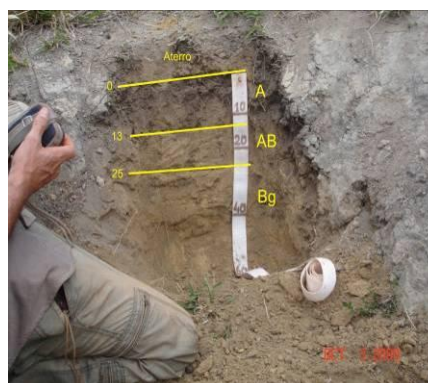


Figura 14 - Gleissolo com horizonte A sobre Horizonte AB e B glei com coloração clara característica.

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 (Figura 15).

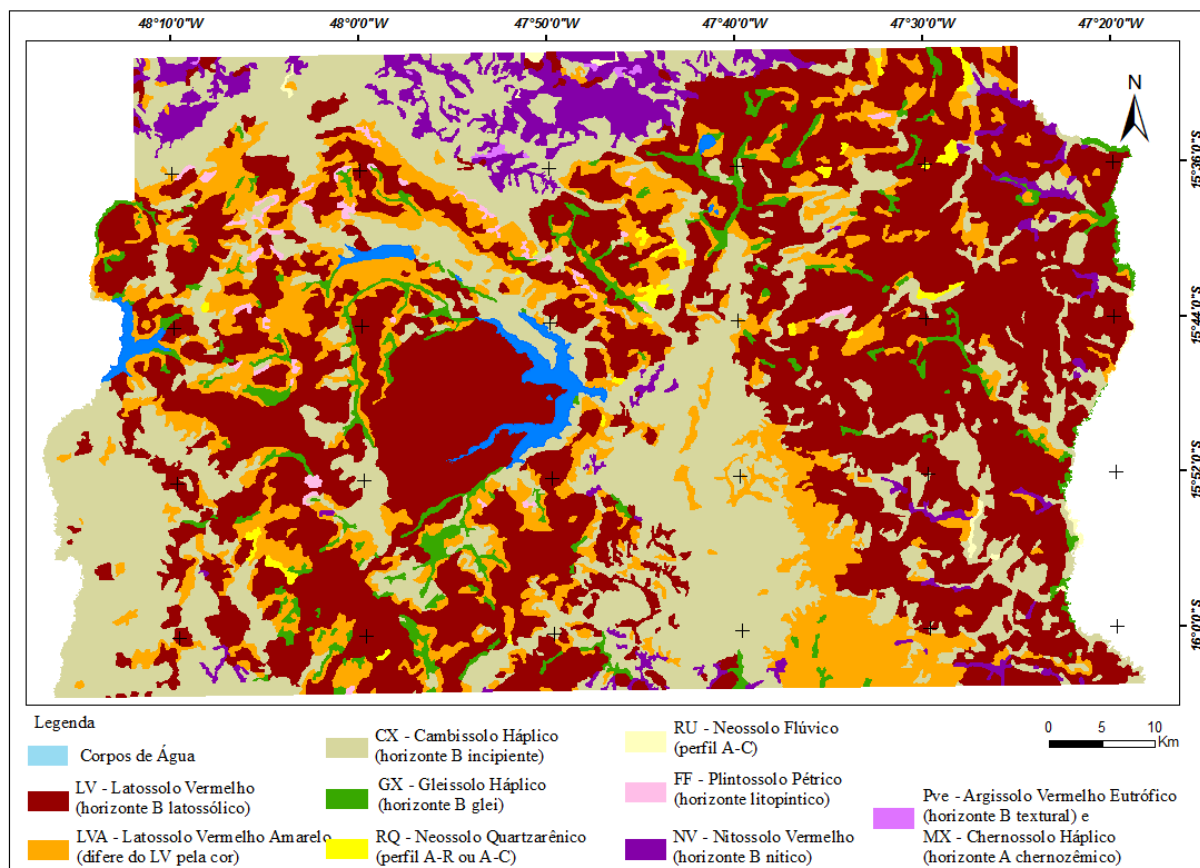


Figura 15 - Mapa de Solo do Distrito Federal (modificado de EMBRAPA, 1978).

2.5 - Geomorfologia

A geomorfologia é caracterizada pelo tipo de rocha, pendente regional e estruturas que pode ser modificadas por processos de erosão, transporte, sedimentação, intemperismo, oscilação de nível freático, entre outros.

Em estudos hidrológicos deve-se, segundo Feitosa *et al.* (2008), avaliar o funcionamento hídrico do relevo e como os compartimentos geomorfológicos influenciam nas condições gerais de circulação, recarga e descarga dos rios e 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 rios e dos aquíferos (Tucci, 2004)

O relevo também é um fator fundamental que controla complexos padrões de sistemas de fluxo locais, intermediários ou regionais de água subterrânea. Esses padrões dominantes em cada região exercem influência mútua nas águas superficiais (Sophocleous, 2002).

No contexto regional, a paisagem do domínio morfoclimático do cerrado resulta de uma prolongada interação do regime climático tropical semi-úmido com fatores litológicos, edáficos e bióticos (Ab'Saber, 1977). Neste contexto, os planaltos da região do Distrito Federal foram

considerados como remanescentes dos ciclos de erosão Sul-Americano e Velhas que teriam se desenvolvido respectivamente entre o Paleógeno e o Neógeno (King, 1956).

A área de estudo está localizada 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 (Novaes Pinto, 1994ab).

Recentemente, a compartimentação geomorfológica do DF foi atualizada por Campos (*in* ZEE, 2011) que, com base nas propostas de Novaes Pinto (1994 *ab*) e Martins & Baptista (1998), sugere as seguintes unidades geomorfológicas para o DF:

- ◇ **Plano Elevado** - exibe padrão de relevo plano a suave ondulado com declividades inferiores a 10% e cotas superiores a 1.100m. Na região predominam os Latossolos e a densidade de drenagens é baixa;
- ◇ **Plano Intermediário** - o relevo plano a suave ondulado difere do padrão anterior apenas por apresentar declividades inferiores a 12% e cotas entre 950 e 1.050m (Figura 16 - C);
- ◇ **Vale Dissecado** - apresenta padrão de relevo ondulado a forte ondulado com declividades superiores a 20% e cotas inferiores a 800m. Nessas áreas há ampla predominância de Cambissolos e elevada densidade de drenagem (Figura 16 - A e B);
- ◇ **Rebordo** - o padrão de relevo é ondulado com declividades entre 10 e 20% e cotas entre 950 e 1.100m. Possui moderada densidade de drenagem e predominância de Cambissolos (Figura 16 - D);
- ◇ **Rampa Íngrime** - tem padrão de relevo forte ondulado a escarpado, declividades superiores a 25% e cotas entre 800 e 1.100m, ampla predominância de Latossolos e alta densidade de drenagem (Figura 16 - D).

A Figura 17 mostra a proposta de compartimentação geomorfológica de Campos (*in* ZEE, 2011), que foi adaptada a partir da integração dos compartimentos definidos por Novaes Pinto (1994) e Martins & Baptista (1998). Campos considerou aspectos como o padrão de relevo, a declividade, o grau de dissecção e a densidade de drenagem para definir os compartimentos e utilizou técnica de hipsometria para representar os compartimentos no mapa geomorfológico proposto.



A



B

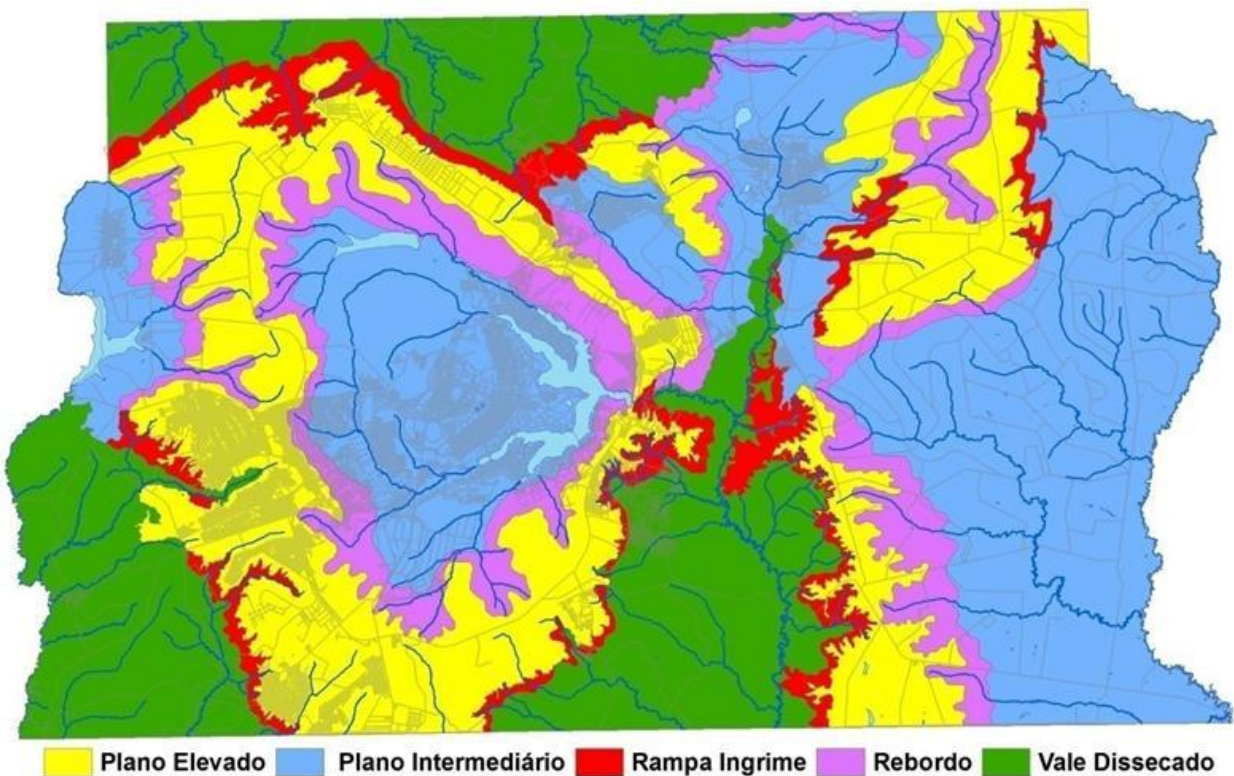


C



D

Figura 16 - A: região de Vale Dissecado, com relevo movimentado e 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.



Plano Elevado Plano Intermediário Rampa Ingrime Rebordo Vale Dissecado

Figura 17- Compartimentação Geomorfológica do Distrito Federal. Campos (in ZEE, 2011), adaptado de Novaes Pinto, 1994 e Martins & Baptista, 1998)

2.6 - Geologia

A 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 (Campos & Freitas-Silva, 1998).

Fornecer informações quanto a litologia (tipos de rochas e variações), estratigrafia (empilhamento das diversas unidades), tectônica e estruturação (deformações por dobramentos e falhas), 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 explorabilidade (boa, regular ou difícil).

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 (Campos & Freitas-Silva, 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 18), Metarritmitos argilosos (**R₄**); e a unidade Psamo-pelito-carbonatada (**PPC**) composta por lentes de metacalcários (Figura 19) 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 20) e, subordinadamente, por corpos lenticulares de mármore e quartzitos (Figura 21). 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, resultaram 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 (Campos & Freitas-Silva, 1998).



Figura 18 - Quartzitos da Unidade Q₃, em típico padrão de afloramento em blocos maciços a fraturados.



Figura 19 - Frente de lavra em grande lente de metacalcário da Unidade PPC.

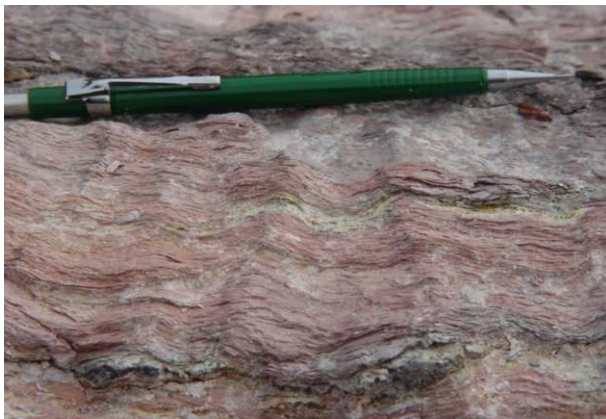


Figura 20 - Detalhe de calcifilito, alterado com foliação principal crenulada.



Figura 21 – 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 sequência 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.

A Figura 22 apresenta as feições geológicas encontradas no Distrito Federal.

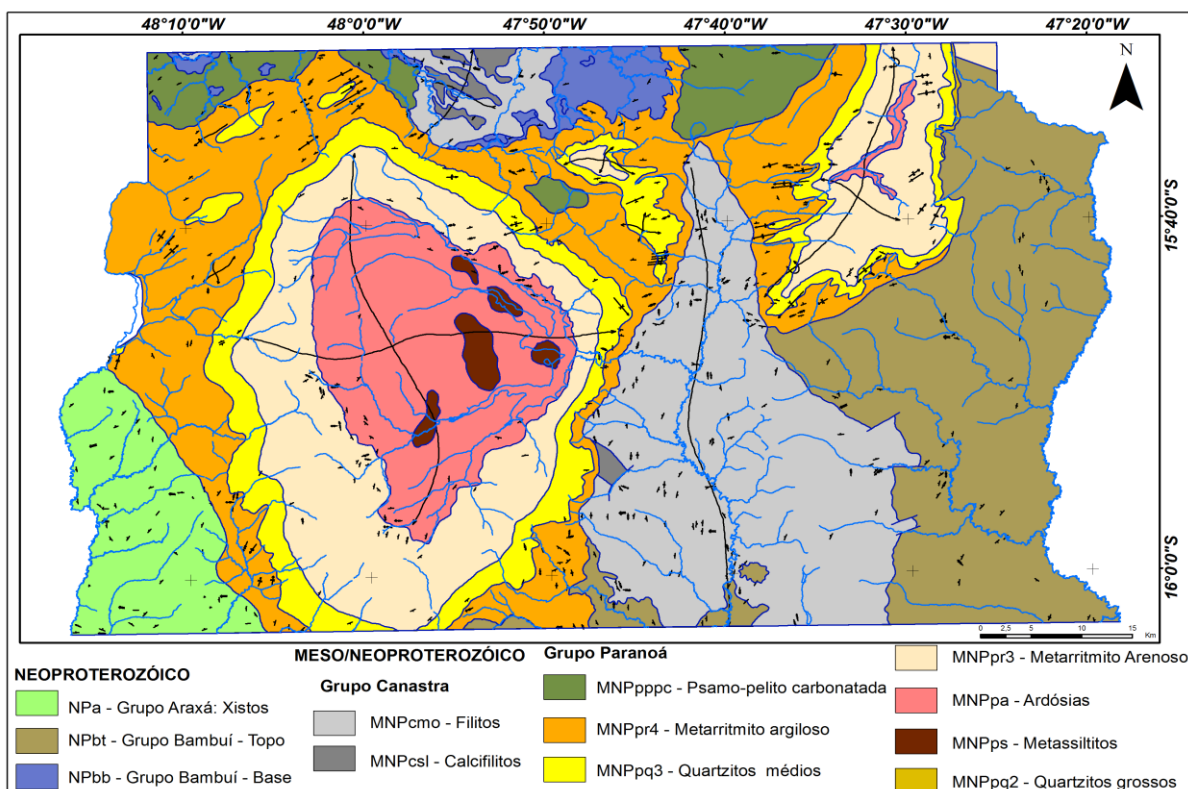


Figura 22 - Geologia do Distrito Federal (adaptado de Campos & Freitas-Silva, 1998)

2.7 - Hidrogeologia

O estudo da água subterrânea, além de tratar do fluxo em formações saturadas, inclui o movimento da água em meios não saturados, nos quais a distribuição de umidade constitui papel importante no ciclo hidrológico e em muitos processos geológicos (Feitosa & Manoel Filho, 1997).

Os aquíferos desempenham importantes funções como, por exemplo, regularização das vazões dos cursos d'água superficiais e depuração, em zona não saturada, de elementos e substâncias que contaminam as águas mais profundas (ZEE, 2011).

A ocorrência e produtividade dos aquíferos estão condicionadas a limitações impostas pela geologia, morfologia, clima, hidrologia, vegetação e pedologia. A depender das características de armazenamento, circulação e fornecimento de água, capaz de ser explorada através de poços ou outras obras de captação, os aquíferos distinguem-se em aquíferos, aquícludes e aquíardes.

As formações geológicas capazes de armazenar e transmitir "quantidades significativas" de água sob gradientes naturais são denominadas aquíferos. Aquíardes são formações que armazenam água, mas não a transmitem com facilidade (tipicamente argilas e folhelhos), sendo uma ou duas ordens de grandeza menos permeáveis que os aquíferos. Já os aquícludes são unidades geológicas que, apesar de saturadas, e com grandes quantidades de água absorvida, são incapazes de transmitir um volume significativo de água por serem rochas relativamente impermeáveis (Karmann, 2000). O contexto hidrogeológico do Distrito Federal (DF) possui três domínios aquíferos: o intergranular, o fraturado e o físsuro-cárstico.

O domínio intergranular é representado pelos solos aluviais e pelo manto de alteração das rochas. Segundo Campos (*in* ZEE, 2011), a caracterização dos aquíferos desse domínio está vinculada a vários parâmetros, dos quais dois são destacados: a espessura e a condutividade hidráulica (permeabilidade), sendo que ambas são diretamente controladas pela geologia e pelos solos em que cada tipo de aquífero está inserido.

Em função desses parâmetros, esse domínio divide-se em quatro subsistemas denominados **P₁**, **P₂**, **P₃** e **P₄** cujas características podem ser observadas na Tabela 1 (Campos & Freitas-Silva 1998).

A espacialização deste domínio aquífero foi atualizada e cartografada por Gonçalves (2007), a partir da classificação dos grupos hidrológicos dos solos para o Distrito Federal (Figura 2.19). A referida atualização cartográfica considerou ampla base de dados de ensaios de infiltração e o funcionamento hídrico dos solos conforme a adaptação da teoria do Curva-Número (SCS, 1984) para solos tropicais, desenvolvida por Lombardi-Neto *et al.* (1989) e Sartori (2004). A proposta desta nova cartografia substitui aquela apresentada por Campos & Freitas-Silva (1998).

Nesse aquífero ocorre a transição entre a zona não saturada e a zona saturada, onde se originam os processos de recarga dos aquíferos rasos para os profundos. As zonas de descarga desde meios estão relacionadas a fontes do tipo depressão ou contato, sendo a vazão média controlada pelo tipo de regime de fluxo. Os fluxos regionais e intermediários representam vazões superiores a 2,0 l/s, enquanto que as de fluxo local mostram vazões reduzidas e com amplas variações sazonais (Campos *in* ZEE, 2011).

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. Como no Distrito Federal o substrato rochoso é representado por metassedimentos, os espaços intergranulares foram preenchidos durante a litificação e o metamorfismo. Dessa forma, os eventuais reservatórios existentes nas rochas proterozóicas estão inclusos dentro do domínio fraturado, onde os espaços armazenadores de água são classificados como porosidade secundária. Os parâmetros hidrodinâmicos como a condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S) são muito variáveis em função do tipo de rocha e, inclusive variam, significativamente, em um mesmo tipo litológico. O principal fator que controla a condutividade hidráulica dos aquíferos desse domínio é a densidade das descontinuidades do corpo rochoso (Campos *in* ZEE, 2011).

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 (Campos & Freitas, 1998).

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 nos subsistemas **S/A**, **A**, **Q₃/R₃**, **R₄** e o sistema Canastra é constituído pelo subsistema **F**. Na Tabela 1, pode-se observar as principais características desses sistemas e, na figura 23 encontra-se a distribuição da ocorrência de cada sistema/subsistema aquífero do DF.

Segundo Campos (*in* ZEE, 2011), os sistemas de porosidade fissuro-cárstica são representados por situações onde rochas carbonáticas (calcários, dolomitos, margas e mármore) ocorrem na forma de lentes com restrita continuidade lateral interdigitadas com litologias pouco permeáveis (siltitos argilosos, folhelhos ou filitos).

Na região do Distrito Federal ocorrem aquíferos fissuro-cársticos vinculados ao Sistema Paranoá, onde é representado pelo subsistema **PPC** e pelo sistema Canastra, associado ao Subsistema **F/Q/M**. O subsistema **F/Q/M** apresenta especial importância na região, pois é responsável pelo abastecimento exclusivo da Cidade Satélite de São Sebastião com cerca de 100.000 habitantes (Campos *in* ZEE, 2011). A Figura 23 mostra a ocorrência desses sistemas no DF.

Tabela 1 - Resumo da classificação dos sistemas aquíferos do Distrito Federal com respectivas vazões médias e condutividades hidráulicas.

Aquífero (Sistema/Subsistema)	Média das Vazões (m ³ /h)	Condutividade Hidráulica (m/s)
<i>Aquíferos do Domínio Intergranular</i>		
Sistemas P1	< 0,8	2,8 x 10 ⁻⁴ a 1,7 x 10 ⁻⁵
Sistemas P2	< 0,5	10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁶
Sistemas P3		2,3 x 10 ⁻⁶ a 1,4 x 10 ⁻⁷
Sistemas P4	< 0,3	Muito Baixa
<i>Aquíferos do Domínio Fraturado</i>		
<i>Sistema Paranoá</i>		
Subsistema S/A	12,5	2,5 x 10 ⁻⁶ a 1,7 x 10 ⁻⁷
Subsistema A	4,5	Pequena
Subsistema Q₃/R₃	12,0	1,7 x 10 ⁻⁵ a 5,3 x 10 ⁻⁷
Subsistema R₄	6,5	Baixa
<i>Sistema Canastra</i>		
Subsistema F	7,5	Média a Moderada
Sistema Bambuí	6,0	Média a baixa
Sistema Araxá	3,5	Muito baixa
<i>Aquíferos do Domínio Fissuro-Cárstico</i>		
Subsistema PPC	9,0	Baixa a elevada
Subsistema F/Q/M	33,0	Muito elevada

Fonte: Campos & Freitas-Silva (1998).

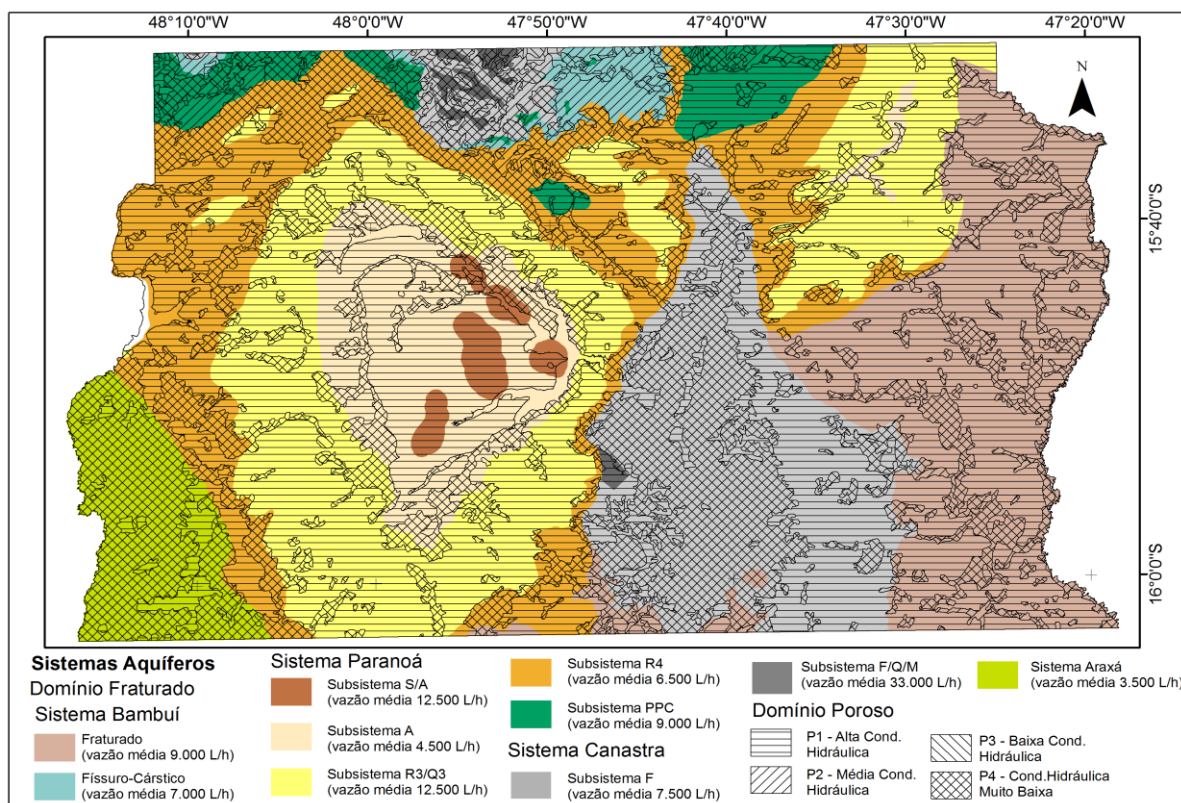


Figura 23 - Sistemas aquíferos do Distrito Federal. Gonçalves (2007), atualizado de Campos & Freitas-Silva (1998).

2.8 - Hidrologia

O Distrito Federal está inserido no bioma cerrado, cujo sistema hidrológico é apontado como uma das principais fragilidades ambientais da região, devido ao pequeno volume d'água, por ser de região alta e de nascentes, possuir clima seco, com forte sazonalidade, longos períodos de estiagem e reduzidos índices pluviométricos, o que resulta na limitação da oferta de água.

A região está localizada em um grande divisor de águas, drenada por rios de pequeno e médio porte, que pertencem a três das mais importantes bacias fluviais da América do Sul: bacias do Paraná, São Francisco e Araguaia -Tocantins.

De acordo com o mapa hidrográfico do DF (Mapa das Unidades Hidrográficas), essas bacias são denominadas de Regiões Hidrográficas. Todos os seus rios são de planalto, sendo as principais bacias identificadas por um padrão de drenagem radial. Pela disposição da drenagem, observa-se que dois de seus cursos de água são delimitadores do território do Distrito Federal: a Leste, o Rio Preto; e, a Oeste, o Rio Descoberto.

A altitude dos divisores de água é da ordem de 1.200/1.300 m. Na separação entre as Regiões Hidrográficas Tocantins/Araguaia e do Paraná predominam vertentes formadas por chapadas, enquanto nos limites entre as bacias do Paraná e São Francisco, a ocorrência mais comum no relevo é a de formas de serras. Devido às características de rios de planalto, que cortam toda região do Distrito Federal, é típica a ocorrência de perfis escalonados por zonas de rápidas corredeiras, ou mesmo grandes quedas d'água, formando cachoeiras.

Dadas as condições favoráveis dos solos, da topografia e do clima, a grande maioria dos cursos da rede de drenagem local conta com regime perene.

Para efeito de planejamento e gerenciamento, as três regiões hidrográficas: Paraná, São Francisco e Tocantins/Araguaia foram subdivididas em sete bacias hidrográficas: São Bartolomeu, Lago Paranoá, Descoberto, Maranhão, Preto, Corumbá e São Marcos e em 36 unidades hidrográficas de gerenciamento, como mostra a Tabela 2.

A Região Hidrográfica do São Francisco drena, aproximadamente, 1.407 km² do Distrito Federal, com uma descarga média de longo período de 23 m³/s (Estudo do Potencial Hídrico para a Agricultura Irrigada na Bacia Hidrográfica do Rio Preto, NCA-1995). É constituída pela Bacia do Rio Preto e seus principais afluentes são: Ribeirão Santa Rita, Ribeirão Jacaré, Ribeirão Extrema, Rio Jardim e Ribeirão São Bernardo.

Tabela 2 - Divisão Hidrográfica do Distrito Federal

REGIÃO HIDROGRÁFICA	BACIA HIDROGRÁFICA	UNIDADE HIDROGRÁFICA
<i>BACIA DO PARANÁ</i>	<i>RIO SÃO BARTOLOMEU</i>	PIPIRIPAU
		MESTRE D'ARMAS
		SOBRADINHO
		PARANOÁ
		TABOCA
		PAPUDA
		CACHOEIRINHA
		SANTANA
		SAIA VELHA / MARIA PEREIRA
	<i>LAGO PARANOÁ</i>	SANTA MARIA / TORTO
		BANANAL
		LAGO PARANOÁ
		RIBEIRÃO DO GAMA
	<i>RIO DESCOBERTO</i>	RIACHO FUNDO
		LAGO DESCOBERTO
		DOIS IRMÃOS
		MELCHIOR / BELCHIOR
BURITI		
<i>RIO CORUMBÁ</i>	ENGENHO DAS LAGES	
	ALAGADO / PONTE ALTA	
<i>RIO SÃO MARCOS</i>	SANTA MARIA	
	SAMAMBAIA	
<i>BACIA DO SÃO FRANCISCO</i>	<i>RIO PRETO</i>	SANTA RITA
		JACARÉ
		SÃO JOSÉ
		EXTREMA
		BURITI VERMELHO
		ALTO JARDIM
		MÉDIO JARDIM
		BAIXO JARDIM
		CAPÃO DO LOBO
		SÃO BERNARDO
		<i>BACIA DO TOCANTINS / ARAGUAIA</i>
SONHIM		
PEDREIRA		
PALMA		

Fonte: Campana et.al. (1998).

A Região Hidrográfica Tocantins/Araguaia drena cerca de 773 km² do Distrito Federal, compreendendo praticamente toda a região Norte do Distrito Federal. É constituída pela Bacia do Rio Maranhão, sendo seus principais afluentes: o Rio Palmeiras, Ribeirão Sonhim, Ribeirão da Contagem, Ribeirão das Pedreiras, Ribeirão Cafuringa, Rio das Palmas, Ribeirão Dois Irmãos e Rio do Sal.

A Região Hidrográfica do Paraná é responsável pela maior área drenada do Distrito Federal, ocupando, aproximadamente, uma área de 3.658 km² com uma descarga média de 64 m³/s. É constituída pelas bacias hidrográficas do Rio São Bartolomeu, do Lago Paranoá, do Rio Descoberto, do Rio Corumbá e do Rio São Marcos. Por ter a maior área de drenagem, cerca de 64% de toda porção territorial do Distrito Federal, a região hidrográfica do Paraná é de suma importância para a região, pois nela estão localizadas todas as grandes áreas urbanas e todas as captações de água para o abastecimento público. Os principais formadores das bacias hidrográficas da Região Hidrográfica do Paraná, na área do Distrito Federal, são os seguintes: Bacia do Descoberto, constituída pelo Rio Descoberto, que nasce no Distrito Federal, o Ribeirão Rodeador, o Ribeirão das Pedras, o Ribeirão Melchior e o Ribeirão Engenho das Lajes; Bacia do Corumbá, formada pelo Ribeirão Ponte Alta, Alagado e Santa Maria; Bacia do São Marcos, constituída pelo Córrego Samambaia; Bacia do São Bartolomeu, formada pelo Ribeirão Pípiripau, Ribeirão Mestre d'Armas, Ribeirão Sobradinho, Rio Paranoá, Ribeirão Taboca, Ribeirão da Papuda, Ribeirão Cachoeirinha e Ribeirão Santana.

Os recursos hídricos superficiais são comumente caracterizados, quanto à disponibilidade hídrica, por meio de análise estatística de dados hidrológicos, como as vazões de escoamento superficial com 50 e 95% de permanência Campana *et.al.* (1998).

A Tabela 3 mostra as vazões Q_{50} e Q_{95} para as áreas das unidades hidrográficas do DF. Essas vazões foram obtidas por regionalização, comumente utilizadas para obtenção das curvas de permanência em locais onde não possuem dados hidrológicos ou são escassos.

Tabela 3 - Vazões Q_{50} e Q_{95} para as áreas das unidades hidrográficas do DF

BACIA HIDROGRÁFICA	UNIDADE HIDROGRÁFICA	Área (km²)	Q₅₀ (m³/s)	Q₉₅ (m³/s)
RIO SÃO BARTOLOMEU	PIPIRIPAU	226,65	3,54	1,81
	MESTRE D'ARMAS	224,51	3,50	1,79
	SOBRADINHO	259,64	4,09	2,04
	PARANOÁ	142,58	2,16	1,19
	TABOCA	116,09	1,74	0,99
	PAPUDA	203,11	3,15	1,63
	CACHOEIRINHA	209,32	3,25	1,68
	SANTANA	151,36	2,31	1,25
LAGO PARANOÁ	SAIA VELHA / MARIA PEREIRA	99,33	1,47	0,86
	SANTA MARIA / TORTO	249,76	3,99	2,26
	BANANAL	127,74	2,44	1,35
	LAGO PARANOÁ	288,69	3,41	2,23
	RIBEIRÃO DO GAMA	146,31	2,58	1,47
RIO DESCOBERTO	RIACHO FUNDO	225,48	3,08	1,92
	LAGO DESCOBERTO	370,44	5,59	3,05
	DOIS IRMÃOS	64,08	1,25	0,81
	MELCHIOR / BELCHIOR	216,04	3,53	2,02
	BURITI	96,53	1,77	1,10
RIO CORUMBÁ	ENGENHO DAS LAGES	72,58	1,39	0,89
	ALAGADO / PONTE ALTA	270,88	3,32	2,15
RIO SÃO MARCOS	SANTA MARIA	21,91	1,18	0,46
	SAMAMBAIA	56,19	0,80	0,51
RIO PRETO	SANTA RITA	80,60	1,18	0,71
	JACARÉ	205,27	3,19	1,65
	SÃO JOSÉ	96,11	1,42	0,83
	EXTREMA	249,45	3,92	1,97
	BURITI VERMELHO	56,36	0,81	0,51
	ALTO JARDIM	245,11	3,85	1,94
	MÉDIO JARDIM	159,03	2,43	1,31
	BAIXO JARDIM	155,25	2,37	1,28
	CAPÃO DO LOBO	42,0	0,59	0,39
SÃO BERNARDO	83,07	1,22	0,73	
RIO MARANHÃO	VEREDA GRANDE	217,66	3,55	2,04
	SONHIM	213,10	3,49	2,00
	PEDREIRA	146,08	2,53	1,50
	PALMA	223,59	3,63	2,08

Fonte: Campana et.al. (1998)

A Figura 24 mostra a rede de drenagem do Distrito Federal, bem como, três das principais regiões hidrográficas brasileiras.

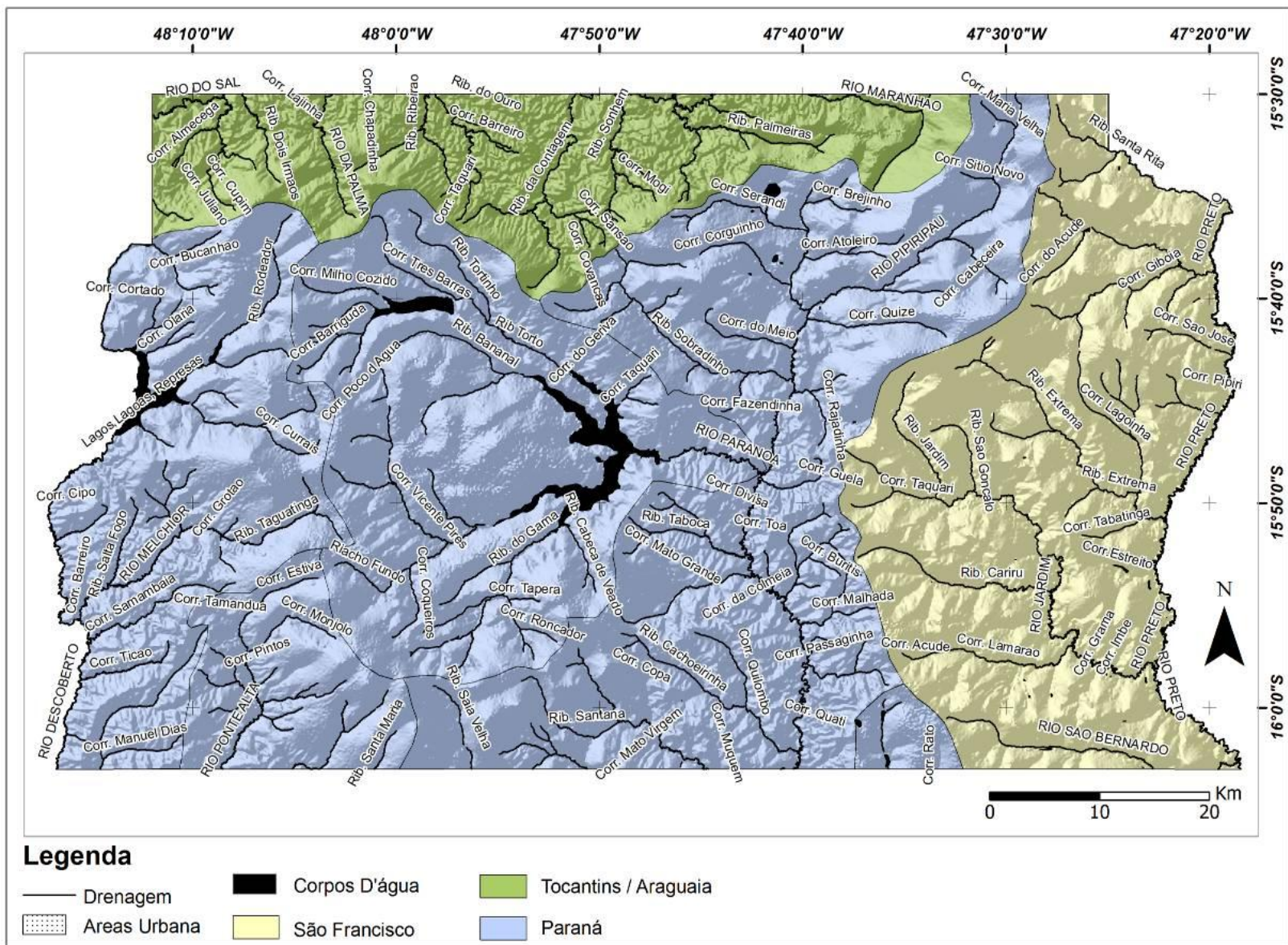


Figura 24 - Rede de drenagem do Distrito Federal e as regiões hidrográficas brasileiras Paraná, São Francisco e Tocantins/Araguaia.

3.1 - Gestão Integrada de Recursos Hídricos

O conceito de gestão integrada de recursos hídricos vem sendo difundido em todo o mundo através da conscientização e capacitação de profissionais, do desenvolvimento tecnológico e econômico e de reformas legais e institucionais.

De acordo com Tundisi & Matsumura-Tundisi (2008), a gestão integrada de recursos hídricos necessita de uma abordagem sistêmica, integrada e preditiva em nível de ecossistema integrado, relacionando o ciclo de águas atmosféricas, superficiais e subterrâneas e integrando os usos múltiplos.

Sendo assim, a referida gestão pode ser entendida como uma forma de se buscar a sustentabilidade dos mananciais, a fim de assegurar o suprimento de água em quantidade e qualidade para atender às necessidades da atual e das futuras gerações (UNESCO, 2003).

De acordo com Tundisi & Matsumura-Tundisi (2008), os elementos fundamentais para a gestão integrada são os seguintes:

- ✓ Descentralização da gestão em nível da bacia hidrográfica;
- ✓ Promoção e implantação de instrumentos legais e de ações através da organização institucional;
- ✓ Proteção do ciclo hidrológico e dos mananciais;
- ✓ Gerenciamento conjunto da quantidade e qualidade da água;
- ✓ Proteção do solo, prevenção da contaminação e eutrofização;
- ✓ Gerenciar conflitos e otimizar usos múltiplos adequando-os a economia regional;
- ✓ Monitoramento sistemático e permanente da qualidade e quantidade da água;
- ✓ Promoção de avanços tecnológicos na gestão integrada - monitoramento em tempo real, indicadores biológicos de contaminação;
- ✓ Ampliar a capacidade preditiva do gerenciamento por bacia hidrográfica e dar condições para a promoção de orientações estratégicas para a prospecção e a procura de alternativas.

Os princípios desse tipo de gestão são aplicáveis em muitas regiões. Entretanto, sua implementação está sujeita a adaptações de acordo com os processos biogeofísicos, econômicos e sociais de cada lugar.

Sabe-se que em diversos lugares estabeleceu-se a bacia hidrográfica como unidade de gestão participativa e descentralizada de recursos hídricos. Ocorre que quando se analisa situações em que os limites das bacias hidrogeológicas não são coincidentes com os das bacias hidrográficas, é necessário considerar a interdependência dos sistemas e adequar os fundamentos propostos por Tundisi (2003).

No Brasil, embora a bacia hidrográfica seja adotada como unidade de planejamento, a Carta de Brasília (2000) versa sobre a necessidade de se considerar as especificidades

regionais em termos geográficos, sociais e bióticos, como fatores essenciais à eficiência das políticas de gestão integrada dos recursos hídricos.

O instrumento jurídico que trata da gestão das águas no Brasil, é a Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997 (Brasil, 1997), que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos – PNRH e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SNGRH. A referida Política tem como um de seus objetivos o uso integrado das águas, considerando a unicidade do ciclo hidrológico.

Dentre os instrumentos da PNRH, a outorga de direito de uso dos recursos hídricos é o mecanismo pelo qual o uso integrado e múltiplo pode ser tecnicamente aplicado, procurando assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos das águas e o efetivo exercício de direitos a seu acesso.

3.1.1 - Outorga de águas superficiais e subterrâneas

A implantação e a operacionalização do regime de outorga do direito de uso dos recursos hídricos no Brasil respaldam-se em bases legal, institucional e técnica.

Legislação

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 do Brasil, de 1988 (Brasil, 1988), estabelece que são de domínio da União, os lagos, rios e quaisquer correntes de água que banhem mais de um Estado, sirvam de limites com outros países, ou se estendam a territórios estrangeiros ou deles 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. Também, restringe à União, o domínio dos potenciais de energia hidráulica.

A Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997 (Brasil, 1997), dispõe que a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas e que se sujeitam à outorga pelo Poder Público, os direitos dos seguintes usos: 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 esgotos 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.

A Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000 (Brasil, 2000a), que dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas – ANA estabelece, em seu art. 5º, os seguintes 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: 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, estabelece, ainda, que a natureza e o porte do empreendimento, bem como o período de retorno do investimento, quando for o caso, devem ser levados em conta no estabelecimento dos prazos, os quais, no caso de concessionárias e autorizadas de serviços públicos e de geração de energia, devem coincidir 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 (Brasil, 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, 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 hidroviário, quando couber, dentre outros usos.

Instituições

A base institucional é essencialmente constituída pelos Conselhos de Recursos Hídricos, órgãos gestores de recursos hídricos, pelos Comitês de Bacia Hidrográfica e pelas Agências de Água, além de outras entidades intervenientes, conforme prevê a Lei nº 9.433 de 1997 (Brasil, 1997).

A referida Lei, 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.

O Decreto nº 2.612, de 03 de junho de 1998 (Brasil, 1998), em seu art. 1º, Inciso VI, dispõe que compete ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 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; e ações mitigadoras e compensatórias.

Com a aprovação da Lei nº 9.984 (Brasil, 2000a) a atribuição de outorgar o direito de uso de recursos hídricos, em corpos de água de domínio da União, passou a ser competência da ANA.

Entre as competências dos Comitês de Bacia Hidrográfica, está a de propor ao Conselho Nacional ou aos respectivos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos, 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.

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 Qualitativo e 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).

Alguns Estados, como Ceará, São Paulo, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, avançaram bastante na implementação de seus sistemas de gestão das águas, entretanto, ainda não foi desenvolvido nenhum aplicativo específico para a outorga que considere o uso integrado das águas superficiais e subterrâneas.

3.1.2 - Outorga de Uso de Águas no Distrito Federal

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 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 nº 22.359 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.

Para os usos de águas superficiais, a Resolução ADASA nº 350, de 23 de junho de 2006 (DF, 2006), estabelece até 80% das vazões de referência $Q_{7,10}$, Q_{90} , ou Q (médias das mínimas mensais), quando não houver barramento; até 80% das vazões regularizadas, dos lagos naturais ou de barramentos implantados em mananciais perenes e até 90% da vazão de referência nos casos de abastecimento humano.

Segundo Benetti *et.al.* (2003), a determinação de outorgas para uso integrado das águas, deve ter como fundamento principal a manutenção de vazões no rio que suportem o ecossistema aquático, as quais são chamadas na literatura de vazões residuais, remanescentes, ecológica ou ambientais.

Como mencionado, os percentuais outorgáveis de água superficial, no Distrito Federal, baseiam-se no conceito de vazão mínima ecológica ($Q_{7,10}$), isto é, vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de período de retorno, obtidas da curva de frequência de vazões mínimas. Esse índice é obtido através da análise estatística da série histórica de medidas de vazão em um ponto do rio, considerando a média de 7 dias consecutivos e recorrência de dez anos (Tucci, 2009).

A eficiência do método da vazão ecológica pode ser questionada quando se pensa na heterogeneidade e complexidade das bacias hidrográficas. O referido método, não é a única condição para que haja equilíbrio ambiental, sendo de suma importância, para a manutenção dos ecossistemas aquáticos, o estudo da continuidade ou descontinuidade longitudinal de um rio e das relações entre águas superficiais e subterrâneas (Silva, 2007).

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 $5\text{m}^3/\text{dia}$. Quanto aos usos considerados insignificantes, necessitam de registro os poços manuais com vazão menor ou igual a $5\text{m}^3/\text{dia}$ e os poços construídos para pesquisa. O período de captação serão estabelecidos conforme os parâmetros obtidos na interpretação do teste de vazão, e com base no uso solicitado. No caso das regularizações, na ausência de dados, será considerado limite de 75 % (setenta e cinco por cento) das vazões médias regionais e período máximo de captação de 20 (vinte) horas por dia, mediante declaração de responsabilidade do usuário.

De acordo com o Decreto nº 22.358, “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.

Observa-se, contudo, que na prática, os critérios para outorga de água subterrânea se baseiam mais em normas construtivas de poços e teste de bombeamento, avaliando impactos em poços vizinhos, se houver, do que na interferência entre águas superficiais e subterrâneas.

A maioria das proposições na definição de retirada segura de água subterrânea está fundamentada na quantidade de água que pode ser extraída regular e permanentemente do aquífero sem deplecionar perigosamente a sua reserva (Dingman, 2002). Um mal entendido comum foi, e ainda é, o de se acreditar que a extração de água subterrânea seria segura se a taxa média anual de extração não excedesse a taxa média anual da recarga natural do aquífero, prática conhecida na literatura como *safe-yield*, volume seguro, volume sustentado, volume perene ou volume ótimo (Fetter, 2000; Llamas, 2004).

Os critérios baseados apenas no conceito de *safe-yield* ignoram a descarga natural da água subterrânea nos corpos superficiais e os demais componentes do balanço hídrico no aquífero. Dessa forma, pode-se estar determinando uma taxa de exploração que pareça segura com relação ao armazenamento subterrâneo, mas que não é segura quanto a descarga natural nos corpos d'água (Llamas, 2004).

Em rios de regime efluente, considerando uma situação em que o sistema é submetido a intensas retiradas de água subterrânea e em que a recarga induzida não ocorra, a captura das descargas naturais do aquífero ocorre quase que simultaneamente ao declínio no seu armazenamento. Em consequência disso, as vazões do fluxo de base tendem a diminuir gradativamente até que um novo equilíbrio no sistema aquífero/rio seja alcançado (Sophocleous, 2002). Para a gestão de recursos hídricos, esse desequilíbrio é significativo, uma vez que, atualmente, as outorgas são concedidas sem levar em consideração os efeitos cumulativos dos fluxos de água.

Fetter (2004) e Llamas (2004), além de outros autores, citam que, apenas quando problemas relacionados à exploração intensiva de água subterrânea começam a aparecer, estudos são realizados para analisar os volumes retirados de água do aquífero, o que não é uma garantia de que o mesmo possa recuperar sua capacidade anterior. Para se conhecer o grau adequado ou admissível de sobreexploração de um aquífero, é necessário que se analisem, de forma detalhada e atualizada, os efeitos da retirada de água subterrânea sobre o escoamento em corpos superficiais (Custódio, 2002; Winter *et. al.*, 1998; Sophocleous, 2002).

3.2 - Parâmetros Básicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos

Para um efetivo gerenciamento dos recursos hídricos, é fundamental conhecer os parâmetros hidrológicos e hidrogeológicos que caracterizam os sistemas hídricos 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. Tais medidas devem ser baseadas em critérios científicos, capazes de garantir a sustentabilidade atual e futura dos corpos de água superficiais e subterrâneos.

Os principais parâmetros necessários à gestão integrada dos recursos hídricos podem ser determinados em função do potencial hídrico dos rios e dos aquíferos, da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea e da demanda dos usuários da água.

O potencial hídrico dos rios e dos aquíferos é estabelecido a partir dos parâmetros definidos pelo meio físico, tais como, as características geológicas, geomorfologia, climáticas, hidrológicas, hidrogeológicas, pedológicas e do uso e cobertura vegetal da região (Freeze & Cherry, 1979; Fetter, 2000; Winter *et al.*, 1998; Sophocleous, 2002; Tucci, 2004 e Feitosa *et al.*, 2008).

As características do meio físico são aspectos fundamentais ao entendimento dos processos que controlam a distribuição e a disponibilidade dos corpos hídricos de uma região.

Para quantificar a disponibilidade dos corpos hídricos deve-se avaliar, além do meio físico, a dinâmica do uso e da cobertura vegetal da terra, considerando que, o grau de impermeabilização em zonas de recarga é inversamente proporcional à infiltração. Da mesma forma, quanto maior a impermeabilização, maior será o escoamento superficial, o risco de erosão e o incremento do aporte de sedimentos nos reservatórios superficiais.

São comumente utilizados os seguintes indicadores de disponibilidade hídrica superficial:

✓ Vazão natural: é aquela que seria originada na bacia se não houvesse qualquer interferência humana, como derivações, regularizações, importações ou exportações de água e usos consuntivos. Essa condição raramente é observada nas bacias em decorrência das atividades antrópicas, que alteram as condições de uso e ocupação do solo e afetam diretamente as condições do escoamento superficial.

✓ Vazão natural média: é a máxima disponibilidade hídrica superficial, uma vez que esta é a maior vazão que pode ser teoricamente regularizada. Está relacionada a uma determinada probabilidade de ocorrência no tempo. É obtida através da frequência de ocorrência de vazões em uma bacia, por exemplo, a vazão com permanência de 95% é aquela que é excedida ou igualada em 95% do tempo. Considerar como disponibilidade hídrica a vazão com permanência de 95% é assumir que em 5% do tempo as vazões serão inferiores a esse valor, um risco muito baixo. Admitindo a ocorrência das interferências humanas na bacia, a disponibilidade de águas superficiais pode ser a vazão regularizada, porque os reservatórios construídos e operados pelo homem são capazes de armazenar água nos períodos úmidos e liberar o volume excedente nos períodos de seca, tornando disponível uma maior quantidade de água quando esta seria naturalmente menor.

✓ Vazões mínimas para conservação do ecossistema: vazão mínima necessária para garantir a preservação do equilíbrio natural e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos.

✓ Vazão regularizada: é a quantidade de água que pode ser fornecida, sem falhas, por um reservatório de regularização, para o período de dados da série histórica de vazões naturais.

✓ Vazões para diluição de efluentes: é a parcela da vazão do corpo receptor necessária para diluir um lançamento de efluentes. A vazão de diluição deve ser tal que a mistura resultante tenha a concentração máxima permitida pelo enquadramento do respectivo trecho.

Em relação às águas subterrâneas, os indicadores de disponibilidade hídrica são:

- ✓ 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;
- ✓ 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;
- ✓ 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;
- ✓ 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 à 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;
- ✓ 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; e
- ✓ Vazão de segurança: corresponde à espacialização das reservas explotáveis por unidade unitária de área (km² 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.

A exploração indiscriminada dos recursos hídricos tem resultado numa significativa diminuição hídrica dos reservatórios superficiais e subsuperficiais (Llamas 2004). As atividades humanas, ao afetarem a integridade física e ecológica dos sistemas de águas superficiais e subterrâneos, podem reduzir a conectividade entre esses sistemas, alterar os processos e as descargas dos aquíferos e causar contaminação orgânica ou inorgânica dos corpos d'água (Sophocleous 2002). Acrescenta-se, ainda, que práticas inadequadas de manejo das atividades humanas podem causar rebaixamentos excessivos do nível da água em poços (Llamas 2004), degradação da qualidade das águas (Carriger, 2005), subsidência ou colapso

do terreno (Larson *et al.* 2001 e Bell 2006), contaminação dos solos e alterações no regime hidrológico entre os mananciais superficiais e subterrâneos das bacias hidrográficas (Winter *et al.* 1998).

O gerenciamento da demanda por água subterrânea requer considerar os interesses de distintos atores, bem como os tipos de uso (consuntivos e não consuntivos).

Usos consuntivos referem-se aos usos que retiram a água de sua fonte natural diminuindo suas disponibilidades quantitativas, espacial e temporalmente. Exemplos desses usos são as águas destinadas ao abastecimento urbano, industrial e doméstico (Setti *et al.*, 2001).

Usos não consuntivos referem-se aos usos que retomam a de suprimento, praticamente a totalidade da água utilizada, podendo haver alguma modificação no seu padrão temporal de disponibilidade quantitativa. A utilização de água para geração de hidrelétrica, navegação fluvial, recreação e lazer e pesca são exemplos desses usos (Setti *et al.*, 2001).

Para Setti *et al.* (2001), as demandas de recursos hídricos são intensificadas com o desenvolvimento econômico, tanto no que refere ao aumento da quantidade demandada para determinada utilização, quanto no que se refere à variedade das utilizações. Junto com o desenvolvimento e com a diversificação dos usos, surgem também os conflitos entre usuários, que podem ser classificados como:

- ✓ Conflito de destinação de uso: ocorre quando a água é utilizada para destinações outras que não aquelas estabelecidas por decisões políticas – ex. retirada de água de reserva ecológica para irrigação;
- ✓ Conflito de disponibilidade qualitativa: situação típica de uso em corpos de água poluídos; e
- ✓ Conflito de disponibilidade quantitativa: situação decorrente do esgotamento da disponibilidade quantitativa devido ao uso intensivo.

Segundo Costa (2000), o controle e o acompanhamento da demanda hídrica requerem a elaboração de um inventário socioeconômico regional que contenha o cadastro de usuários, as demandas específicas e a qualidade da água requerida.

Para a ANA (2009), as vazões de retirada consistem em importante ferramenta de análise da demanda hídrica, sobretudo quando espacializadas. A distribuição espacial das vazões de retirada permite identificar, espacialmente, a localização das bacias/microbacias com maior demanda, podendo caracterizar regiões de conflito pelo uso da água. O exame de mapas de vazões de retirada permite, ainda, avaliar conflitos localizados em função dos tipos de uso.

3.3 - O Ciclo Hidrológico e o Balanço Hídrico

O ciclo hidrológico é um fenômeno complexo de circulação de água no planeta Terra, impulsionado pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre. Em escala global,

esse ciclo é contínuo, fechado e a água circula do oceano para a atmosfera e daí para os continentes, de onde retorna, superficial e subterraneamente, ao oceano (Meinzer 1949).

As principais fases do ciclo hidrológico são a precipitação, a evaporação, a transpiração das plantas, a infiltração/percolação no interior do solo e os escoamentos superficial e subsuperficial.

A água precipita na superfície terrestre em qualquer estado físico, sendo mais significativas, em termos mundiais, as precipitações de chuva e neve.

O fluxo de água no sentido superfície-atmosfera acontece, basicamente, na forma de vapor, como decorrência dos fenômenos de evaporação e de transpiração das plantas. A maior contribuição de vapor d'água para a atmosfera é dos oceanos por cobrir cerca de 70% da superfície terrestre. Entretanto, Shuttleworth (1988) aponta que os volumes evaporados em um determinado local do planeta não precipitam necessariamente no mesmo local, porque há movimentos contínuos, com dinâmicas diferentes na atmosfera, na superfície e subsuperfície terrestre.

A água que precipita sobre os continentes infiltra no do solo ou escoar pela superfície, formando a rede de drenagem e as massas de água superficial, sujeitas diretamente aos processos de evaporação.

A água infiltrada pode ficar retida como umidade do solo, na zona não saturada, onde os espaços do solo estão preenchidos por água e ar; fluir lateralmente, a pequenas profundidades, quando existem níveis pouco permeáveis imediatamente abaixo da superfície do solo; ou chegar até a zona saturada e ser incorporada ao fluxo subterrâneo constituindo a recarga ou recurso renovável dos aquíferos.

De acordo com Hillel (1972), a infiltração da água no interior do solo é comandada pelas tensões capilares nos poros e pela gravidade, a depender, fundamentalmente, das características da topografia do terreno, da cobertura da superfície e do tipo de solo. Horton (1933) cita que a infiltração é favorecida pela presença de materiais porosos e permeáveis no solo, em regiões de baixas declividades e de cobertura vegetal natural.

Segundo Horton (1933), a quantidade de água retida no solo depende da capacidade de campo (F), que corresponde ao teor de umidade que um solo pode reter, antes de atingir a saturação, e que não contribui para a recarga da água subterrânea. Esse parâmetro é muito importante para diferenciar o potencial que um solo tem de absorver água da taxa real de infiltração.

A água retida no solo retorna a atmosfera por evaporação direta ou pelo processo de transpiração dos vegetais. A evaporação na superfície dos solos e por meio da transpiração das plantas são processos muito difíceis de serem mensurados separadamente, por isso, Thornthwaite (1948) introduziu o conceito de evapotranspiração. Esse conceito representa a quantidade de água que volta à atmosfera por evaporação e transpiração, dependendo da radiação solar, das tensões de vapor do ar e dos ventos.

De acordo com Hillel (1972), a parcela de água que flui lateralmente, escoar diretamente para os oceanos ou ressurgir na superfície, nas zonas de descarga dos aquíferos, na forma de nascentes ou como fluxo de base de rios ou lagos. O fluxo de base é a descarga de um rio perene no período de estiagem. Quando o escoamento de um rio é produzido pelo fluxo de base, ou seja, pelo fluxo de água subterrânea, diz-se que o rio encontra-se em regime de recessão ou depleção.

Quando o solo atinge a saturação a maiores profundidades, a infiltração decresce e inicia o escoamento superficial direto. Para Manoel-Filho (2000), a magnitude do escoamento superficial é função da intensidade da chuva, permeabilidade da superfície do terreno, duração da chuva, tipo de vegetação, área da bacia de drenagem, distribuição espacial da precipitação, geometria dos canais dos rios, profundidade do nível das águas subterrâneas e declividade da superfície do terreno.

Balanço Hídrico

A quantificação dos fluxos e reservas de água do ciclo hidrológico é comumente realizada por meio do balanço hídrico. O balanço hídrico obedece ao princípio da conservação das massas, segundo o qual, em um sistema qualquer, a diferença entre as entradas e as saídas é igual à variação do armazenamento dentro do sistema (Domenico & Schwartz 1990).

A unidade hidrológica comumente utilizada para calcular o balanço hídrico é a bacia hidrográfica, podendo ser considerada um sistema físico onde a entrada é o volume de água precipitado numa área topograficamente definida, e a saída é o volume de água drenado por uma rede de rios que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório.

Em geral, a equação básica do balanço hídrico pode ser escrita da seguinte maneira (Karmann, 2000):

$$P - ETR - Q \pm \Delta S = 0 \quad (3.1)$$

onde, P = precipitação, ETR = evapotranspiração real, Q = deflúvio e ΔS = variação do armazenamento de água no solo.

A evapotranspiração real (ETR) pode ser estimada a partir da diferença entre a precipitação P e a evapotranspiração potencial (ETP), do seguinte modo Thornthwaite (1948):

$$\text{se } P - ETP > 0 \rightarrow ETR = ETP$$

$$\text{se } P - ETP < 0 \rightarrow ETR = P$$

A maioria das estimativas da evapotranspiração é feita usando tanques, balanços de energia, métodos de transferência de massa e relações empíricas (Manoel Filho, 2000).

Na prática, a principal dificuldade decorre em quantificar adequadamente a variação do armazenamento de água no solo ΔS , sobretudo em estudos regionais. Karmann (2000) ressalta que esse armazenamento ocorre na forma de água retida nas formações geológicas

do subsolo, cujo fluxo é muito mais lento que o escoamento superficial direto. Os valores positivos ocorrem quando o escoamento total da bacia é alimentado pelo fluxo de água subterrânea (período de estiagem) e os valores negativos, refletem períodos de recarga (época de chuvas). Para Cicco *et al.* (1987), a correta quantificação da entrada e da saída de água numa bacia é fundamental.

A entrada pode ser obtida pela adequada instalação de pluviômetros espacialmente distribuídos. Para melhor definição dos padrões pluviométricos de uma determinada região, Monteiro (1951) indica que o período de observação ideal para dados climáticos é de 30 anos ininterruptos.

Bertoni & Tucci (2009) ressaltam que o modo como o total de precipitação é distribuído ao longo do ano é fator decisivo não só para determinar períodos de vazão baixa e alta, mas também, períodos de volume de recarga da água subterrânea. Chuvas regularmente distribuídas ao longo do ano promovem maior taxa de infiltração, pois a velocidade de infiltração acompanha o volume precipitado. Ao contrário, chuvas torrenciais favorecem o escoamento superficial, diminuem a taxa de infiltração e aumentam rapidamente a vazão, elevando o risco de erosão e o assoreamento dos rios.

De acordo com Cicco *et al.* (1987), a saída de água da bacia é regida por leis físicas representadas quantitativamente por um hidrograma, que expressa a variação da vazão em função do tempo. A distribuição da vazão no tempo é resultado da interação de todos os componentes do ciclo hidrológico.

Segundo Tucci (2009), o hidrograma pode ser caracterizado por três partes principais: ascensão, altamente correlacionado com a intensidade da precipitação; região do pico, próximo ao valor máximo, quando o hidrograma começa a mudar de inflexão, terminando quando o escoamento superficial acaba, resultando somente no escoamento subterrâneo e; recessão, quando somente o escoamento subterrâneo está contribuindo com a vazão total do rio.

Para Tucci (2009), a forma do hidrograma depende de um grande número de fatores, como: densidade de drenagem, declividade do rio, capacidade de armazenamento, forma, cobertura da bacia, modificações antrópicas, distribuição, duração e intensidade da precipitação e do tipo de solo.

Conforme Karmann (2000), o hidrograma é a base para estudos hidrológicos e permite analisar o comportamento das bacias, identificando períodos de vazão baixa e alta, auxiliando na previsão de enchentes e estiagens, assim como períodos e volumes de recarga da água subterrânea.

3.4 - Interações entre corpos d'água superficiais e aquíferos

As interações que ocorrem entre os corpos d'água superficiais e os aquíferos são bastante complexas e, para serem bem entendidas, devem ser analisadas dentro de uma perspectiva hidrogeoecológica (Sophocleous 2002). Nessa perspectiva, as interações entre as

águas de superfícies e subterrâneas são dependentes das características do clima, do solo, da geologia, da geomorfologia e do uso e cobertura vegetal da bacia hidrográfica.

Freeze & Cherry (1979) ressaltam que fatores físicos como a topografia e a geologia de determinado local, interferem de forma expressiva nas interações de fluxo entre os corpos hídricos.

A topografia pode criar complexos padrões de fluxos da água subterrânea que exercem influências mútuas nas águas superficiais e subterrâneas (Freeze & Cherry 1979). Segundo Fetter (2000), os sistemas de fluxo podem ser classificados como: local, intermediário e regional.

No sistema de fluxo local, a área de recarga está relacionada a um alto topográfico e a área de descarga a um baixo imediatamente adjacente. No sistema de fluxo intermediário, as áreas de recarga e de descarga são separadas por um ou mais sistemas de fluxo local. Já no sistema de fluxo regional, a área de recarga é, geralmente, o próprio divisor da bacia hidrográfica e a área de descarga, o vale principal (Fetter 2000).

Genericamente, as áreas de topografia mais acidentadas possuem predominância de fluxo local, enquanto que as áreas mais planas tendem a apresentar sistemas de fluxos intermediários ou regionais. Winter *et al.* (1998) mencionam que os sistemas de fluxos locais são mais dinâmicos e, por isso, têm maior ligação com os corpos superficiais. Entretanto, por serem de resposta mais rápida, sua contribuição em termos de volume, ao longo do tempo, pode ser menos significativa que a contribuição dos sistemas de fluxos intermediários ou regionais.

Os padrões de fluxo são controlados, também, pela razão profundidade/comprimento da bacia, onde quanto maior for essa razão, maior será a tendência para predomínio de fluxo regional (Fetter, 2000). Na prática, os movimentos de água subterrânea podem conter um ou mais desses tipos de fluxos, dependendo da natureza e da distribuição espacial dos aquíferos.

Freeze & Cherry (1979), Manoel-Filho (2000) e Dingman (2002) ressaltam que, para compreender a distribuição espacial dos aquíferos e a dinâmica do fluxo das águas subterrâneas, é necessário conhecer os seguintes aspectos de uma região:

- ✓ Litologia, que trata da composição mineral, da distribuição granulométrica e do grau de compactação dos sedimentos ou rochas, os quais controlam a distribuição da condutividade hidráulica;
- ✓ Estratigrafia, que descreve as relações geométricas entre os vários elementos constituintes do sistema geológico e das camadas e formações sedimentares; e
- ✓ Estrutura, que diz respeito às características geométricas relacionadas à deformação após deposição como é o caso de juntas, fraturas, falhas e dobras.

As variações na geologia, que muitas vezes não são aparentes por observações de superfície, podem originar uma grande variabilidade de configurações nos sistemas de fluxo subterrâneo, mesmo para perfis topográficos semelhantes (Freeze & Witherspoon 1967).

Unidades geológicas de diferentes permeabilidades podem afetar sobremaneira a distribuição das infiltrações. Independentemente da configuração topográfica do terreno, o fluxo de água subterrânea na direção do corpo superficial tende a seguir numa camada geológica permeável, mesmo que seja confinada entre camadas menos permeáveis.

Os efeitos do clima nas interações entre as águas superficiais e subterrâneas estão fortemente relacionados a taxa entre recargas e descargas de determinada bacia. De maneira geral, sob condições de baixa precipitação, o fluxo nos corpos superficiais resulta, em sua maior parte, da contribuição subterrânea, causando uma diminuição do nível freático. Por outro lado, em condições de alta precipitação, o aumento gradativo dos níveis superficiais de água pode elevar a infiltração para o aquífero, aumentando a recarga na direção subterrânea (Sophocleous 2002).

Desse modo, regiões de clima predominantemente úmido tendem a ter corpos superficiais mais influenciados pela regularização subterrânea, do que regiões de clima mais seco, ainda que apresentem características fisiográficas semelhantes.

As interações entre os corpos hídricos são, também, influenciadas pelas condições hidrodinâmicas dos solos. Geralmente, os limites entre manchas de solos coincidem com contatos geológicos e cada classe de solo tem uma organização nas direções lateral e vertical, fundamentais à caracterização de aquíferos porosos e no controle dos processos de infiltração e recarga (Cabral & Demetrio, 2008).

Características físicas e composicionais dos diferentes tipos de solos, como o teor de argila, a estruturação, a textura, a profundidade e a presença de camada de impedimento à drenagem, são determinantes da capacidade de retenção, infiltração, transmissão e armazenamento de água (Cabral & Demetrio, 2008).

Os aquíferos do sistema poroso são normalmente caracterizados de acordo com os valores de condutividade hidráulica e transmissividade dos solos. A variação desses valores é função do tipo de solo e, principalmente, do teor de argila e estruturação dessas coberturas. Quanto mais argilosos, menores serão os valores esperados. As feições texturais dos solos também apresentam importância específica, visto que solos argilosos ou muito argilosos podem apresentar valores de condutividade hidráulica significativamente maiores quando houver forte estruturação granular (Cabral & Demetrio, 2008).

Os efeitos do tipo de uso e cobertura vegetal da terra nas interações entre os corpos hídricos superficiais e subterrâneos estão relacionados às variações nos processos de infiltração e escoamento superficial. Para cada tipo de cobertura avaliam-se os processos atuantes na dinâmica hídrica em decorrência do uso e da cobertura como fatores de interferência na infiltração natural. O efeito da vegetação consiste em minimizar processos erosivos decorrentes dos impactos das gotas de chuva no solo e aumentar a porosidade dos solos através da bioturbação pelo enraizamento (Sophocleous 2002).

Dependendo das características fisiográficas e climáticas de uma região, as águas subterrâneas podem influenciar e/ou serem influenciadas por praticamente todos os tipos de corpos hídricos superficiais.

Os rios podem estabelecer três configurações com os sistemas de fluxo subterrâneo (Larkin & Sharp 1992):

- ✓ rios efluentes: as águas subterrâneas escoam na direção do corpo d'água superficial;
- ✓ rios influentes: as águas superficiais contribuem para o fluxo subterrâneo; e
- ✓ rios em ambas as condições: os rios contribuem ou recebem água subterrânea durante algumas épocas do ano, ou mesmo em uma posição ou outra de seu curso.

De maneira geral, para haver descarga subterrânea em um canal, condição efluente, a altura do nível do lençol freático nas proximidades do rio deve ser maior que a altura d'água no canal. No caso oposto, para a água superficial infiltrar no reservatório subterrâneo, condição influente, a altura do nível freático próximo ao rio deve ser menor que a altura de água na sua calha (Larkin & Sharp 1992).

Quanto às condições de descarga da água subterrânea nos cursos fluviais, podem ser identificados três tipos de rios: perene, intermitente e efêmero, os quais dependem da regularidade com que o aquífero contribui na vazão de base. Em rios perenes, a vazão de base é, aproximadamente, contínua no tempo, ao contrário dos rios intermitentes, os quais recebem água apenas durante certo período do ano, o que os torna influente ou efluente dependendo da época do ano. Já em rios efêmeros, o nível de água subterrânea encontra-se sempre abaixo do canal, o que o torna exclusivamente influente quando há escoamento (Larkin & Sharp 1992).

Sophocleous (2002) distingue três relações físicas entre os rios e o nível de água subterrâneo: o sistema hidraulicamente conectado em condição efluente, o sistema hidraulicamente conectado em condição influente e o sistema hidraulicamente desconectado.

Quando o nível subterrâneo intercepta o nível do canal, o sistema superfície-aquífero é dito hidraulicamente conectado, e nele, dependendo da distribuição do potencial hidráulico, pode haver uma condição efluente ou influente (Figuras 25(a) e 25(b), respectivamente). Por outro lado, quando há uma camada não-saturada entre o nível subterrâneo e o nível superficial, o sistema é dito hidraulicamente desconectado (Figura 25(c) e Figura 25(d)).

No caso do sistema hidraulicamente desconectado, pode haver uma elevação da linha freática abaixo do leito do rio, caso a taxa de recarga através da zona não-saturada no fundo do canal seja maior que a taxa de recarga em suas áreas laterais (Winter *et al.*, 1998). Nessa situação, ainda há interações entre o aquífero e a superfície líquida, podendo uma redução no nível freático ocasionar perdas no canal. Essa interação pode ocorrer por influência da franja capilar, na qual a água ocupa os espaços na região não-saturada do solo acima da superfície do lençol freático.

Assim, água do aquífero, ao ser bombeada, a altura da franja capilar pode diminuir e afetar a contribuição subterrânea no escoamento do rio por meio da zona não-saturada.

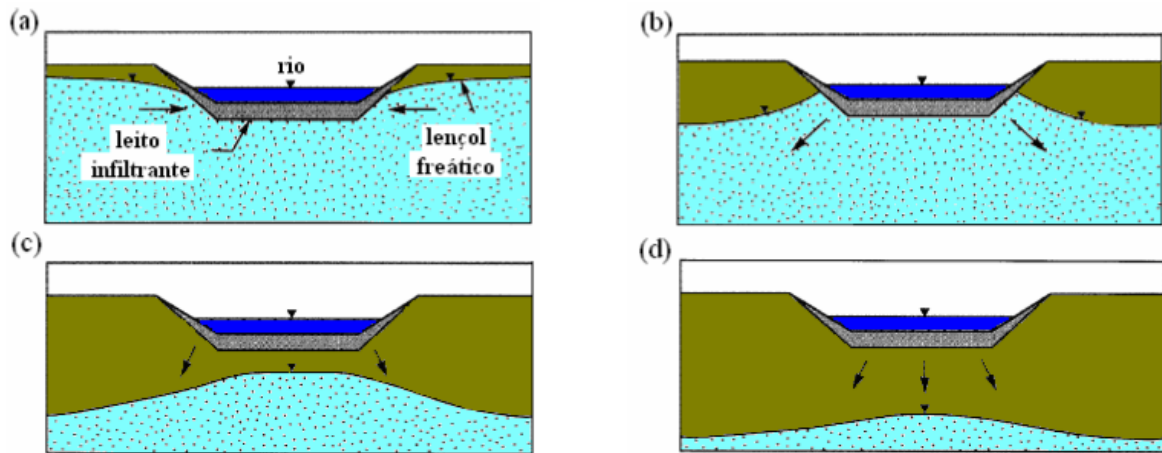


Figura 25 - Relações entre as superfícies líquidas e o nível de água subterrâneo: (a) sistema superfície-aquífero hidráulicamente conectado (condição efluente); (b) sistema hidráulicamente conectado (condição influente); (c) sistema hidráulicamente desconectado (nível freático alto); (d) sistema hidráulicamente desconectado (nível freático baixo) (adaptado de Peterson & Wilson 1998, apud Sophocleous 2002).

3.5 - Modelagem Hidrológica

Os modelos hidrológicos são ferramentas úteis à gestão dos recursos hídricos, não só por representar os processos hidrodinâmicos, mas também, por simular prognósticos de situações reais a partir de um modelo conceitual, idealizados com base no levantamento e interpretação de dados e observações de campo.

Segundo Tucci & Collischonn (2003), os modelos hidrológicos descrevem, no geral, a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, o movimento da água no solo causado pela infiltração e a percolação, a entrada e saída de água subterrânea, e o escoamento superficial, sub-superficial e nos canais de escoamento. Entretanto, a complexidade dos sistemas e seus processos dificultam a representação dos fenômenos, exigindo a simplificação de seus atributos. Para Tucci (1998), quanto mais complexos são os sistemas, mas desafiadores e necessários são os modelos.

Para Rennó & Soares (2000), os modelos geralmente descrevem processos com diferentes níveis de detalhamento e diferentes escalas de tempo. Para os referidos autores, um modelo pode ser detalhado, apropriado a pequenos intervalos de tempo e espaço, ou ser mais simples e genérico, podendo simular o comportamento de regiões inteiras e/ou períodos de tempo mais longos (décadas, séculos). De fato, muitos modelos trabalham em diferentes escalas espaciais e temporais.

Tucci (1998) e Viessman & Lewis (2002), entre outros autores, classificam os modelos sob diferentes aspectos, como por exemplo: a forma de geração (físicos, matemáticos ou híbridos); a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos); o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos); o tipo de relações entre essas

variáveis (empíricos ou conceituais); a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos); e a existência de dependência temporal (estacionários ou transientes).

Modelos físicos adotam tecnologias análogas e princípios de similitude aplicados a sistemas descritos em diferentes escalas, e por isso, foram suplantados pelos modelos matemáticos que se baseiam em equações na busca pela representação dos fenômenos hidrológicos (Christofoletti, 1999).

Segundo Cabral e Demétrio (2008), como a resolução de equações completas nem sempre é possível, faz-se necessário desprezar certos termos e ainda formular hipóteses sobre a distribuição espacial de certas grandezas (modelos analíticos) ou tornar discreto o espaço e o tempo (modelos numéricos).

Os modelos estocásticos possuem uma ou mais variáveis aleatórias como entrada, que levam a saídas aleatórias (Christofoletti, 1999). É utilizado quando pelo menos uma das características operacionais é dada por uma função de probabilidade. Já os modelos determinísticos não contêm nenhuma variável aleatória, ou seja, para um conjunto conhecido de dados de entrada teremos um único conjunto de resultados de saída (Chow, 1964).

Os modelos são empíricos quando utilizam relações baseadas em observações, mas não possibilitam fazer simulações de mudanças em condições para os quais o modelo não previu, tais como, chuvas extremamente altas, mudança de uso do solo, etc. Os modelos são, também, baseados em processos (modelos conceituais) que envolvem determinado fenômeno estudado e, em geral, são mais complexos que os empíricos, uma vez que procuram descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno estudado (Tucci, 1998).

Os fenômenos naturais são, na maioria das vezes, representados por modelos discretos, apesar de variarem continuamente no tempo (Rennó & Soares, 2000). A escolha do intervalo de tempo (passo) no qual o modelo será executado depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados (Rennó & Soares, 2000). Entretanto, quanto menor o intervalo de tempo escolhido, maior será a precisão dos resultados, aumentando o custo computacional para geração destes resultados.

Os modelos podem ser pontuais (concentrados ou agregados) ou distribuídos. Em modelos pontuais, considera-se que todas as variáveis de entrada e saída são representativas de toda área estudada. Por outro lado, os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo. De maneira geral, alguma discretização do espaço é feita e, conseqüentemente, cada elemento pode ser tratado como um ponto que representa homoganeamente toda sua área. Modelos distribuídos mais realísticos consideram também a existência de relação espacial entre elementos vizinhos (Tucci, 1998).

Finalmente, os modelos são estáticos quando, com um conjunto de dados de entrada, produz-se um resultado oriundo da resolução das equações do modelo em um único passo. Já modelos dinâmicos utilizam o resultado de uma iteração como entrada para uma próxima iteração.

Existe na literatura um grande número de modelos hidrológicos que são utilizados para diferentes finalidades, mas segundo Christofolletti (1999), todo modelo hidrológico, mesmo que adequado e aplicado nas melhores condições gera resultados com incertezas, devido às imprecisões no registro de dados hidrometeorológicos das bacias hidrográficas e na calibração dos parâmetros dos modelos.

DeVries & Hromadka (1993) agruparam os modelos em quatro classes: de evento único, de simulação do fluxo contínuo, hidráulico de inundação e de qualidade da água. Para autores como Refsgaard (1997), Tucci (1998), Collischonn (2001), Machado (2002), Kaiser (2006) e Silberstein (2006), outra forma de agrupá-los seria pela características comuns de cada grupo. De maneira simplificada os modelos seguem o fluxo abaixo, Figura 26:

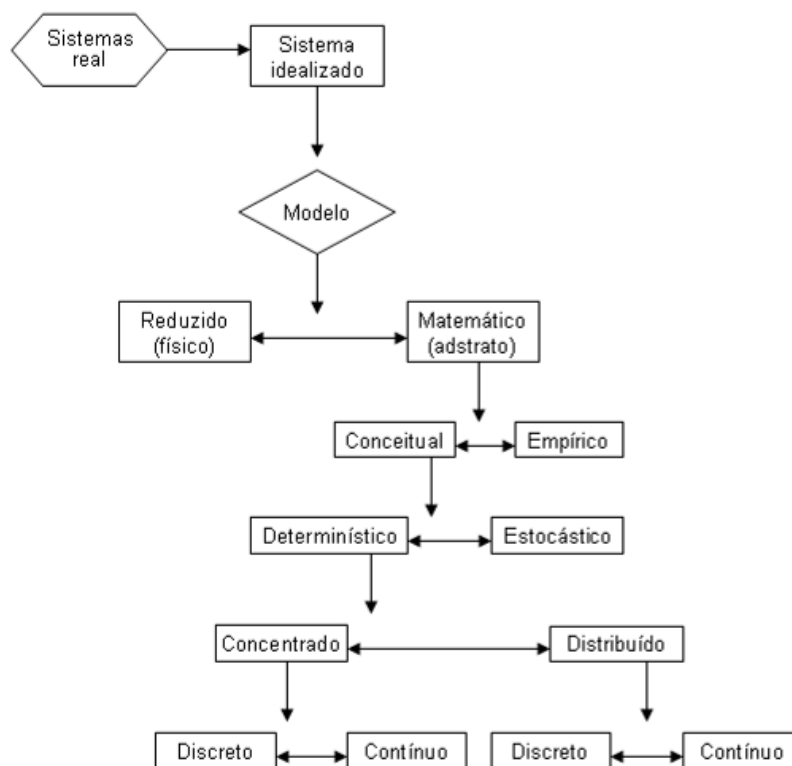


Figura 26 - Classificação simplificada dos modelos (Adaptado de Machado, 2002)

Os primeiros registros da elaboração de modelos hidrológicos datam da década de 1930, entre eles destacam-se: a teoria da hidrógrafa unitária (Sherman, 1932) e a teoria da infiltração de Horton (1933), que buscaram identificar os fatores relacionados aos processos de transformação da precipitação em escoamento e suas interações. Até a década de 1950, os métodos utilizados em hidrologia se limitavam ao uso de indicadores estatísticos, relacionando os processos hidrológicos, os chamados modelos empíricos.

No final da década de 70 surgiu o *TOPMODEL - Topography-based hydrological model* (Beven *et al.*, 1979), voltado a simulação das características topográficas das bacias hidrográficas, buscando reproduzir o comportamento hidrológico a partir variáveis condicionantes de forma distribuída. Mas foi na década de 1990 que o *TOPMODEL* (Beven *et*

al. 1995) teve uma ampla aplicação, apesar de representar de modo simplificado os principais processos físicos do ciclo hidrológico. Este modelo é considerado semidistribuído, os demais parâmetros como precipitação e transmissividade são constantes para toda a bacia. Segundo Beven (1997), as limitações deste modelo são: simplificações; derivação da distribuição do índice topográfico a partir do modelo digital de elevação do terreno; significado e calibração dos parâmetros do modelo; incertezas em sua verificação e capacidade preditiva. Durante a década de 90, surgiu, também, o modelo *SWAT - Soil Water Assessment Toll* (Arnold *et al.*, 1998), que representa importante ferramenta para o estudo do fluxo de água, de substâncias químicas e de sedimentos em bacias hidrográficas.

Apesar das primeiras tentativas de desenvolvimento de modelos hidrológicos distribuídos de base física, capazes de integrar os diferentes processos de fluxo e armazenamento de água, somente na última década, graças aos avanços no campo da computação, nas técnicas numéricas e nas formas de obtenção de dados espaciais esses modelos se tornaram aplicáveis no mundo real (Maxwell & Miller, 2005). Assim, a modelagem tornou-se ferramenta essencial para auxiliar, tanto na avaliação quanto no planejamento e na gestão dos recursos hídricos (Cabral & Demétrio, 2008).

Entretanto, acoplar os fenômenos do ciclo hidrológico em modelos matemáticos exige enorme quantidade de dados necessários ao ajuste dos parâmetros, muito dos quais não estão disponíveis. Desse modo, os algoritmos utilizados atualmente são diferenciados em função da representação do ciclo hídrico, que ora é bem mais detalhada para processos ligados ao fluxo de água superficial e ora detalha melhor os fluxos de água subterrânea. Devido a diferenciação dos modelos, convencionou-se chamar de modelos hidrológicos aqueles que melhor representam a parte superficial do fluxo e modelos de água subterrânea aqueles que descrevem detalhadamente os parâmetros da hidrogeologia dos aquíferos.

Programas como o *Surface Water Modeling System - SMS (AQUAVEO)*, *Rainfall-Runoff Model - TOPMODEL* (Beven *et al.* 1995), *European Hydrological System - SHE* (Abbott *et al.*, 1986) e *Soil Water Assessment Toll - Swat* (Arnold *et al.*, 1998), são exemplos de ferramentas comumente utilizadas para manipular, analisar e compreender dados e medições associadas à modelagem de água de superfície. Outros *softwares* como *MODFLOW2000* (Harbaugh *et al.*, 2000), *FEFLOW* (Trefry & Muffels, 2007), *Groundwater Modeling System - GMS (AQUAVEO)* e *OpenGeoSys - OGS* (Kolditz & Shao, 2010), são utilizados para interpretação e previsão de fluxos de água subterrânea. Recentemente, existem *softwares* como o *MIKE-SHE* (DHI Water and Environment, 2009), *MODHMS (HydroGeoLogic, 2006)*, *CATHY* (Paniconi *et al.*, 2003), *HydroGeoSphere* (Therrien *et al.*, 2009), *GSFLOW* (Markstrom *et al.*, 2008) e *ParFlow* (Kollet and Maxwell, 2006), que simulam sistemas acoplados de água superficial e subterrânea.

No entanto, alguns *softwares* como, por exemplo, o *SWAT* e o *OGS*, incorporaram ferramentas de interfaces com modelos como o *MODFLOW* e o *GMS*, respectivamente, para

pré e pós processamentos, a fim de melhor representar fisicamente a interação entre os mananciais superficiais e subterrâneos.

O *SWAT* tem como principal objetivo modelar a produção de água, a produção e o transporte de sedimentos e a qualidade de água, em bacias hidrográficas complexas, considerando longos períodos de tempo. Embora haja módulo específico para os componentes subterrâneos no *SWAT*, modelos integrados com o *MODFLOW* são desenvolvidos através de diferentes métodos para calcular a quantidade de descarga de água subterrânea e superficial, determinadas pela análise hidrológica da bacia hidrográfica em estudo (Kim *et al.*, 2004a,b).

O *OGS*, é um software de código aberto focado na simulação numérica de processos termo-hidro-mecânico/químico e, com base em conceitos orientados a objeto, descreve processos hidrológicos complexos através de métodos de elementos finitos e específicas condições de contorno. Este *software* permite a comunicação com o *GMS* através de uma interface simples de gerenciamento que importa dados do *GMS* para o *OGS* e vice-versa.

Contudo, o objetivo desses modelos é possibilitar o entendimento do comportamento dos processos hidrodinâmicos que ocorrem nas bacias hidrográficas, a partir de interpretação de problemas atuais e simulações de cenários futuros.

No Brasil, existem algumas iniciativas, como por exemplo, Silva (2007), que utilizou a modelagem integrada (interações rio-aquífero) para propor critérios de outorga dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, entretanto, a maioria das iniciativas agregaram apenas informação do meio físico.

Capítulo 4 - Porous Aquifers from the Federal District, Brazil: Characterization and Evaluation of Hydraulic Conditions

Tatiana Diniz Gonçalves^a, Christoph Lohe^b, José Elói Guimarães Campos^a

^a Institute of Geosciences, University of Brasília, Brazil

^b Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Germany

Submitted to GEODERMA in 07-jun-2012 - manuscript number GEODER7596

ABSTRACT

Unsaturated soil hydraulic conductivity (K) is a key input parameter for modeling subsurface water and solute movements. K-values are also important to better define the potential of aquifers and to optimize water resources management activities. Since K-values usually are not readily available, different techniques have been applied to estimate them. The objective of this study is to estimate K-values from porous aquifers found in Federal District of Brazil. Infiltration tests were conducted in different soil types using the open-end-hole approach and the permeability test reported by K. Heitfeld in 1979. Soil structure was taken into consideration in such estimations. K-values were also estimated based on pedotransfer functions available in the Rosetta software. Soil texture was determined in laboratory and used as input parameter for pedotransfer functions. Results from open-end-hole method and permeability test compared well with those obtained from pedotransfer functions. K-values from four different porous aquifers systems encountered in Federal District varied from 10^{-8} m.s⁻¹ to 10^{-6} m.s⁻¹. Highest K-rates were found in Oxisols while the lowest rates were found in Inceptisols. Shrinking conductivity trend was found for increasing depth due to increasing of loamy textured soils. Variations in the rate of hydraulic conductivity indicated heterogeneity of porous aquifers that are conditioned by textural and structural characteristics of soils.

Keywords: unsaturated hydraulic conductivity, soil structure, infiltration, pedotransfer functions.

4.1 - Introduction

Groundwater demand has grown significantly in Federal District of Brazil in the past decades. According to the 2010 demographic census (IBGE, 2011), there are 2.5 million inhabitants in this federal unit, far beyond the originally planned 600 thousand people for the year 2000. The study developed by Donald Belcher & Associates in 1950, known as “Belcher Report”, pointed out that the water resources in this region were environmentally fragile because of the dominance of high plateaus and presence of important headwaters, small streams and rivers.

Nowadays, in the Federal District, the basic services of water supply, wastewater treatment, and energy supply are insufficient to attend the demand of growing population. Water supply in Brasilia (capital of Brazil) and surrounding satellite cities is mainly dependent on two reservoirs (Santa Maria and Descoberto), some small streams, and groundwater. Major groundwater demand comes from more than 500 condominiums built after 1990 (SEDUH, 2006). Most of these condominiums are located in high plateaus and thick soils that play important role in recharging the aquifers. Urban occupation often seals surface soils, making rainfall infiltration more restricted. Consequently, there is a decreasing in the groundwater and surface water availability. Condominiums often establish their own water supply projects, based solely in their needs.

Such situation has motivated researchers to improve the knowledge of hydraulic conditions of local aquifers, which is information necessary to better control and manage the groundwater utilization by local inhabitants. Campos & Freitas-Silva (1998), Souza (2001), Lousada & Campos (2005), Almeida *et al.* (2006) and Fiori *et al.* (2010), among others, classified aquifers based mainly on unsaturated hydraulic conductivity (K), although the results are still incipient because of limited data concerning potential and exploitation of aquifers analyzed.

Estimating K-values from Federal District’s shallow aquifers are important since they allow evaluation of different systems as a function of soil infiltration rates. These shallow aquifers play crucial function in recharging deeper aquifers, regulating stream flows, and pluming contaminant flows, among other controls. Until now, there is no long-term monitoring system to create a consistent database necessary for correct management of these aquifers.

K-values from soils and saprolites can be measured by field direct methods or by indirect methods that estimate infiltration potential from some other parameters. Most of the studies developed in the region used direct methods such as the double ring and open-end-hole. Field direct methods are time consuming and expensive. As alternative, pedotransfer functions (PTFs) are often used to estimate K parameter indirectly, based on some soil attributes such as texture, morphological structure, organic matter content and density (Bouma & Van Lanen, 1987). These methods were developed for temperate soils. Therefore,

adequation for tropical soils, mainly Oxisols (the most extensive soil type from tropics), is necessary.

Specific PTFs for tropical soils were proposed by Van den Berg *et al.* (1997), Tomasella *et al.* (2000, 2003), Hoodnett & Tomasella (2002), Oliveira *et al.* (2002) and Benites *et al.* (2007). They developed PTFs based on multiple linear regression equations and artificial neural networks to determine the parameters specified in the Brooks-Corey (1964) and van Genuchten (1980) equations, or to estimate parameters related to water retention and hydraulic conductivity. This study aims to obtain K-values from Federal District's shallow aquifers in order to contribute to the sustainable management of the water resources of this region.

4.2 - Study Area

Federal District of Brazil is located in the Brazilian central plateau and covers an area of 5.789 km². It includes three of the most important Latin America basins (Paraná, São Francisco and Araguaia-Tocantins) (Figure 27). Small rivers compose streams. Aquifer recharge occurs dominantly in natural vegetation covered areas, thick soils and gentle slopes.

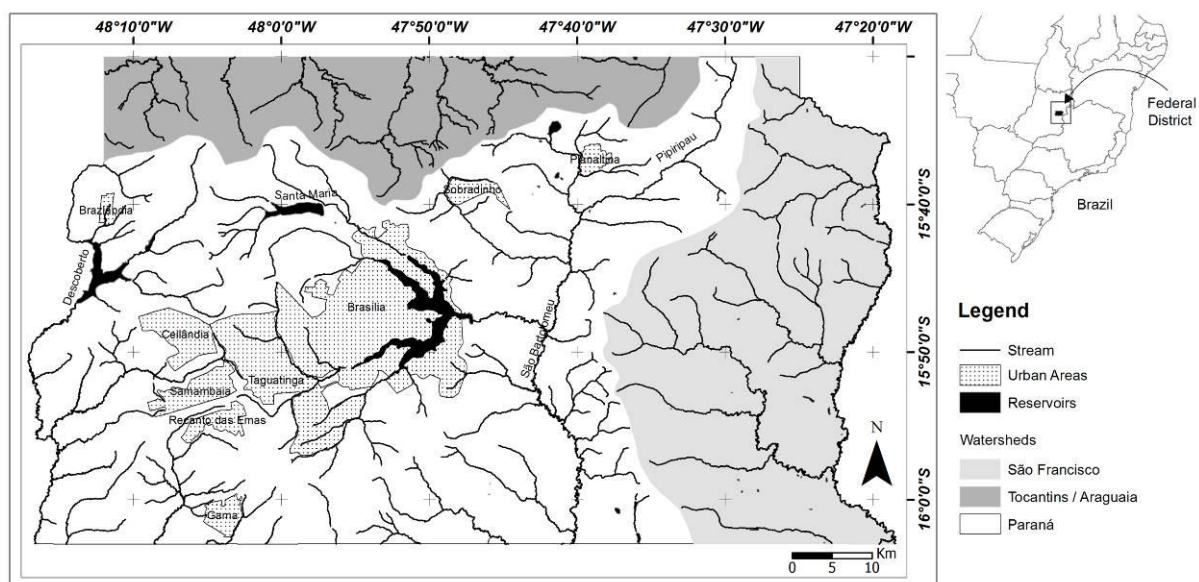


Figure 27 - Location map of the study area (Federal District of Brazil).

Relief, parental rock, climate, and biological actions, among other features, condition the potential of shallow aquifers. Campos & Freitas-Silva (1998) classified them as porous aquifers if they occur in soils, weathered rocks and alluvium materials. Soils and saprolites correspond to unconsolidated materials with large horizontal and vertical extensions, ranging from some meters to up to 80 meters in thickness (average: 15 - 25 meters). They also point out that these systems are isotropic and heterogeneous.

The Brazilian National Service of Soil Survey (Embrapa, 1978) produced a 1:100,000 scale soil map of the area. Different soil types show distinct conditions of infiltration and recharge because infiltration is controlled by thickness, textural and morphological structures,

conductivity, humidity, and slope. Textural and morphological structures are the main parameters to determine the dynamic processes in unsaturated zones of this environment.

The most representative soils of the region are Red Oxisols, Red-Yellow Oxisols, and Inceptisols (EMBRAPA, 2006), which cover about 85% of the study area. Alfisols, Mollisols, Histosols and Entisols are also found in the study site. Oxisols present the best conditions of infiltration and recharge, are frequently associated to savanna and occur in flat to gentle topography, occupy around 55% of the total area, show average thickness of 25 meters, and present sandy to clayey texture and highly stable microstructure. Inceptisols represent the worst infiltration rate, cover about 30% of the area and occur in hilly topography, are typically shallow, show sandy to loamy textures and blocky to granular structures. Grasslands are the most common vegetation cover. Other soil classes occur in small areas and are grouped in: a) Alfisols and Mollisols; b) Fluviic Entisols; c) Histosols; and d) Sandy Entisols. The first group shows medium K-values, occurs in gentle relieves, presents clayey texture and is strongly structured. The second group is shallow, occurs near streams and in gentle relieves, and often shows loamy to clayey textures. Histosols present the lowest K-values and are related to wetlands. Sandy Entisols are composed essentially by quartz, derived from the weathering of quartzite.

The mineralogy of the soil layers is mainly controlled by the composition of parent materials from the Paranoá, Canastra, Araxá and Bambuí Groups (Campos & Freitas-Silva, 1998; Faria, 1995). The most important minerals are iron oxides and hydroxides, gibbsite, kaolinite and quartz. Rocks of Paranoá Group constitute 65% of Federal District and are widespread in the western and northwestern portions. The R3 unit (sandy metarrithmite) and the Q3 unit (medium quartzite) are responsible for the maintenance of high plateaus, with deep weathered mantles, sandy texture and high permeability. The Clay Metarrithmite unit and the Psamo-Pellitic Carbonate unit also produce Oxisols and Inceptisols, depending on the intensity of weathering and parent material. Soils derived from carbonates and pellitic rocks are thick, while quartzites are more resistant to hydrolysis. Similarly, the parent materials control soil texture: carbonates and pellitic rocks result in clayey texture; quartzites often produce sandy texture.

Canastra Group occupies about 15% of the area and occurs mainly in valleys of Bartolomeu River. Thick weathered soil layer commonly covers chlorite phyllites, of this Group, but it can also occur in hilly regions, associated with thin Inceptisols. Araxá Group is limited to the southwestern part of the Federal District, mainly along valleys. Main rock types are schists and quartzite lens covered by thin layer of soils in the majority of the area. Bambuí Group is distributed throughout in the eastern portion of the Federal District, along the valleys of Preto River as well as in restricted areas in central and northern portions (valleys of Maranhão River). The main rock types are siltstone, shale and arkose. Outcrops of this Group can be found along

streams and roads. Majority of the area is covered by thick Red Oxisols or by Inceptisols, if relief is hilly.

Geomorphology controls local and regional hydrogeologic flow systems and influences the recharge and discharge and overall flow patterns. Five different compartments were recognized by Novaes Pinto (1994): High Plateau (elevation > 1,100 meters; drainage density: low; topography: flat to gentle; major soil type: Oxisols); Intermediate Plateau (elevation: 850 - 1,100 meters; topography: flat to gentle; major soil type: Oxisols); Incased Valley (topography: flat to gentle; drainage density: high; major soil type: Inceptisols); Soft Border (transition from High Plateau to Intermediate Plateau); and Strong Border (abrupt transition from High Plateau to Incased Valley).

Climate is also important for Federal District's water resources conservation. Besides the relatively high amount of annual rainfall (~ 1,500 mm), there is a marked seasonality over the Federal District. The peak of rainy summer comprises more than 50% of the rainfall from December to March. Usually there is no rainfall during the peak of dry season (June to August). The first rainfall usually occurs in late September. This seasonal pattern is also followed by other parameters such as relative humidity (can go down to ~ 5% in hottest hours of August) and temperature (~ 17 °C in colder months; > 30 °C in hotter months). Because of this seasonal climate variation, shallow aquifers play key role to keep streams perennial.

According to Coimbra (1987), the actual evapotranspiration is around 900 mm per year and 12% of total precipitation infiltrates in the soil, reaching the saturated zone of the aquifers. The presence of different savanna vegetation classes is associated with different geomorphological compartments and includes grasslands, shrublands and forestlands. Shrublands are commonly developed in thick Oxisols, grasslands are widespread in Inceptisols and forestlands are found mainly along streams. Forestlands are important to facilitate infiltration of rainfall and aquifer recharge due to bioturbation by roots and protection of soil surface from raindrop splash.

Based on the types of weathering mantles, thickness of saturated soil layer and hydraulic conductivity, Campos & Freitas-Silva (1998) classified Federal District's shallow aquifers into four systems: P₁, P₂, P₃ and P₄. Gonçalves (2007) proposed a different approach for mapping these aquifers, which was based on new infiltration data and on curve-number theory (SCS, 1954). P₁, P₂ and P₃ systems are characterized by high thickness and high, moderate and low hydraulic conductivities, respectively. The P₄ system presents low thickness and low hydraulic conductivity. Shallow wells operated in these aquifers show low average yields (< 800 liters per hour). These aquifers are related to local hydrogeologic flow and the discharge is associated with contact and slope of springs.

These shallow aquifers are important not only to function as complementary water supply of relatively isolated rural communities, but also to keep streams, rivers, springs and lakes perennial during the dry season. The unsaturated zone of these aquifers functions as an

important protection factor to avoid anthropogenic contamination. As the saturated zone maintains contact with fractured aquifers, the porous aquifers, mainly the P₁ and P₂ systems, play important function for their recharge.

4.3 - Methods

As mentioned before, K is a key parameter to characterize porous aquifers. Although many authors have studied it (e.g., Campos & Freitas-Silva, 1998; Souza, 2001; Lousada & Campos, 2005; Almeida *et al.*, 2006; Fiori *et al.*, 2010), none have considered the influence of soil structure in the porous aquifers. According to Williams *et al.* (1992) and Danalatos *et al.* (1994), soil structure in tropical countries is essential to understanding the high K-values in soil profiles with high clay contents.

To estimate K-values from porous domains of Federal District's soils, soil structure was taken into consideration. Infiltration tests were conducted in different soil classes using the open-end-hole tests as well as the permeability tests proposed by Heitfeld (1979). Soil texture was determined in laboratory. K-values were also estimated applying pedotransfer functions available in the Rosetta software package.

4.3.1 - Open-End-Hole Method

Determinations of hydraulic conductivity by in situ soil permeability (infiltration) tests were used to compare field test data with the results of pedotransfer functions. Shallow boreholes were used to conduct unsteady-state permeability tests in unsaturated zones of soils. Open-end-hole test is based on Darcy's equation and open borehole tests were proposed by Heitfeld (1979) and Scheytt & Hengelhaupt (2001). Soil samples were taken from each borehole to determine chemical composition and particle size distribution.

Location and Soil Types

Eight sites located in surroundings of urban areas of Federal District, representative of main soil types found in the study area, were selected. Boreholes were drilled to obtain undisturbed, 1-meter depth soil samples (Table 4). Additional boreholes near sampling points were drilled in six sites at 30-50 cm depth and installed for in situ permeability tests in the unsaturated zone.

Due to the thickness of Inceptisols and related saptolithes, which are normally less than one meter of thickness, infiltration tests could not be realized. Very high bulk density Alfisols is difficult to be found in the Federal District. Field investigations led to the assumption that permeability of Alfisols depends more on structural elements like faults and cracks associated with neotectonic events than on soil porosity. Textural analyses were conducted for three depths of each borehole: 0 - 20 cm; 20 - 50 cm; and 50 - 100 cm. The particle size distribution cannot be used for permeability estimations with conventional methods because tropical soils

have high clay and silt contents. Common methods of permeability estimations of fine sand to gravel textured materials, as described by Beyer (1964), are therefore not applicable. The particle size distribution was used in this study as input parameter for pedotransfer functions.

Table 4 - Locations of soil samples in the Federal District.

Soil Type	UTM Coordinates		ID	Aquifer Systems
<i>Alfisols</i>	8277640	194963	2	P ₂
<i>Alfisols</i>	8274882	193450	3	P ₂
<i>Inceptisols</i>	8271037	191235	4	P ₄
<i>Red-Yellow Oxisols</i>	8269449	206013	5	P ₁
<i>Clayey Red Oxisols</i>	8234939	188247	6	P ₁
<i>Histosols</i>	8235033	188364	7	P ₃
<i>Sandy Red Oxisols</i>	8274961	223769	E5	P ₁
<i>Clayey Red-Yellow Oxisols</i>	8240013	206271	SS	P ₁

Permeability Tests

Results of infiltration tests represent the hydraulic characteristics of the sediments surrounding the boreholes. In other words, *kf*-values for permeability are essentially point-based in which are accurate only for small areas surrounding the boreholes. Three types of permeability tests in open boreholes can be conducted: a) constant flow rate test with change in hydraulic head in the borehole; b) constant head test with stabilized infiltration rate; and c) variable head test with instant change in the hydraulic test due to quick injection. What is measured is the time of change of hydraulic head. Stable and variable head tests were chosen as the preferable infiltration test methods. The water level above the infiltration point corresponds to the filter screen or to the open end of boreholes and varies over time. During stationary tests, water levels instantly increase in the borehole with addition of water (Figure 28).

During the infiltration process related to the permeability test, there is a development of partially saturated condition. It does not reach full saturation condition because of the presence of small volume of air in the soils, for instance, associated with injected water. This may reduce the K-values measured in the field. For soils with low permeability (e.g., loamy and clayey soils), the effect of suction at the wetting front can also affect the test results, especially in unsaturated zones. Therefore, saturation of soils prior to the test itself is recommended (ISO, 2012). Test was conducted with limited saturation phase of 10 - 20 minutes, which surely did not avoid the effect of suction.

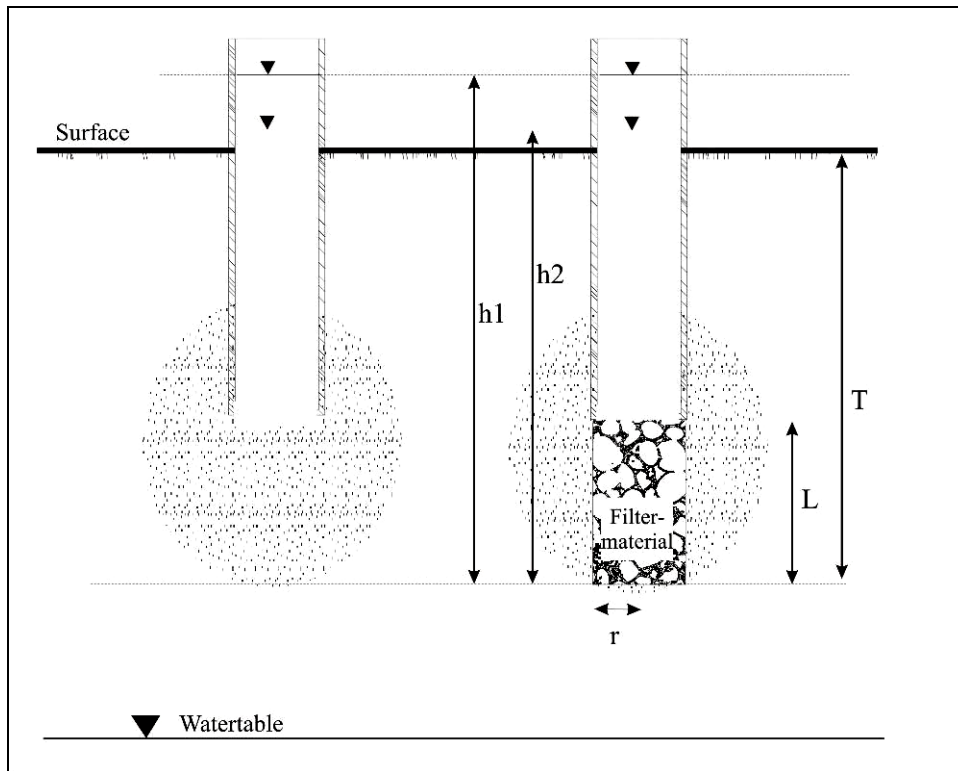


Figure 28 - Schematic view of open-end-hole (left) and infiltration test (right).
Source: Heitfeld (1979).

For the evaluation of field test with variable pressure height, the following equation for the open-end-hole test was used:

$$kf = \frac{\pi \cdot r^2}{C \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (4.1)$$

were r = radius of the borehole; h = height of water column; and t = time. Factor C depends on the screen length and borehole diameter. The equation for open end test with nominal screen length $L = 0$ can be calculated by:

$$C = 5.5 \cdot r \quad (4.2)$$

The infiltration test after Heitfeld (1979) and Earth Manual (1951, after Scheytt & Hengelhaupt, 2001) for unsaturated soils can be evaluated by following equation:

$$kf = \frac{\pi \cdot \Delta h \cdot Ct \cdot r_a}{Cu \cdot \bar{h} \cdot (t_2 - t_1)} \quad (4.3)$$

Correction factors for Ct (temperature) and Cu (length of filter material), can be obtained from monograms of Earth Manual (1951, after Scheytt & Hengelhaupt, 2001) (Figures 29 and

30). Comparing with the open-end-hole test, the setup of permeability test after Heitfeld (1979) uses additional space at the bottom of the cased borehole. The space is filled with gravel and works as drainage space instead of an installed borehole with casing and screens.

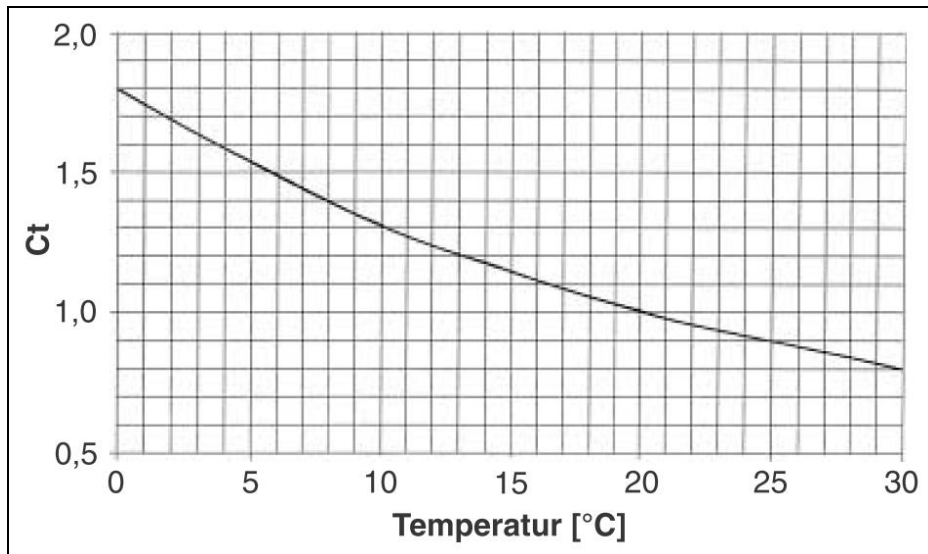


Figure 29 - Correction factor for temperature (C_t). Source: *Earth Manual* (1951, after Scheytt & Hengelhaupt, 2001).

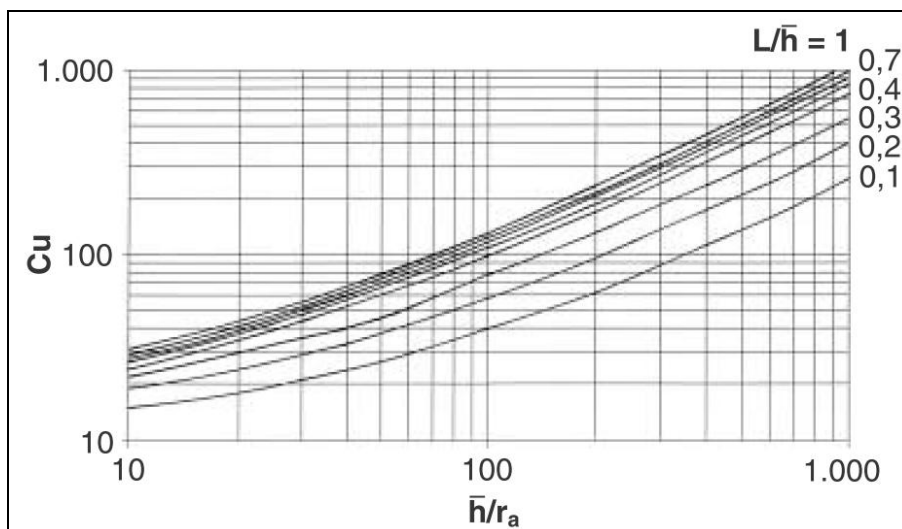


Figure 30 - Correction factor for length of filter material (C_u). Source: *Earth Manual* (1951, after Scheytt & Hengelhaupt, 2001).

4.3.2 - Pedotransfer Functions - Rosetta Software (Schaap *et al.*, 2001)

PTFs are recognized as an efficient method to predict soil hydraulic properties such as water retention and hydraulic conductivity. Reviews regarding the development and the use of PTFs can be found in Rawls *et al.* (1991), Wösten (1997), Pachepsky & Rawls (1999), and Wösten *et al.* (2001). Few references exist on results of research with PTFs that had used database from tropical countries. Cresswell *et al.* (1999) reviewed the application of PTFs to predict hydraulic properties of soils from Australia. Also in Australia, Minasny & McBratney (2002) applied neural network to predict parameters of water retention of Van Genuchten (1980)

equation. McKenzie & Jacquier (1997) presented a regression tree that predicts saturated hydraulic conductivity from soil morphology classes, including texture, structure and porosity. Minasny *et al.* (1999) predicted parameters of van Genuchten equation from basic soil properties and broad classes of soil texture.

In Brazil, estimations of hydraulic conductivity of kaolinitic Yellow Oxisols in Amazonian region, based on water retention curves, were obtained by Tomasella & Hoodnett (1997). Tomasella *et al.* (2000) used soil texture, organic carbon, equivalent humidity and soil density data to establish relations between van Genuchten's equation and water retention parameters. Gaiser *et al.* (2000) studied the influence of clay minerals in soil water retention from semiarid areas of western Africa and northwestern Brazil and showed that PTFs of soils with low activity clay minerals differ from soils with high activity clay minerals due to silt and organic carbon content. Hoodnett & Tomasella (2002) developed new PTFs for tropical soils related to water retention parameters used in Van Genuchten's equation.

The Van Genuchten's equation was successfully applied to several different soils [e.g., soils reported by Villagra *et al.* (1988) and Wtisten and van Genuchten (1988)]. Van den Berg *et al.* (1997) found that this equation describes adequately water retention curves of soils with low activity clay minerals, commonly found in Brazilian soils. The parameters of the van Genuchten equation adapted to Brazilian soils showed high accuracy in the estimation of hydraulic conductivity, as observed by Hoodnett & Tomasella (2002).

Most of these PTFs were compiled by Schaap *et al.* (2001) in a software named Rosetta, which estimates the parameters of water retention and the hydraulic conductivity according to models proposed by Van Genuchten (1980) and Mualem (1976). Rosetta offers five PTFs that predict hydraulic properties of soil from limited sets of input data. Hierarchic models use following input data: soil textural classes; percentages of sand, silt and clay; sand percentages and density, silt and clay; percentages of sand, silt and clay, density and a point of water retention in 330 cm (33 kPa) and the same parameters and water retention points in 330 and 15,000 cm (33 and 1500 kPa). The first PTF is based on a research table that supplies average hydraulic parameters for varying types of soil texture. Other four models are based on analyses of neural network and usually provide more accurate forecasts, depending on the quality of input data. Besides the hierarchical approach, the model provides prediction of hydraulic conductivity based on van Genuchten (1980) and Mualem (1976).

In this study, 25 soil profiles from Brazilian Soil Survey (Soil Map of Federal District; EMBRAPA, 1978) were used to estimate K-values by applying PTFs available in Rosetta software. Six types of more representative soils found in the study area (Red Oxisols, Red-Yellow Oxisols, Alfisols, Inceptisols and Histosols) were described according to textural and structural variations of each diagnostic horizon. In order to estimate hydraulic conductivity more appropriately using Rosetta software and to adapt the PTFs for soils of Federal District, we

obtained values of soil density and gravimetric water contents. For this, we used the following PTFs developed by Benites *et al.* (2007) (Eq. 4.4) and Tomasella *et al.* (2003) (Eq. 4.5):

$$Dd = 1.66141 - 0.12455 N - 0.00042 \text{ Clay} + 0.10622 \text{ SB} - 0.00059 \text{ Fe}_2\text{O}_3 - 0.00328 \text{ C:N} + 0.00011 \text{ WDC} + 0.00041 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0.09597 (\text{Ca} + \text{Mg}) \quad (4.4)$$

where N = total nitrogen (%); Clay = percentage; BB = bulk bases ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+$, mE/100g; Fe_2O_3 = mE/100g; CDW = clay dispersed in water (%); Al_2O_3 = percentage; and Ca + Mg = mE/100g.

PTF used to estimate water retention parameters from van Genuchten's equations θ_{33} and θ_{1500} are as follow (Tomasella *et al.*, 2003):

$$\begin{aligned} X_{14} &= -1.05501 + 0.0650857 \text{ SI} \\ X_{15} &= -2.07588 + 0.0423954 \text{ CL} \\ X_{16} &= -6.03402 + 4.80572 D_b \\ X_{17} &= -2.18409 + 8.84963 \text{ Me} \\ Z_9 &= 0.175202 + 1.18513x_{17} - 0.0996042 (x_{17})^2 + 0.327915x_{16} - 0.0758657(x_{16})^2 \\ Z_{10} &= 0.929344z_9 + 0.132519x_{14} \\ \theta_{10\text{kPa}} &= 0.339255 + 0.112526z_{10} \\ Z_{11} &= 0.191452 + 1.25652x_{17} - 0.079098(x_{17})^2 + 0.393814x_{16} + 0.152095x_{17}x_{16} \\ \theta_{33\text{kPa}} &= 0.28951 + 0.103815z_{11} \\ Z_{12} &= 0.231205 - 0.0968656(x_{15})^2 + 0.0799528(x_{15})^3 + 1.28868x_{17} + 0.13082x_{15}x_{17} - \\ &\quad 0.143115(x_{17})^2 + 0.126294x_{15}(x_{17})^2 + 0.429792x_{16} - 0.133537x_{17}x_{16} - 0.0661431x_{15}x_{17}x_{16} \\ \theta_{100\text{kPa}} &= 0.257093 + 0.0952908z_{12} \\ Z_{13} &= 0.235084 + 0.33033x_{15} - 0.191838(x_{15})^2 + 0.0543679(x_{15})^3 + 0.977685x_{17} + \\ &\quad 0.304174x_{15}x_{17} - 0.218857(x_{17})^2 - 0.164373x_{15}(x_{17})^2 + 0.0415057(x_{17})^3 + \\ &\quad 0.373361x_{16} + 0.0811861x_{17}x_{16} - 0.0768087x_{15}x_{17}x_{16} \\ \theta_{1500\text{kPa}} &= 0.214008 + 0.0862945z_{13} \end{aligned} \quad (4.5)$$

where CS = coarse sand (%); FS = fine sand (%); S = silt (%); CL = clay (%); D_b = bulk density (g/cm^3); Me = moisture equivalent (%); θ_0 , α , n , and θ_r = parameters in the van Genuchen equation; θ_0 , θ_6 , θ_{10} , θ_{33} , θ_{100} , and θ_{1500} = volumetric water contents at 0, 6, 10, 33, 100, and 1500 kPa, respectively; x_1 – x_{17} and z_1 – z_{13} , are ancillary variables.

Reference PTFs were chosen according to the following criteria: a) to involve only textural properties; b) to be developed from a vast amount of samples of Brazilian soils; and c) to have been extensively evaluated in terms of its applicability.

4.4 - Results and Discussions

To reach the objectives of this study, the main classes of soils from Federal District were characterized in terms of textural and structural features observed in field and described by EMBRAPA (1978) (Table 5; Figures 31). The diagnostic horizons (~ 30 cm depth) were considered as the basis to classify each profile.

Results demonstrated a significant increase of clayey texture between 50 and 100 cm depth in Oxisols. Profiles showed that more than 50% of Oxisols have clayey texture. Such characteristics reveals strong development of finer granular structure in Oxisols which reflects high macroporosity of these soils. In average, these soils present 30% of sand, 10% of silt and 50% of clay. Alfisols also indicated increase of clayey texture but in a lesser extent in relation to Oxisols. These soils present about 30% of sand, silt and clay for all horizons and also have structure in blocks, with strong aggregation. The clayey texture is more apparent in the first 20 cm of Histosols and Inceptisols. These soils have slight decrease of clay content between 20 cm and 50 cm. These soils did not occur at depths higher than 50 cm. The structures of these soils are prismatic, in blocks and, in some cases, massive.

Table 5 - Textural and structural characterization of major soil types from Federal District.

Soils from EMBRAPA (1978) + field observation	Number of Profiles	Diagnostic Horizon (30 cm depth)	Texture	Structure
<i>Red Oxisols + Red- Yellow Oxisols</i>	11	<i>B latosolic</i>	<i>sandy; loamy sandy; sandy loamy; sandy clay loam; sandy clay; clay with or without limestone in depth</i>	<i>Granular / little / weak to strong</i>
<i>Red Alfisols</i>	8	<i>B nitic and B textural</i>	<i>clay; clay loam; silty clay loam; silty clay</i>	<i>Sub angular block prismatic or laminar / moderate / strong Simple grain or massive</i>
<i>Histosols</i>	2	<i>B histic and Gley</i>	<i>clay; medium loam</i>	<i>Prismatic</i>
<i>Inceptisols</i>	4	<i>B incipient</i>	<i>clay; medium loam; silty loam; silty clay loam</i>	<i>Block / moderate / little</i>

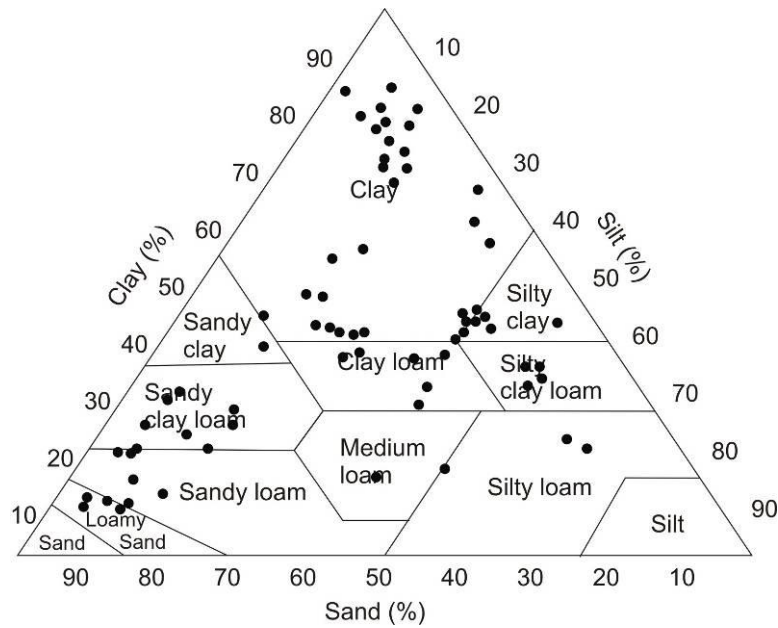


Figure 31 - Triangular textural classification of the soils applied in the study (data source: Lemos & Santos 1984).

4.4.1 - Open-End-Hole and Permeability Test after Heitfeld (1979)

Results for open-end-hole tests and permeability tests after Heitfeld (1979) showed good agreement. The highest difference between the two methods was found in the site ID 6 (14%). Results for P₁, P₂, and P₄ hydrogeological systems allowed estimating permeability values for different soils types, including Histosols and Alfisols. The hydraulic conductivity of these soils ranged from 10⁻⁸ to 10⁻⁶ m/s (Table 6).

Table 6 - Results of unsaturated hydraulic conductivity (K) values obtained by open-end-hole and permeability tests after Heitfeld (1979).

Soil Type	ID	Depth of Test (cm)	Aquifer System	Unsaturated Hydraulic Conductivity K (m/s)	
				Open-end-hole method	Permeability test after Heitfeld (1979)
Red-Yellow Oxisols	5	30-50	P ₁	1.93 x 10 ⁻⁶	1.37 x 10 ⁻⁶
Red Clay Oxisols	6	30-50	P ₁	4.5 x 10 ⁻⁷	3.1 x 10 ⁻⁶
Red Sandy Oxisols	E5	30-50	P ₁	1.43 x 10 ⁻⁶	3.02 x 10 ⁻⁶
Red-Yellow Clay Oxisols	SS	30-50	P ₁	2.79 x 10 ⁻⁶	6.21 x 10 ⁻⁷
Inceptisols	4	-	P ₄	Infiltration test not applicable	
Alfisols	2	30-50	P ₂	6.28 x 10 ⁻⁷	1.87 x 10 ⁻⁶
Red Alfisol	3	-	P ₂	Infiltration test not applicable	
Histosols	7	30-50	P ₃	3.4 x 10 ⁻⁸	1.1 x 10 ⁻⁸

Because of the amount of field tests, comparison between the results of these study and those obtained by previous investigations in the Federal District and in the Goiás State was necessary. Spera *et al.* (2000), Souza & Campos (2001), Reatto *et al.* (2007) and Fiori *et al.* (2010) reported K-values of soils based on in situ Infiltration tests and laboratory tests. Souza & Campos (2001) referred directly the results to the hydrogeologic units P1 to P4. Mean values of these studies of comparable depths and soils were taken to visualize differences in results obtained by these studies and current study (Figure 32). There was a good approximation with the results obtained by Reatto *et al.* (2007) and Spera *et al.* (2000). K-values obtained by Souza & Campos (2001) were around one decimal power higher. K-values from Fiori *et al.* (2010) matched at good to very good approximation.

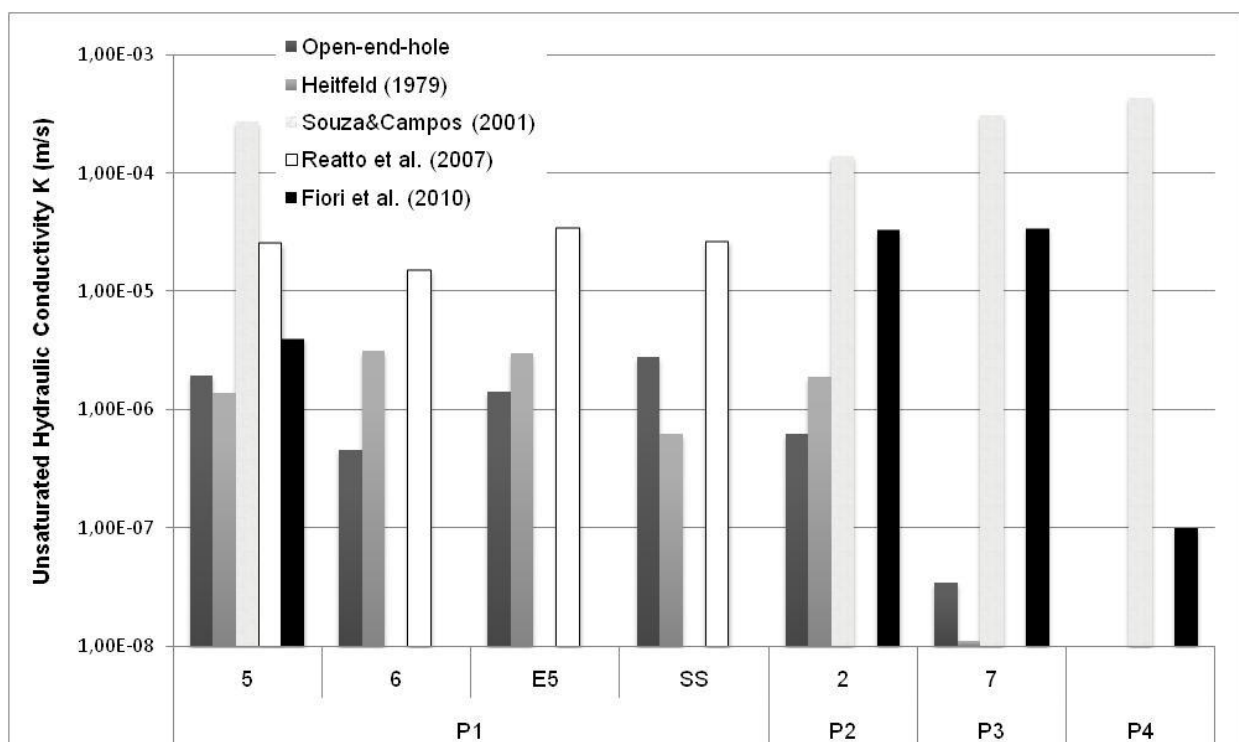


Figure 32 - Comparison of K-values of soils from Federal District and Goiás State obtained by different authors.

4.4.2 - K-Values Obtained by the Rosetta Method

K-values from EMBRAPA's data were obtained after adapting PTFs for Federal District soils by using appropriated values of soil bulk density (D_b) and gravimetric water content in the Rosetta software (Table 7). D_b of Oxisols ranged from 1.44 g cm^{-3} to 1.92 g cm^{-3} . D_b from Alfisols ranged from 1.62 g cm^{-3} to 1.79 g cm^{-3} . Finally, D_b from Inceptisols and Histosols ranged from 1.60 g cm^{-3} to 1.65 g cm^{-3} . There was an increase of D_b values with increasing depth in most of soil profiles which can be explained by the increase of clay content and consequent decrease of total porosity and hydraulic conductivity. Gravimetric water contents at -33 kPa (W_{33}) and -1500 kPa (W_{1500}) from Oxisols ranged from 0.180 g g^{-1} to 0.993 g g^{-1} and 0.048 g g^{-1} to 0.834 g g^{-1} , respectively. For Alfisols, gravimetric water contents ranged from

0.049 g g⁻¹ to 0.514 g g⁻¹ and from 0.004 g g⁻¹ to 0.196 g g⁻¹ for the W33 and W1500, respectively.

Gravimetric water contents from Inceptisols and Histosols ranged from 0.272 g g⁻¹ to 0.466 g g⁻¹ and from 0.079 g g⁻¹ to 0.161 g g⁻¹, respectively. In general, these results showed that the percentage of variance gradually decreased from 73% to 26% in Oxisols, from 75% to 25% in Alfisols, and from 75% to 24% in Inceptisols and Histosols. It is related to the decrease in the proportion of porosity that retains water when the water potential decreases. Same evidence was noticed for a varying soil types considered by Bruand *et al.* (1988), Dexter (2004), and Reatto *et al.* (2007).

Table 7- Bulk density (D_b), gravimetric water content (W) and hydraulic conductivity obtained from PTFs developed by Benites et al. (2007) and Tomasella et al. (2003), based on Rosetta software, and on EMBRAPA's data. RO = Red Oxisols; RYO = Red Yellow Oxisols; A = Alfisols; H = Histosols; I = Inceptisols.

Aquifer System	Soil Type	Bulk Density (D _b) g.cm ⁻³		Gravimetric Water Content (W33) g.g ⁻¹		Gravimetric Water Content (W1500) g.g ⁻¹		Hydraulic Conductivity (K) (m.s ⁻¹)	
		Surface	Deeper Zone	Surface	Deeper Zone	Surface	Deeper Zone	Surface	Deeper Zone
		(0-50 cm)	(>50 cm)	(0-50 cm)	(>50 cm)	(0-50 cm)	(>50 cm)	(0-50 cm)	(>50 cm)
P1	RO	1.70	1.62	0.603	0.472	0.335	0.168	1.71×10 ⁻⁷	2.52×10 ⁻⁷
P1	RO	1.60	1.60	0.332	0.332	0.100	0.100	1.07×10 ⁻⁶	1.12×10 ⁻⁶
P1	RO	1.54	1.60	0.335	0.334	0.098	0.101	1.41×10 ⁻⁶	1.01×10 ⁻⁶
P1	RO	1.58	1.57	0.452	0.444	0.154	0.148	4.83×10 ⁻⁷	6.37×10 ⁻⁶
P1	RYO	1.54	1.60	0.325	0.442	0.135	0.136	7.99×10 ⁻⁷	6.05×10 ⁻⁷
P1	RYO	1.59	1.60	0.452	0.475	0.154	0.167	4.31×10 ⁻⁷	3.12×10 ⁻⁷
P1	RYO	1.60	1.63	0.237	0.252	0.067	0.073	3.44×10 ⁻⁶	2.08×10 ⁻⁶
P2	A	1.64	1.65	0.327	0.376	0.100	0.121	3.74×10 ⁻⁷	1.81×10 ⁻⁷
P2	A	1.62	1.63	0.130	0.105	0.033	0.024	1.45×10 ⁻⁶	2.88×10 ⁻⁶
P2	S	1.65	1.64	0.175	0.158	0.047	0.042	6.38×10 ⁻⁶	7.62×10 ⁻⁶
P2	A	1.69	1.70	0.446	0.476	0.157	0.175	5.73×10 ⁻⁸	4.25×10 ⁻⁸
P2	A	1.71	1.66	0.464	0.470	0.169	0.168	7.97×10 ⁻⁸	1.01×10 ⁻⁷
P2	S	1.75	1.69	0.406	0.345	0.141	0.112	9.24×10 ⁻⁸	5.07×10 ⁻⁷
P3	H	1.61	1.63	0.230	0.326	0.106	0.102	1.28×10 ⁻⁶	6.32×10 ⁻⁷
P4	I	1.64	1.64	0.407	0.438	0.134	0.147	1.61×10 ⁻⁷	9.14×10 ⁻⁸
P4	I	1.62	-----	0.450	-----	0.153	-----	8.95×10 ⁻⁸	-----
P4	I	1.63	-----	0.344	-----	0.107	-----	4.31×10 ⁻⁷	-----

Ks-values calculated for Oxisols ranged from 3.44×10⁻⁶ m.s⁻¹ to 1.71×10⁻⁷ m.s⁻¹ in surface zone and from 2.08×10⁻⁶ m.s⁻¹ to 2.53×10⁻⁷ m.s⁻¹ in deeper zones. For Alfisols, they ranged from 1.45×10⁻⁶ m.s⁻¹ to 5.73×10⁻⁸ m.s⁻¹ in surface zone and 2.88×10⁻⁵ to 4.25×10⁻⁸ m.s⁻¹ in deep zone. Inceptisols and Histosols ranged from 1.28×10⁻⁶ to 8.96×10⁻⁸ m.s⁻¹ in surface zone and from 6.33×10⁻⁷ m.s⁻¹ to 9.15×10⁻⁸ m.s⁻¹ in deeper zones (Table 7). Again, these

results showed a decreasing trend of K-values with depth due to decrease of porosity and increase of clay content in Oxisols. This was also observed in estimations based on tests after Heitfeld. On the other hand, although Latosols present small K-values, their good structure provides good storage capacity and transmissivity of water. Furthermore, these soils commonly occur in plateaus (chapadas). When found in natural conditions, they impose a great control of conditions of infiltration, regardless of parent material.

High correlations were also observed in aquifers belonging to P2 system. Hydraulic conductivity from Alfisols showed similar range of values that was observed in tests after Heitfeld and by Rosetta software. The average value estimated by Rosetta was $3.57 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$, while the value observed by tests after Heitfeld was $1.87 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. The behaviour of this soil class was depth-dependent. There were both increase and decrease of hydraulic conductivity in depth, but Alfisols showed same behaviour. It followed the expected pattern: clay content increased with depth and this led to a decrease in hydraulic conductivity.

As noticed by previous studies (Souza & Campos, 2001; Cadamuro *et al.*, 2002; Fiore *et al.*, 2010) and also by this study, Inceptisols presented the worst conditions of infiltration and drainage. These soils are poorly developed, derived from low-degree metasedimentary rocks, and occur in hilly regions (intense runoff and limited infiltration). Based on infiltration tests and on comparison and addition of data derived by previous studies, Table 5 shows mean K-values for different aquifer systems (Table 8).

Table 8 - K-values of Federal District soils

Aquifers System	Soil Type	Hydraulic Conductivity (k) (m/s)	
		Surface (0-50cm)	Deeper Zone (> 50cm)
P1	Red-Yellow Oxisols	$10^{-5} - 10^{-6}$	10^{-6}
P1	Red Clayey Oxisols	10^{-6}	10^{-7}
P1	Red Sandy Oxisols	$10^{-5} - 10^{-6}$	10^{-6}
P1	Red-Yellow Clayey Oxisols	10^{-6}	$10^{-6} - 10^{-7}$
P4	Inceptisols	10^{-6}	10^{-7}
P2	Red Alfisols	10^{-7}	10^{-7}
P2	Alfisols	10^{-7}	10^{-7}
P3	Histosols	$10^{-7} - 10^{-8}$	10^{-8}

4.5 - Conclusions

Good agreement between observed and estimated data was found when field permeability tests and PTF methods were used. Values of P1, P2, P3 and P4 hydrogeological systems varied from 10^{-8} m.s^{-1} to 10^{-6} m.s^{-1} . Highest K-values were found in Oxisols while lowest rates were found in Inceptisols. Shrinking conductivity trend was noticed as soil depth increases, mainly due to increase of materials with loamy texture.

Contrary to the previous studies, results obtained from Rosetta software indicated that porous aquifers of Federal District are heterogeneous and anisotropic. This evidence is related to variations of K-values within a single class of soil. Heterogeneity of porous aquifers is conditioned by texture, structure and macroporosity of soils. On the other hand, anisotropic behavior of soil layers can influence the behavior of porous aquifers significantly. Depending on parent material, structural elements (for instance, faults and fractures), and geomorphological characteristics, different vertical water flows during the recharge can induce variable rates of inward flow.

Thickness of porous aquifers in Federal District ranged from few centimeters to 80 meters, with predominance (> 60%) of thickness between 15 - 25 meters. P1 and P2 systems presented thickness higher than 20 meters. Thickness of P3 system was lower than 10 meters and, for P4 system, lower than 1 meter. In this system, lack of saturation zone is common in saprolites, especially when developed on clayey rocks. Inceptisols usually have low K-values because unsaturated zone lays directly on the rocky substratum.

K-values obtained by this study can be used to evaluate the conditions of groundwater recharge and stream flow regulation of surface streams and to characterize the vulnerability of different soil types regarding contamination of both surface and deeper waters.

Capítulo 5: Evaluation of Different Pumping Tests Methods Applied to Fractured Aquifers: Case Study in the Federal District, Brazil

Tatiana Diniz Gonçalves^a, Christoph Lohe^b, José Elói Guimarães Campos^a

^a Institute of Geosciences, University of Brasília, Brazil

^b Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Germany

Submitted to Hydrological Processes in 06-jun-2012 - manuscript number HYP-12-0404

ABSTRACT

Different methods of pumping tests were evaluate and applied to fractured aquifers of the Federal District of Brazil to estimate hydrodynamic parameters. Results from more than 80 wells including 24-hour pumping tests and recovery data were compared. Transmissivity estimated by specific capacity showed best performance for this type of aquifer. Results obtained by Theis, Cooper & Jacob and Agarwal methods showed to be more dependent on well features such as efficiency, screen size and borehole diameter. Hydrodynamic parameters estimated by specific capacity may reach more accurate values compared with common pumping tests and evaluation methods since it equalizes well and aquifer boundary effects.

Keywords: fractured aquifers, pumping test analysis, transmissivity.

5.1 - Introduction

There are several methods to estimate hydrodynamic parameters of aquifers. The most widespread and popular methods (e.g., Theis (1935), Hantush (1961), Cooper & Jacob (1946), Walton (1962) and Neuman (1972) are mainly applied to porous, isotropic, homogeneous, confined or unconfined aquifers. Techniques to estimate transmissivity, hydraulic conductivity and storage coefficient based on pumping test data are common in aquifers found in clastic, sedimentary rocks, but not so common in fractured aquifers. In Brazil, fractured aquifers are particularly important to complement water supply for urban and rural population and for industry and services demands. Nevertheless, there is lack of consistent data regarding construction of wells, geologic logs and pumping tests. Consequently, fractured aquifers are still poorly studied under the point of view of hydrodynamic characterization.

A usual problem observed in pumping tests is that the same data base can allow different methods of evaluation. For example, the data set of pumping test from wells found in the Federal District (FD) can be analyzed by Theis (1935), for confined clastic isotropic aquifers, Neuman (1972), for unconfined clastic aquifers, and Hantush (1961), for leaking confined

aquifers, methods. Using these methods not yet validated for fractured aquifers may deliver results incompatible with water flow and hydraulic conditions of these types of groundwater reservoirs. In all cases, mathematic solutions can show results incompatible with the hydraulic pattern of each aquifer due to heterogeneous nature of these media.

Fractured aquifers found in FD are unknown in detail, though some relevant studies were conducted by Barros (1994), and Campos and Freitas-Silva (1998). Only one subsystem (R3/Q3) was characterized quantitatively by Campos and Freitas-Silva (1998). Furthermore, groundwater demand has grown significantly in FD and the fractured aquifers has been a water supply alternative to attend the demand of growing population.

Due to such situation researches to estimate hydrodynamic parameters from Federal District's deeper aquifers are important to better protect, control and manage the groundwater utilization by local inhabitants.

In order to understand the behaviour of the fractured aquifers in FD and to evaluate the best method that fits hydraulic conditions of this type of aquifer, this paper aimed to apply different methods to analyze pumping test data.

5.2 - Hydrogeologic Setting of Study Area

The Federal District (DF) is located in the Brazilian Central Plateau, and covers an area of 5.789 km², between parallels 15 ° 30 'and 16 ° 03' south latitude, limited to the west by the Descoberto River and east by Preto River (Figure 33).

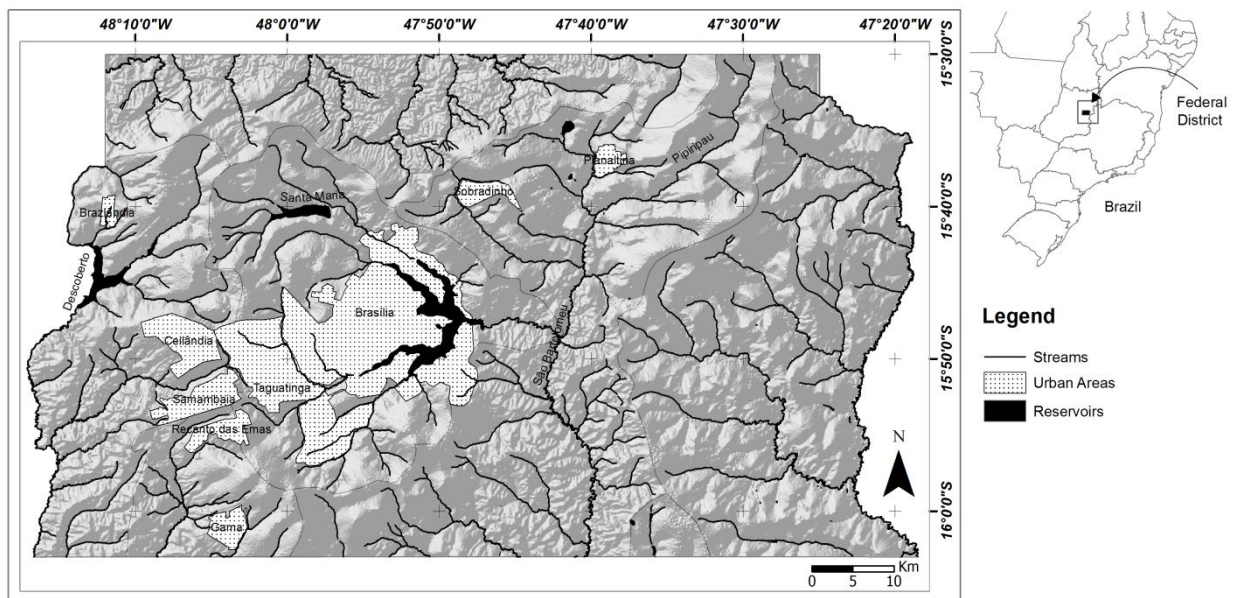


Figure 33 - Location of the study area.

The altitudes ranges from 750 to 1.344m and the climate according to the Köppen classification, is tropical (Aw) and tropical de altitude (Cwa and Cwb). This means presence of strong seasonality, hot rainy season (about 80% of annual rainfall, between October and April) and cool and dry season from May to September. Average monthly precipitation is around 11

mm in the winter and around 200 in summer season. According to Coimbra (1987), around 12% of total precipitation infiltrates until reach the saturated zone of porous aquifers and part of this amount, migrates to the fractured aquifers. Aquifer recharge occurs by vertical and lateral flow of water infiltration and the morphology of the landscape is an important factor controlling of the main regional recharge areas.

Fractured aquifers found in FD are characterized by intensely fractured rocks with a high degree of interconnections between the fractures. They are classified based on rock types related to four Proterozoic units with presence of faults and also, are grouped in four systems: Paranoá, Canastra, Bambuí and Araxá. Paranoá and Canastra systems are divided into S/A, R3/Q3, R4 and PPC subsystems and F and F/Q/M subsystems, respectively. All systems are related to the Brazilian orogenic cycle, with low grade metamorphic, strongly folded and fractured sediments.

The description and nature of the stratigraphic units are as follow: a) Paranoá Group: Unit A - red slates with minor sand and quartz veins; Unit S - metassiltstone with marble lenses and sand beds; Unit R₃ - intercalation of metric layers of quartzite and metassiltstone; Unit Q₃ - fine to medium white quartzite; Unit R₄ - regular centimetric intercalation of fine quartzite and clay bearing layers; and Unit PPC - pelitic dominant material with quartzite beds and marble lenses; b) Canastra Group: Unit F - phyllite rich in chlorite, quartz and fengite; and Unit F/Q/M - calciphyllite with marble and quartzite lenses (marble lenses must reach some kilometers square in area); c) Araxá Group: mainly composed of mica schist with minor contribution of quartzite lenses; and d) Bambuí Group: siltstone, arkose and limestone lenses at the basis.

Table 9 summarizes some descriptions of the fractured aquifers from the region. The main controls of groundwater production are the density, opening and interconnection of joint planes, which are strongly related to the presence of quartz and marble in the rock layers. Although Proterozoic structures are important for aquifers control, the Neotectonic pattern is the most relevant aspect that explains the variability of transmissivity and storage coefficient of the aquifers.

Table 9 - Main characteristics (rock type, saturated thickness and average discharge) of the fractured aquifers in the Federal District region, central Brazil.

Aquifer System / Subsystem	Thickness (m)	Rock Types	Average Well Discharge (m³/h)
PPC	120-150	shale, metargillite, metasiltstone carbonate lenses	9.0
R4	100	fine quartzite, metaargillite, metasiltite	6.0
R3/Q3	175	sandy meta rhythmite (R3), quartzite (Q3)	12.0
A	80	shale	4.0
S/A	130	Quartzite, meta-rhythmite, argillite	12.5
F	150	Phyllite	7.5
F/Q/M	150-200	Phyllites with quartzite and marble lenses	33.0
Araxá	100	Schist and micaceous quartzite	3.5
Bambuí	100-150	Siltstone, shale and arkose	6.5

Source: Campos & Freitas-Silva, 1998.

Figure 34 shows the fractured aquifers and location of the 83 wells that was used in this research.

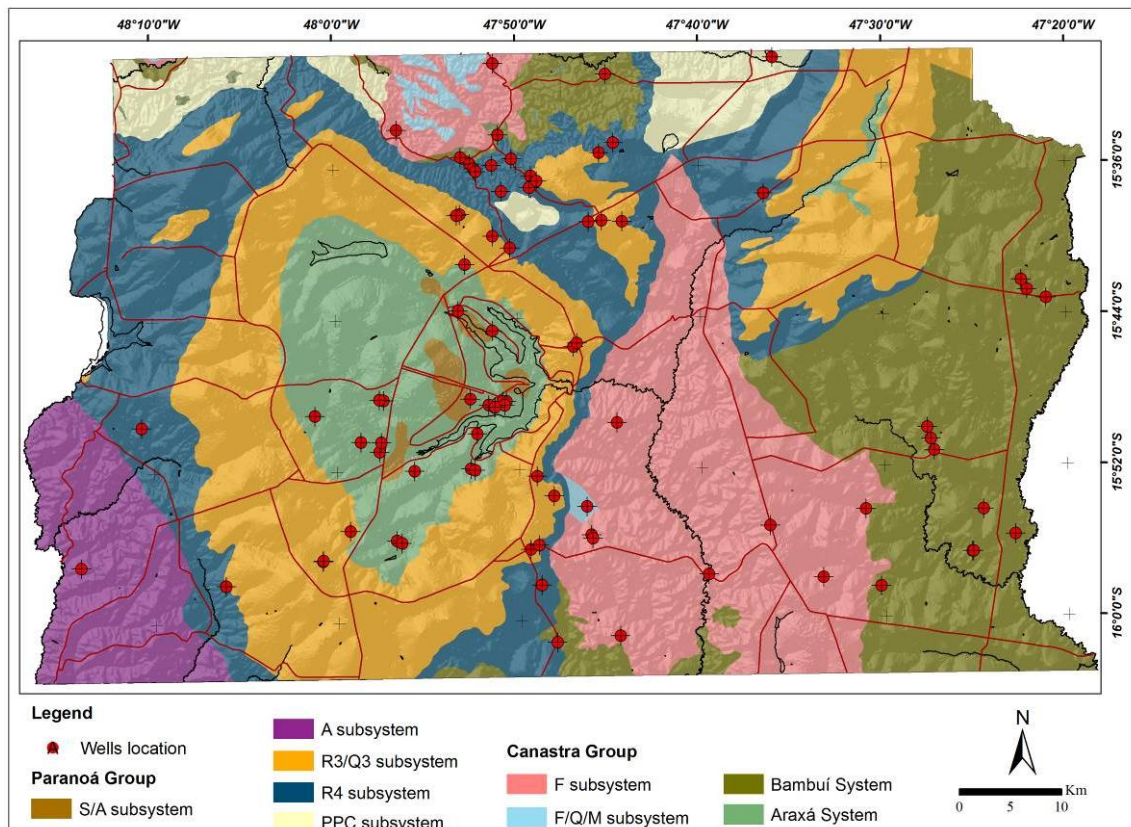


Figure 34 - Fractured aquifers and wells location of the study area.
Source: Campos & Freitas-Silva, 1998 (modified).

5.3 - Pumping Test Methods

The pumping test methods are focused on determining the main hydraulic parameters of groundwater flow systems such as transmissivity, hydraulic conductivity and storage coefficient. Depending on the boundaries conditions of each type of aquifer (confined, leaky confined or unconfined), under some circumstances (homogeneous/isotropic heterogeneous/anisotropy) and associated with the behavior of the evolution of time/drawdown flow (steady state or transient) there are a lot of interpretation methods of pumping test available (Feitosa & Manoel Filho, 1997). Among them are presented here, the basic methods most commonly used in tropical regions.

In the study area, pump test data were evaluated by different methods, including Theis (1935) continuum pumping test data and step drawdown data; Cooper & Jacob (1946), for confined aquifers; Agarwal (1980), for recovery data; and Cooper & Jacob (1946) from specific capacity data. Comprehensive discussions on those methods can be found in various publications (e.g. Kruseman & de Ridder, 1990).

Theis (1935) - Fully Confined Aquifers

Theis (1935) proposed a solution for unsteady flow to a fully penetrating well in a confined aquifer. The solution assumes a line source for the pumped well and therefore neglects well bore storage. Hantush (1961 and 1964) extended the Theis method to correct for partially penetrating wells. This solution can be used to analyze both pumping and recovery data from constant or variable rate pumping tests. The Theis solution for residual drawdown analyses a recovery test using a straight-line matching procedure. For a well performance test, it must be chosen the Theis (1935) solution for a step-drawdown test.

Assumptions of the method are: aquifer has infinite lateral extent, it is homogeneous and presents uniform thickness; the well is fully penetrating; water flow to the pumping well is horizontal; the aquifer is confined; the flow is unsteady; water is released instantaneously from storage with decline of hydraulic head; and diameter of the pumping well is very small so that storage in the well can be neglected. Data requirements include: pumping and locations of observation wells, pumping discharge; measurements of observation wells (time and drawdown) and saturated thickness.

Application of this solution allows estimation of transmissivity, storativity, hydraulic conductivity, nonlinear well loss coefficient, and nonlinear well loss exponent.

Cooper and Jacob (1946) - Test in a Confined Aquifer

Cooper and Jacob (1946) developed a method of analyzing pumping tests based on a straight-line approximation of the Theis (1935) equation for unsteady flow to a fully penetrating well in a confined aquifer. The solution assumes a line source for the pumped well and therefore neglects well bore storage. Using the principle of superposition in time, the Cooper-Jacob solution can simulate variable rate tests.

If the observation data contain recovery measurements, it is possible to use the Cooper-Jacob method to analyze drawdown data up to the first recovery period (when applying to step pumping tests). The Cooper-Jacob solution is not applicable to more than one pumping well. The solution is to use only the first pumping well in the analysis of observation data.

Basic assumptions necessary to apply this method are the same presented by Theis. Pumping and observation well distance, pumping discharge and time-drawdown data are necessary to feed the equations. It is possible to use constant or variable pumping rates and multiple observation wells to get transmissivity and storage coefficient results.

Agarwal (1980) - Recovery Data

Using a simple transformation of the time variable, Agarwal (1980) developed a procedure that uses solutions for drawdown analysis (e.g., Theis type curve) to analyze recovery data. Recovery is defined as the water level in different times after the pumping is stopped, until reach the original static level in a time t after the end of recovery test.

Agarwal method assumes that the total time of pumping is larger than the time since pumping stopped. Agarwal plot allows analyzing recovery data from one pumping well and one or more observation wells.

Estimation of Transmissivity by Specific Capacity Data

These solutions consider that it is possible to estimate the transmissivity of confined and unconfined aquifers directly from specific capacity data. Batu (1998), after Driscoll (1986), proposed the estimation of transmissivity given the specific capacity of a well as:

$T = 1.385 (Q/s_w)$ for confined aquifers and $T = 1.042 (Q/s_w)$ for unconfined aquifers, where T is transmissivity (m^2/day), Q is constant discharge rate (in m^3/day) and s_w is drawdown in the pumped well after 1 day (m).

Huntley *et al.* (1992) devised another predictive equation for estimating transmissivity from specific capacity data in fractured aquifers: $T = 0.12 (Q/S_w)^{1.18}$, where T is transmissivity (m^2/day), Q is pumping rate (m^3/day), and S_w is drawdown in pumped well (m). Mace (1997) developed a similar regression equation for 71 wells completed in a confined karst aquifer located in central Texas, as $T = 0.76 (Q/S_w)^{1.08}$, where T is transmissivity (m^2/day) Q is pumping rate (m^3/day); and S_w is drawdown in pumped well (m).

Moench (1984) – Double Porosity Aquifer Systems

The mathematical solution reported by Moench (1984) is useful for determining the hydraulic properties (hydraulic conductivity of fractures and matrix and specific storage of fractures and matrix) of double-porosity aquifers (matrix and fracture pore space rocks). Analysis involves matching the solution to drawdown data collected during a pumping test. The Moench solution accounts for flow in a double-porosity system consisting of low-permeability, matrix porosity and high-permeability, secondary fissure porosity. Moench (1988) added partial penetration and anisotropy capabilities to the solutions.

The following assumptions are required to the application of Moench solution for double-porosity aquifers: aquifer has infinite lateral extent; aquifer has uniform thickness; potentiometric surface is initially horizontal; wells are fully or partially penetrating; aquifer is represented by double porosity system; flow is unsteady; and water is released instantaneously from storage with decline of hydraulic head.

5.4 - Results and Discussions

There are several programs on the market that enable easily to find hydraulic parameters for an aquifer from pumping test data. In this study, the AQTESOLV (Duffield, 2007) for Windows software was used which is one of the more popular programs.

For determining the results, mid-late time/drawdown values of the dataset were used. The initial drawdown data were avoided because it is influenced by well construction effects.

The final drawdown data from progressed pumping time show more reliable characteristics of the aquifer.

Transmissivity was calculated for 83 wells widespread in the study area by four different evaluation methods (Theis, 1935 / Hantush, 1961; Cooper&Jacob, 1946; Agarwal, 1980 – Recovery Data and Cooper&Jacob, 1946 – Specific Capacity). The long pumping test dataset were provided by Moraes (2010), Campos & Freitas-Silva (1998), and Campos (2010). The wells are exploiting exclusively groundwater from the fractured zone, since they are always cased in the soil layer. Comparison of results is possible because, in the study area, wells are commonly constructed with similar features: casing of 6 inches diameter, depth from 120 to 140 meters, and the major portion of the drilling zone directly in rock. No screen or case is applied.

In the region, majority of pumping tests are developed at single wells without observation wells in the surrounding area. In these cases, the distance from the pumping well to the observation well was set to 1 meter. This distance is consistent because it is rational to consider that the drawdown performance will be the same into such a little distance. Using shorter distances (< 1 m) is not worthwhile since storage results can be underestimated.

Although the applied methods were not developed for fractured aquifers, it was possible to use them because the main factors which interference or disturb the transmissivity results are factors which are well influence (like well storage, well efficiency or well losses) and skin effects of the wells.

Usually it is not allowed to use Theis method for wells which are partially penetrating and neither for single wells without an observation well. In this study, partial penetration is not quite important because fractures tend to close in depth due to increase of lithostatic pressure.

5.4.1 - Data Analysis

Results are presented in box plots (Figures 35 to 5.9) in order to allow better comparison of the variability among different methods. Table 10 presents the results of different treatment methods.

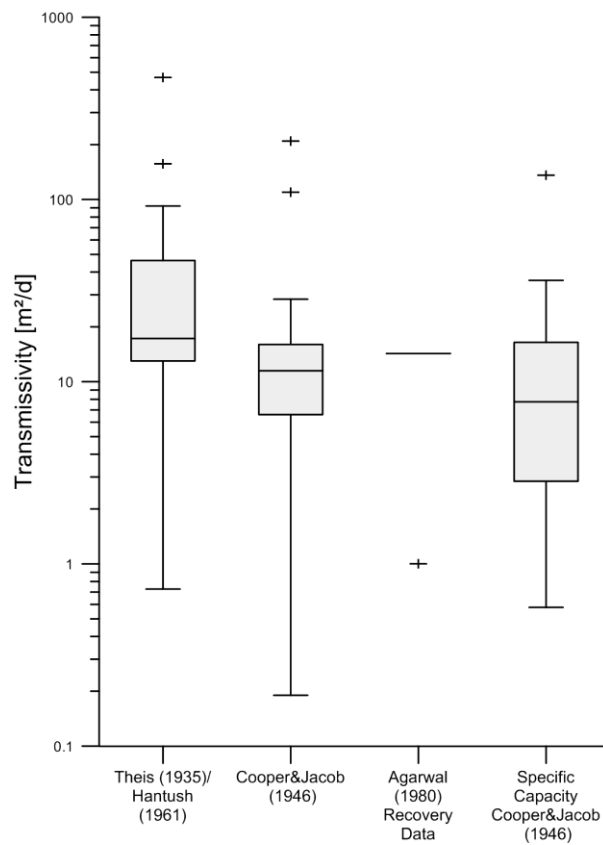


Figure 35 - Distribution of transmissivity recovered by different methods for Paranoá aquifer (A subsystem).

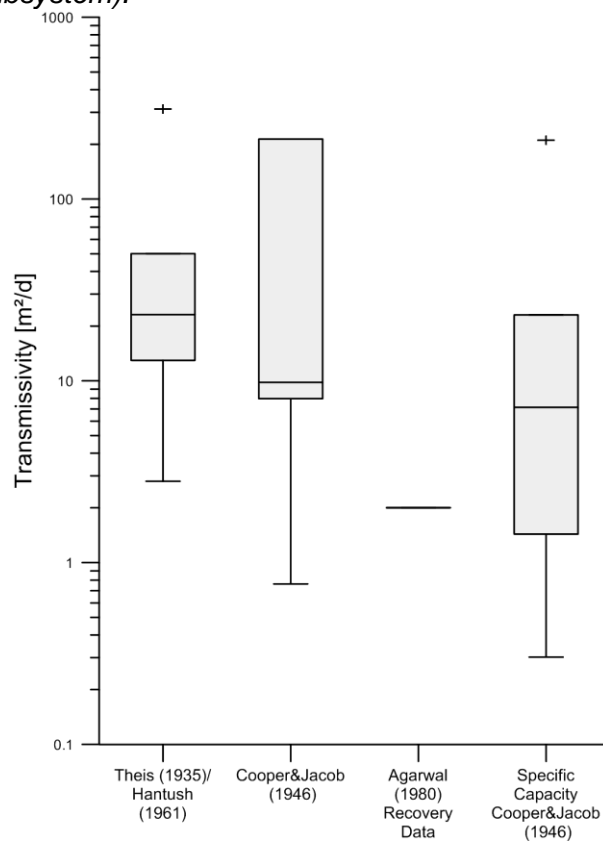


Figure 36 - Transmissivity (m²/day) calculated by different methods for S/A subsystem.

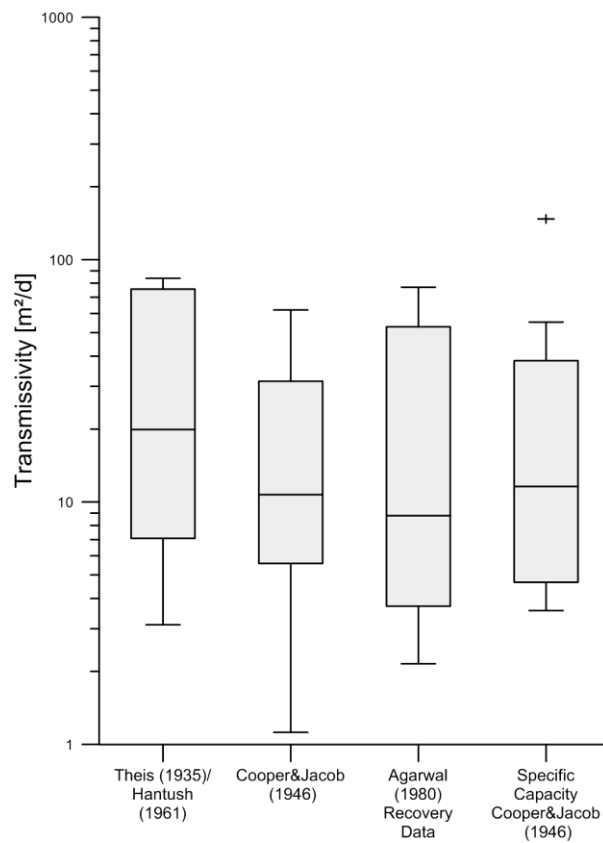


Figure 37 - Estimated transmissivity results from fractured aquifers of the Federal District region, acquired by different pumping test treatment methods (R_3/Q_3 subsystem).

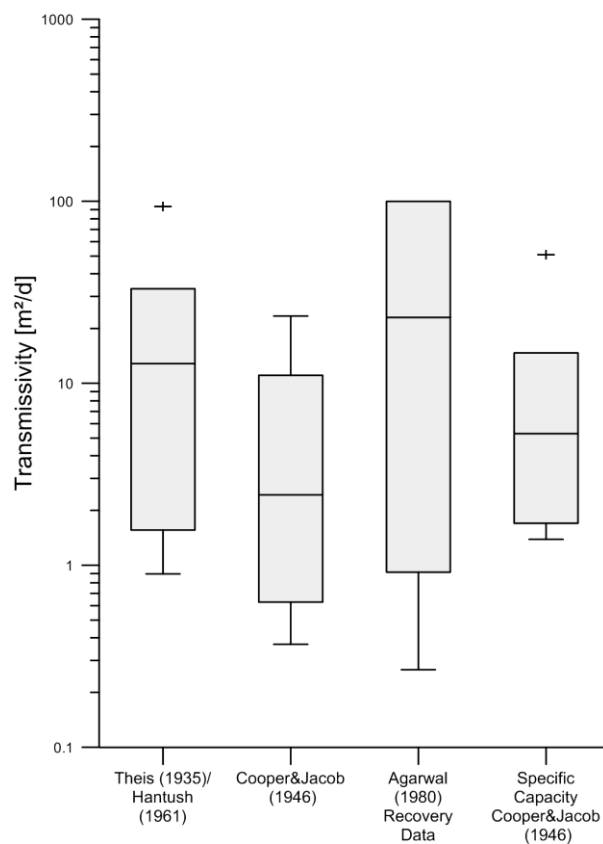


Figure 38 - Transmissivity calculated by different methods for Paranoá system (R_4 subsystem).

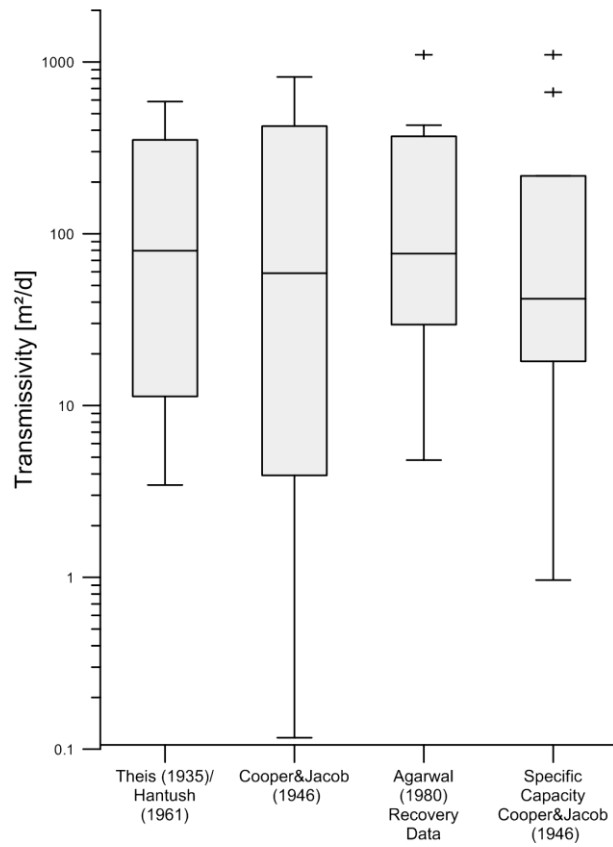


Figure 39 - Transmissivity calculated by different methods for PPC subsystem (Federal District region).

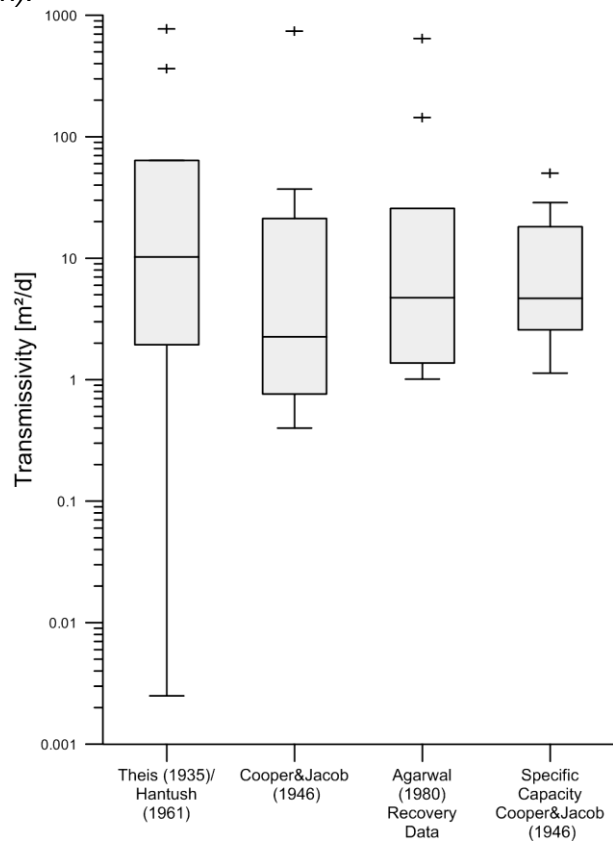


Figure 40 - Estimated transmissivity results from fractured aquifers of the Federal District region, acquired by different pumping test treatment methods (Bambuí system).

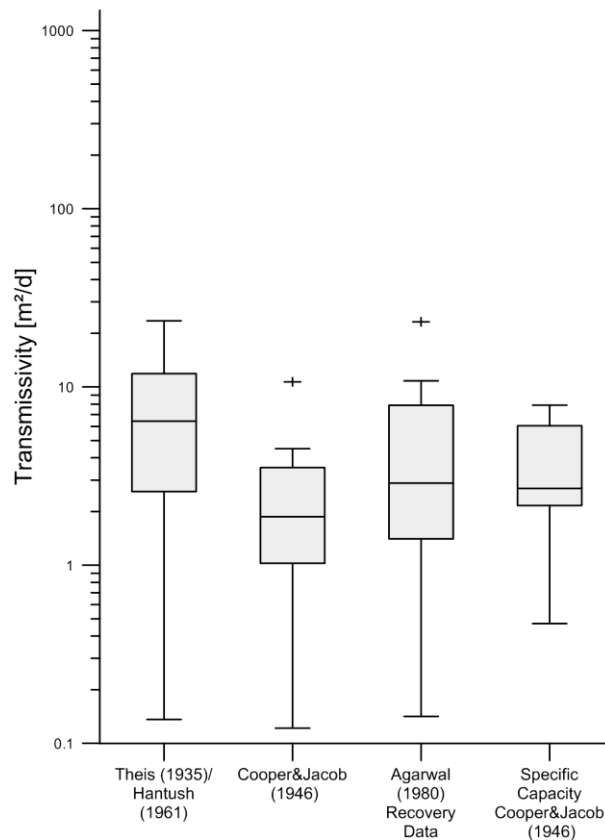


Figure 41 - Estimated transmissivity results from fractured aquifers of the Federal District region, acquired by different pumping test treatment methods (F subsystem, Canastra system).

Table 10 - Statistics of transmissivity data obtained by different methods for pumping test of wells constructed in fractured aquifers of the Federal District.

Aquifer Systems / Subsystems	Statistic, Values in (m²/d)	Theis (1935)	Cooper & Jacob (1946)	Agarwal (1980) Recovery Data	Specific Capacity Cooper & Jacob (1946)	Mean Value for the four evaluation methods in (m²/day)
PPC	Mean	164	203	232	199	200
	Median	80	59	76	42	64
R4	Mean	24	6	36	11	19
	Median	13	2	23	5	11
R3/Q3	Mean	32	19	24	29	26
	Median	20	11	9	12	13
A	Mean	36	16	14	10	19
	Median	15	9	-	7	11
S/A	Mean	71	49	2	37	40
	Median	23	10	-	7	13
Bambui	Mean	116	75	78	13	71
	Median	10	2	5	5	5
F	Mean	8	3	6	4	5
	Median	6	2	3	3	3
F/Q/M	One Value	584	-	-	375	479

In all cases, there was a good correlation among the results. This indicates that the discharge rate is one of the parameters with higher control on the estimation of transmissivity. It

also shows that it is possible to apply the calculations in a single pumping well, even when there is no observation well in the surroundings. If this issue were more important more variability would be expected in the results. The Cooper & Jacob solution tended to underestimate the majority of the results. This solution is more sensible to the assumptions that are not contemplated in each pumping site (e.g., aquifers are unconfined, heterogeneous and do not have infinite lateral extent). On the other hand, Theis (1935) solution tended to overestimate most of the results. In general, Cooper & Jacob (1946) calculated with specific capacity showed the best results.

5.4.2 - Results of the Hydrodynamics Parameters

The results presented in Table 11 are important for mathematical modeling of the aquifers and for their management.

Table 11 - Main hydrodynamic parameters for the fractured aquifers in the Federal District (discharge rate after Campos 2004).

<i>Aquifer Systems / Subsystems</i>	<i>T - Transmissivity estimated by Specific Capacity data (m²/day)</i>	<i>K - Average hydraulic conductivity (m/s)</i>	<i>Sc - Average Specific Capacity (m³/h/m)</i>	<i>Q - Average discharge rate (m³/h)</i>
PPC	199	1.7061E-05	6.80	9.0
R ₄	11	1.2125E-06	0.36	6.0
R ₃ /Q ₃	29	1.918E-06	1.0	12.0
A	10	1.4468E-06	0.33	4.0
S/A	37	3.2942E-06	1.27	12.5
BambuÍ	13	1.2037E-06	0.43	6.5
F	4	3.0864E-07	0.13	7.5
F/Q/M	375	2.4802E-05	12.81	33

The high transmissivity of the PPC aquifer indicate that the cone of depression induced by pumping is wide and flat. However, these aquifers are the most heterogeneous and anisotropic observed in the region and the flow rates of wells drilled is very variable, ranging from zero to values above 18 m³/h.

The F/Q/M subsystem also has high transmissivity values but only one transmissivity value could be calculated. Hence a good statistic analyse is not available. On the other hand, this system has a special importance in FD: It is responsible for the exclusive supply of satellite suburbs like the City of São Sebastião, with about 100,000 inhabitants.

The R3/Q3 and S/A subsystems have transmissivity values intermediate, high specific capacity, high discharge rates and high hydraulic conductivity. Specific capacity values are generally highest in areas especially thick and transmissive and if the discharge rate is high, the

cone of depression will be wider and deeper. In terms of productivity, these aquifers are very important for the FD because they are located in important recharge areas, over the main fault systems (N45W and N40 to 60E lineaments).

Transmissivity and specific capacity values are lowest in the subsystems R₄, A and Bambuí system, indicating less permeable aquifers in these areas. The worst underground reservoir of DF, in terms of productivity, is the F subsystem, as expected considering the type of rock (phyllite rich in chlorite, quartz and fengite).

The results of the hydrodynamics parameters by application of Cooper & Jacob (1946) method, calculated with specific capacity, showed the best results. This method may be used for the evaluation of the pumping tests in similar metasedimentary fractured rocks, in tropical regions where detailed long-term pumping test data is not available.

5.5 - Conclusions and Recommendation

The evaluation of the pumping tests showed a necessity to obtain good overview of the structural setting at borehole sites. Wells tapping a fracture can be highly above the average value that is estimated by the test evaluation typical for that specific aquifer. It means that the majority of the analyzed wells are not located in most productive zones. Wells with very low transmissivity values are seemingly not tapping sufficiently fractured parts of the aquifers. On the other hand, wells located over the main fault systems in the FD (N45W and N40 to 60E lineaments) showed higher hydraulic conductivity and transmissivity values.

Estimation of transmissivity by specific capacity data (Cooper & Jacob, 1946) seems to present best results since it does not take into account the major assumptions like confining, partial penetration conditions, lateral extent of the aquifer and some other influence from surroundings. Additionally, it is important to notice that analyzing statistical results of transmissivity through the mode is more feasible than through the mean or median, since these aquifers are strongly heterogeneous. In this study, it was not possible to take the heterogeneity of the aquifers into account due to the fact that mostly single well test data was available and therefor only the nearest surrounding of the well could be analyzed. In order to improve the accuracy of parameters it is necessary to have a greater amount of pump test data available with one or more observation boreholes and a detailed overview of the structural setting of the aquifers.

Since the methods to estimate of transmissivity, hydraulic conductivity and storage coefficient based on pumping test data are scarce or not applicable, those that considers the specific capacity data, such as (Cooper & Jacob, 1946), can be useful for the development of conceptual and numerical modeling and analysis of the hydrodynamics processes in order improving groundwater management practices elsewhere effected by similar geological and hydrogeological conditions.

Capítulo 6: Groundwater Model of the Pípiripau Watershed, Federal District of Brazil

Tatiana Diniz Gonçalves^a, Agnes Gräbe^b, Thomas Fisher^b, Olaf Kolditz^b, Holger Weiss^b

^a Institute of Geosciences, University of Brasília, Brazil

^b Helmholtz Centre for Environmental Research – UFZ, Germany

ABSTRACT

In order to understand the groundwater dynamics and to improve the management of water resources in the Federal District of Brazil, this research proposes a 3D groundwater model to represent the groundwater level and flow system. The selected test site was the Pípiripau watershed. The development of the model was based on available geological, hydrogeological, geomorphological, climatological and pedological data. Geological and hydrogeological data were used to generate the 3D groundwater flow model. The 3D mesh elements of the domain was generated into Groundwater Modeling System (GMS) software, based on the logs of the wells materials, and the simulation of the finite element method was implemented in the framework of the scientific software OpenGeoSys (OGS). With the 3D mesh appropriated boundary conditions, annual average infiltration data and hydrogeological parameters were incorporated. Afterwards, the steady state model was calibrated using available data of the water level from wells into PEST software. The results showed the distribution of the steady-state hydraulic head in the model domain, where the highest values occurred in the east and west recharge areas and the lowest values were found in the southwest of the basin. The results of this first study can be a used as initial condition for the transient simulation and to provide a scientific basis for water resource management.

Keywords: groundwater, modeling, water resource management

6.1 - Introduction

Pípiripau watershed is one of the most critical watersheds of the Federal District of Brazil (FD) in terms of balance between demand and availability of water resources, mainly because of the fast increase of population that has been occurred in the last 20 years. The annual average population growth in this basin is about 20%, reaching 13.538 inhabitants in 2010 (IBGE, 2011). Land use in the study area is intensive, especially in terms of small-scale family agriculture. Land cover is marked by intense removal of natural native vegetation, environment unfriendly land use, and degradation of water resources (EMATER, 2010).

Several studies (CAESB, 2001; ANA, 2004; Albuquerque, 2009; ANA, 2010 and Camelo, 2011) revealed environmental problems in the Pipiripau watershed. For instance, climatological and morphological characteristics of the study area restrict the use of water resources for economic development and human consumption. EMATER (2010) pointed out that current water demand is environmentally unsustainable because of the growing population and excessive use of pesticides and irrigation practices. In order to reduce conflicts regarding water use in the watershed, the FD government created a system of catchment of water in 2008 to avoid overuse of water during the dry season (June-September). Several people (farmers and condominiums) have already started to depend on groundwater supply. About 60 wells are pumping groundwater at daily-basis.

Sustainable management of water resources requires understanding of hydrogeological characteristics and knowledge of what types of influences human activities mostly affect the watershed. Field survey is the main source of data for such management, however, it is time consuming and costly. The use of mathematical models is an alternative to minimize the problem of lack of field data in hydrogeological studies. Several algorithms have been proposed since seventies. Recent advances in computer capacity and numerical techniques have contributed to the development of sophisticated tools such as the Soil Water Assessment Tool (SWAT) (Arnold et al., 1994), the MODFLOW2000 (Harbaugh et al., 2000), the HydroGeoSphere Sudicky (HGS) (Therrien et al., 2007), the Finite Element subsurface FLOW system (FEFLOW) (Trefry and Muffels, 2007), the Groundwater Modeling System (GMS) (Owen et al., 1996) and the OpenGeoSys (OGS) project (Delfs et al. 2009, Kolditz et al., 2012).

In this study, a numerical model of groundwater flow was developed using open-source scientific software OGS. The OGS uses object-oriented modelling (C++ language) processes to simulate thermo-hydro-mechanical-chemical data in porous and fractured media based on multidimensional finite element method. OGS has been applied in several hydrological case studies particularly in semi-arid area such as Saudi Arabia (Kalbacher et al. 2012), the Middle East (Toll et al. (2009), Wu et al. (2011), Gräbe et al. (2012) and China (Sun et al. 2011) using high-resolution, finite element models for groundwater simulation.

In this work, automatic calibration procedure of inverse modelling by using nonlinear Pest code was applied to obtain model accuracy. The Pest code was integrated in OGS based on the observation parameters adjusted for different observation groups in a PEST control file according to user-defined formulae. To calibrate the model, its parameters must be adjusted so that its outputs match field measurements as closely as possible (Doherty, 2010). The adopted methodology was described by Sun et al. (2011). Modelling tools are recommended to support actions and decisions to improve water management. Nevertheless, until now, hydrogeological models for the Pipiripau watershed do not exist. The objective of this study was to represent the media and the main hydrodynamic parameters of the Pipiripau watershed.

6.2 - Study Site and Hydrogeological Setting

Pipiripau watershed is located in the Brazilian Central Plateau, in the region of Pipiripau structural dome dominated by gentle relief (83% of the basin) and slope gradient of 0-8% (Faria, 1995; Campos and Freitas-Silva, 1998). The highest elevation (1,206 m) is located in the north-western border of the area, while the lowest point is in south-western border (elevation of 930 m). It covers an area of approximately 235 km², mostly located in the FD (90% of the territory) though its main spring is located in Goiás State (Figure 42). The study area is centred at 15°27'14" (south latitude) and 47°27'47" (west longitude) and covers an area of ~ 14 km x 24 km.

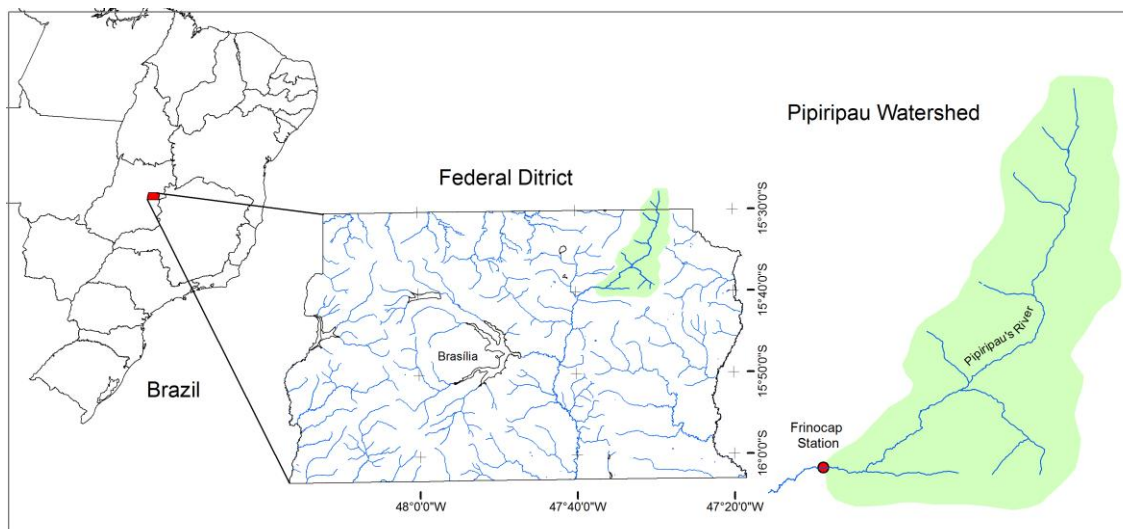


Figure 42 - Location of the Pipiripau watershed in the Federal District of Brazil.

6.2.1 - Climate

Climate, according to the Köppen classification, is tropical (Aw) and tropical altitude (Cwa and Cwb). This means presence of strong seasonality, hot rainy season (about 80% of annual rainfall, between October and April) and cool and dry season from May to September.

Average annual precipitation is around 1.600 mm and average temperature is around 17 °C in the coldest months and 22 °C in the hottest periods of the year. The average insolation is 200h/month in winter and around 130h/month in summer. The relative air humidity reaches minimum values of 11% in the dry season and 75% in the rainy season.

The climatic water balance based on the water balance methodology of Thornthwaite and Mather (1955), shows the deficit and excess water during the 2009 year in the region of Pipiripau (Figure 43). According to Coimbra (1987), evapotranspiration varies around 900 mm during the year and 12% of total precipitation infiltrates until reach the saturated zone of aquifers. This saturated zone is responsible for water supply for the population and for

maintaining rivers perennial during the dry months. Unsaturated zone performs basic control functions of recharging conditions.

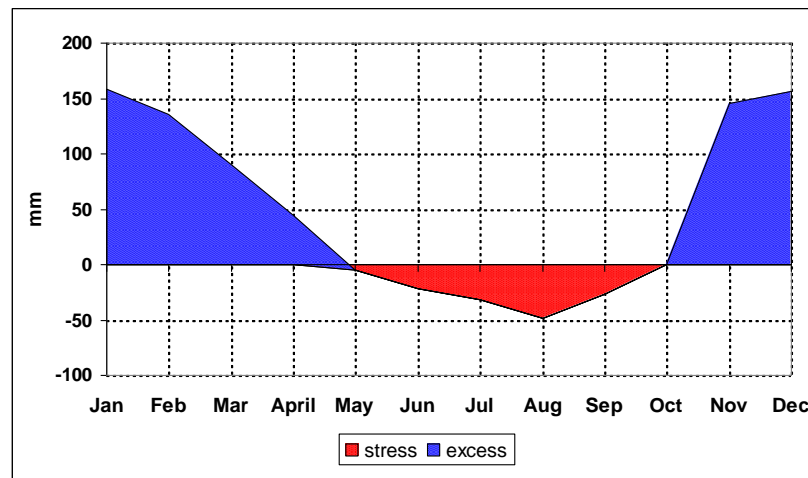


Figure 43 - Climatic Water Balance for Thornthwaite & Mather (1955) in Pipiripau's region. Source: INMET - National Institute of Meteorology (2009).

6.2.2 - Aquifer system

The study area corresponds to the Brazilian hydrogeological province known as Central Shield. This province controls the occurrence of geological units and the distribution of fractured aquifers covered by weathering mantles. According to the hydraulic characteristics of geological units and weathering mantles, Campos and Freitas-Silva (1998) classified the systems of groundwater reservoirs of the FD in two domains: porous (Upper Aquifers) and fractured (Lower Aquifers) (Figure 44).

The porous domain represents shallow water reservoir and is characterized by unconsolidated geological media with saturated thicknesses ranging from few centimetres to 80 meters, with a large predominance of thicknesses between 15 meters and 25 meters (> 60%). These systems were, according to Campos and Freitas-Silva (1998), considered as homogeneous and isotropic, free and/or suspended and with great extent and lateral continuity. Contrary to the Campos and Freitas-Silva (1998) studies, results recorded by Gonçalves (submitted) showed that porous aquifers systems of FD, in fact, are not homogeneous and isotropic. This characteristic is evidenced by variations in the hydraulic conductivity (K) rate within a single class of soil, which may vary regardless of parent material. The heterogeneity of porous aquifers is conditioned by texture, structure and macroporosity of the soils and the anisotropic behaviour can influence substantially the behaviour of porous aquifers. On the other hand, variations in vertical flow of water during the recharge can induce variable rate of inward flow, depending on structural elements of parent material (faults and fissures) and geomorphological characteristics of the site.

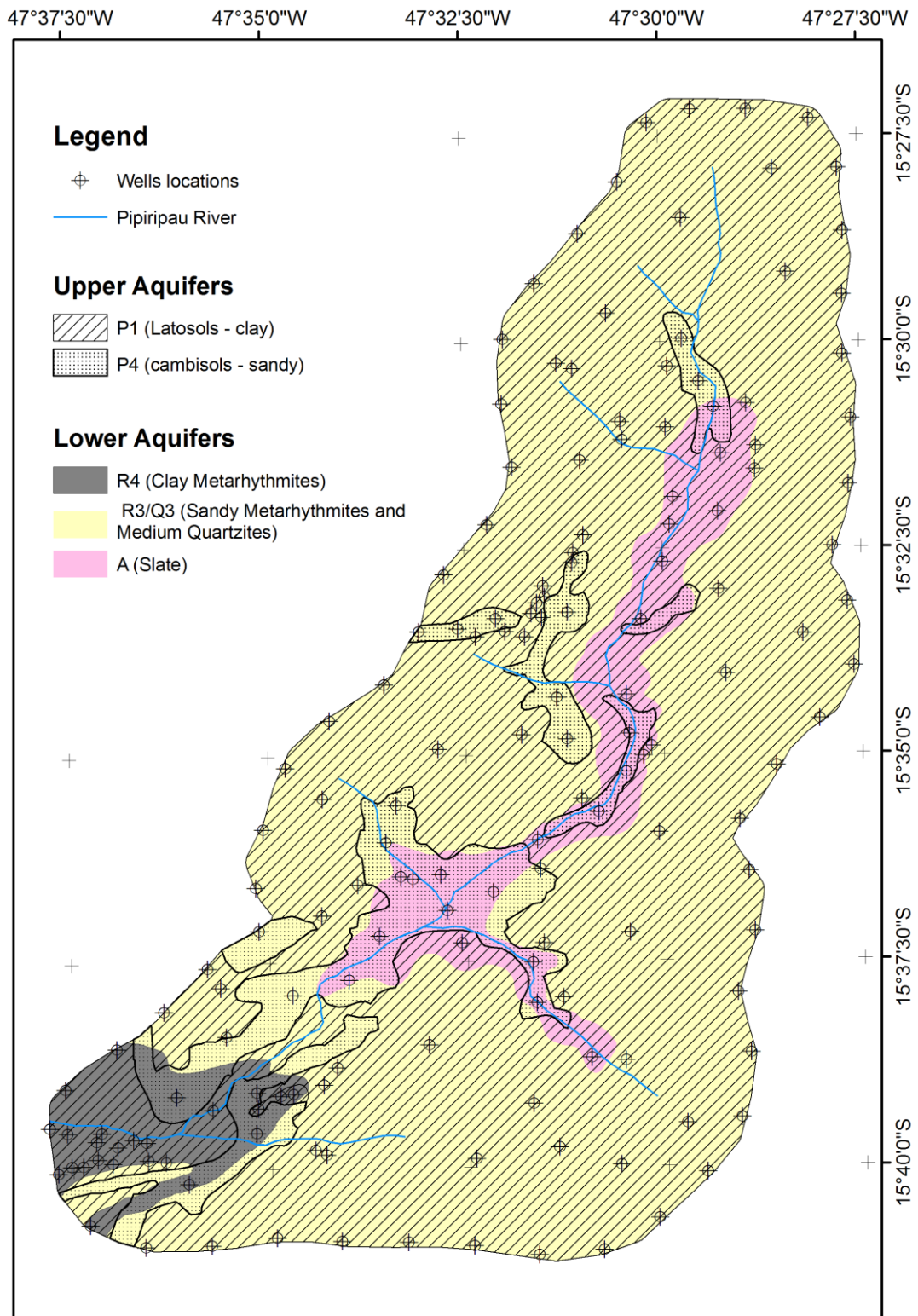


Figure 44 - Hydrogeological map (1:100,000 scale) and location of wells in the study area. Source: adapted from Campos and Freitas-Silva (1998).

Porous aquifers are essentially represented by soils and saproliths or regoliths, covering bedrocks. According to Embrapa (1978), 85% of FD areas are covered by Reddish Oxisols, Reddish-Yellow Oxisols and Inceptisols. Remaining 15% are covered by Alfisols, Entisols, Histosols and Mollisols.

Based on the parameters of saturated thickness (b) and hydraulic conductivity (K) of the mentioned soils, Campos and Freitas-Silva (1998) proposed four systems defined as P1, P2, P3 and P4 to represent the porous domain in the FD. P1 and P4 are the major systems found in the Pipiripau watershed. P1 system is found in Oxisols, basically with thickness > 20 m and hydraulic conductivity $> 10^{-6}$ m/s while P4 system is found in Inceptols, with thickness varying from < 1 m to 2.5 m and hydraulic conductivity $< 10^{-9}$ m/s. Lack of saturation zone on P4 system (saprolith zone) is common in P4 system, particularly when parent material is clayey. Average production of these aquifers ($P1 \leq 0.8$ m³/h and $P4 \leq 0.3$ m³/h) is controlled by regional or local flow and trend of slope and the contact of these aquifers with some springs. Springs are oriented by regional flows and have higher flow rates (> 2.0 litter/second) than those from local flows subject to wide seasonal variations (Campos and Freitas-Silva, 1998).

The fracture based aquifers of FD are classified in four systems: Paranoá (S/A, A, R3/Q3 and R4 subsystems); Canasta (F subsystem), Araxá and Bambuí. These systems were classified by Campos and Freitas-Silva (1998) based on geological knowledge, statistical analysis of data flows, and on structural features. Lithologies from Paranoá and Canasta Groups (Meso/Neoproterozoic age) and Araxá and Bambuí Groups (Neoproterozoic age) are quite fractured in the FD region. Intergranular pores were disconnected during lithification and metamorphism processes and possible existing aquifers are related to fractured aquifers, where water storages occur mainly along fractures.

In the study site, fractured aquifers are represented by metasedimentary rocks of Paranoá Group (Figure 45) with the following subsystems: A (slates), R3/Q3 (sandy metarhythmite and medium quartzite), and R4 (clay metarhythmite). Since they are restricted to areas ranging from few meters to hundreds of meters, they are free or confined aquifers with variable lateral extent, strongly anisotropic and heterogeneous. With rare exceptions, they are limited to depths higher than 250 meters, with a tendency to closure plans of fractures with depth, due to increased pressure (Campos and Tröger, 2000). Deep wells pumped at the study site present hydrodynamic conditions varying widely, depending on rock type. The Figure 5 shows the distribution of rocks type in the study area. K -values of this medium are controlled mainly by the density of discontinuities in the rocky layer. Yields of wells range from zero to > 100 m³/h. Yields from majority of wells ranges from 5 to 12 m³/h (Campos, 2011). The incidence of dry wells is controlled by the particle size distribution. Dry spells incidence is low when the concentration of quartzite is high, and is high when the concentration of clayey material (slates and metasilstones) is also high.

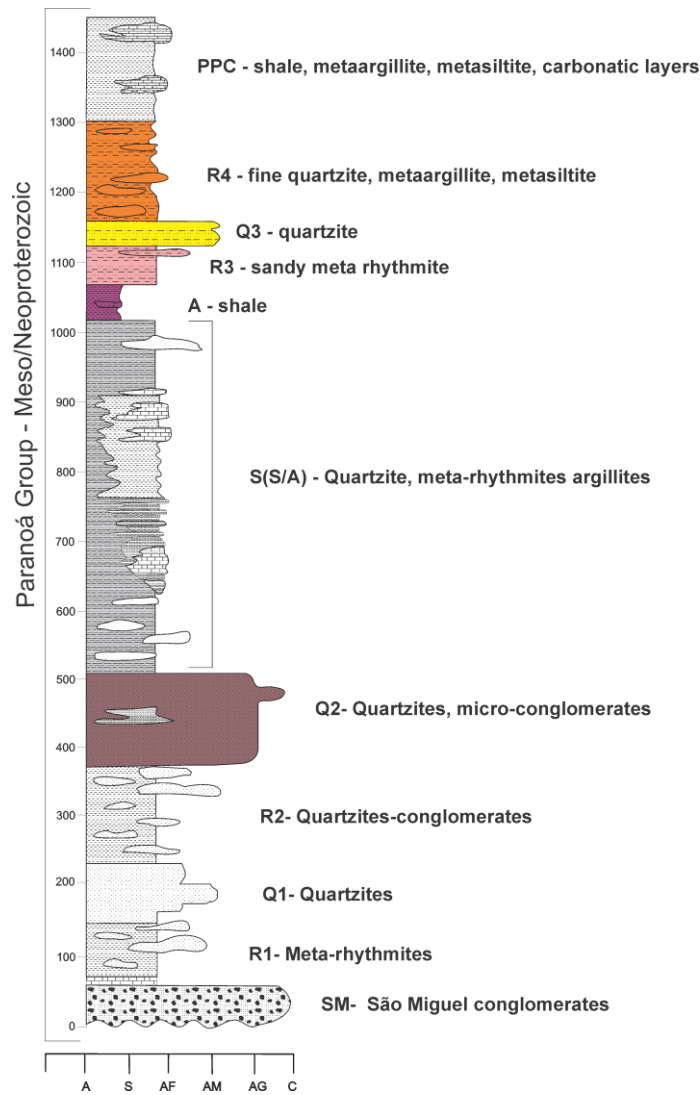


Figure 45 - Stratigraphy of Paranoá Group. Highlighted colors are the present rocks in study area. A - clay, S - silt, AF - fine sand, AM - medium sand, AG coarse sand and C - gravel. Source: Faria, 1995.

6.2.3 - Input data of the model

Groundwater data from Pipiripau region, available from the local water companies (ADASA and CAESB) were used as input data for numerical simulation. Data from 67 borehole logs, including well coordinates, depth, materials, aquifers system, water table and water consumption were considered. In order to enhance the accuracy of the geometric data, 13 and 53 artificial boreholes were created inside and surroundings of the study area, respectively, with at least 500 meters buffer outside of the basin. Boreholes data such as their thickness and type of aquifers were based on the description reported by Campos and Freitas-Silva (1998).

The structure of the model was implemented based on simplification of the stratigraphy of the study area. The structure was designed into seven layers from the bottom to top, following the strata deposition order. The surface of terrain was obtained from digital elevation models after SRTM - Shuttle Radar Topography Missio (Farr & Kobrick, 2000), resampled to 30 meters (Valeriano, 2004), and fixed as the top layer of the model. The slices of the contacts

between different layers were defined based on the stratigraphy characteristics found in borehole logs. Among 67 borehole logs pumping groundwater, 30 wells were located in the P1 and R3/Q3 systems, 14 wells in the P4 and R4 systems, and 23 wells in the P1 or P4 and A systems (see Figure 46). According of these logs, the most important local aquifers are those located in the highlands, represented by upper P1 aquifers and lower R3/Q3 aquifers. These wells are 130 m deep in average, with a production rate of $\sim 37 \text{ m}^3/\text{h}$. The main sources of the groundwater recharge in the study site were the precipitation (Figure 5). Despite being a dominantly agricultural region, the total irrigated area does not reach 2% ($\sim 1,43\%$) in the basin of Pipiripau (ANA, 2010).

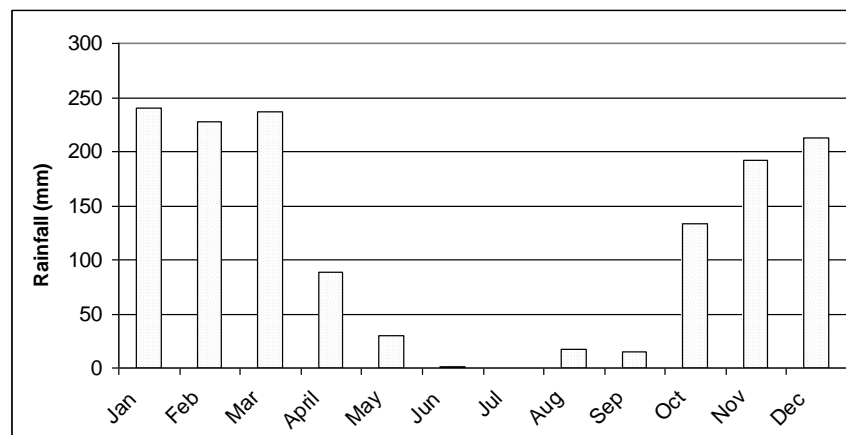


Figure 46 - Average monthly precipitation in the study area (2004 – 2007 time period). Source: INMET - National Institute of Meteorology (2009).

The estimation and assignment of net recharge rates were based on data published by Coimbra (1987) and Carmelo (2002). Coimbra suggested that about 12% of annual precipitation infiltrate until reach the saturated zone of aquifers. Carmelo used information of both local climatic water budget and yield of the Mestre D'Armas stream (tributary of Pipiripau), and estimated that 33.5% of annual precipitation infiltrate in the study area. The water discharge in the study area is mainly through outflow south-west border in the Frinocap station. The anticlinal setting of the study area guides the groundwater towards the SW direction. During the dry season (July-September), the yield at the Frinocap station results from the base flow of the upper aquifers. Figure 47 shows the average monthly discharge for the Frinocap station. The stream hydrograph analysis showed the presence of three main components: runoff, interflow and base flow. In the study area, the average values for the period from July ($1.95 \text{ m}^3/\text{s}$) to September ($1.19 \text{ m}^3/\text{s}$) represent the base flow of the shallow aquifers.

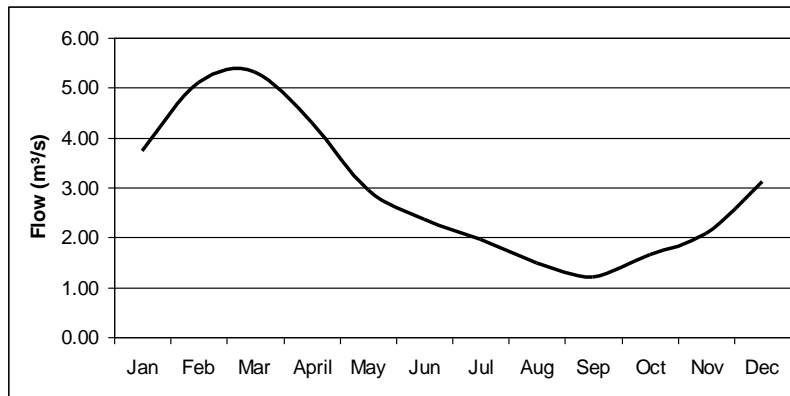


Figure 47 - Stream hydrograph of the Pipiripau watershed at the Frinocap station (2004 – 2007 time period).

6.3 - Model Development and Implementation

In order to develop a numerical model of groundwater flow in the study area, this study used the open source scientific software OpenGeoSys (OGS) (Kolditz et al., 2012). The OGS uses object-oriented modelling (C++ language) processes to simulate thermo-hydro-mechanical-chemical flow in porous and fractured media based on multidimensional finite element method. Such software has been successfully used to model various complex problems of groundwater flow. Kalbacher et al. (2007) demonstrated a 3D finite element model of a network of fractures for heterogeneous flow and tracer transport by using information obtained from the excavation project at Nagra's Grimsel test site (Switzerland). Toll et al. (2008) integrated several geological and geophysical data from the Jordan Valley and proposed a numerical model of flow of groundwater. Wu et al. (2011) developed a 3D model to represent the groundwater flow system and the level of groundwater in the area of Wadi Kafrein (Jordan). Sun et al. (2011) organized and integrated data from Nankou region (China) and proposed a model of groundwater flow which was used for nitrate remediation studies.

Due to the complexity of the natural phenomena (i.e., infiltration, recharge and water flow) that are part of the water budget, conceptual models based on empirical observations are suggested to describe the present conditions of a real groundwater flow system.

6.3.1 - Conceptual Flow Model

In the FD, Campos and Freitas-Silva (1998) and Lousada and Campos (2005) combined geological and hydrogeological information based on in situ observations (i.e. pumping tests and tracer) and proposed four conceptual models to the region: Fissuro-karstic model, model with two potentiometric surfaces, model with one potentiometric surface with confinement and model with one potentiometric surface without confinement. In the study area, two proposed models were identified: the model with two potentiometric surfaces and the model with one potentiometric surface with confinement. The first model represents areas of high plateaus with

the presence of porous aquifers in well-developed soils (Oxisols) and thick regoliths (up to 50 meters) overlapping aquifers of the fractured domain, characterized by intensely fractured rocks with a high degree of interconnections between the fractures (Figure 48). This model has a potentiometric surface into porous aquifer and another into fractured aquifer. The vertical flow of water which migrates from the porous domain to saturated zone of the unsaturated fractures is conditioned by the presence of hydraulic barrier at the interface of the two systems. The hydraulic head on the upper aquifer is insufficient to break the hydraulic barrier that set an unsaturated zone between the basis of the porous saturated zone and the top of the saturated fractures zone. Fractures may remain dry or partially saturated for depths ranging from 50 to 75 meters. From this depth, fractures are permanently saturated by water (Lousada and Campos, 2005).

The second model also considers that porous aquifers overlap fractured systems (Figure 49). This model applies to local, strongly undulated relief, where the upper aquifer, represented by shallow soils (Incept sols) and relatively thick saprolites (up to 20 meters) occurs in the saturation zone, acting as a confining layer of the aquitard type. The lower aquifer, from pelitic formation, has behaviour pattern of laminar flow in planar secondary porosity where the stored waters have varying degrees of confinement. The recharge of the fractured aquifers occurs by drip from the aquitard and also by the lateral flow of water infiltrated in elevated flat areas that are distributed in the vicinity (Lousada and Campos, 2005).

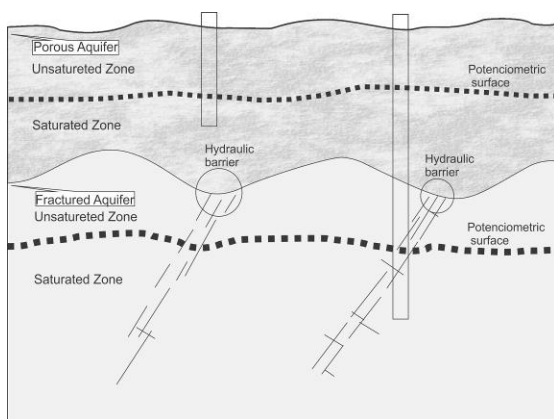


Figure 48 - Model with two potentiometric surfaces (Lousada and Campos, 2005).

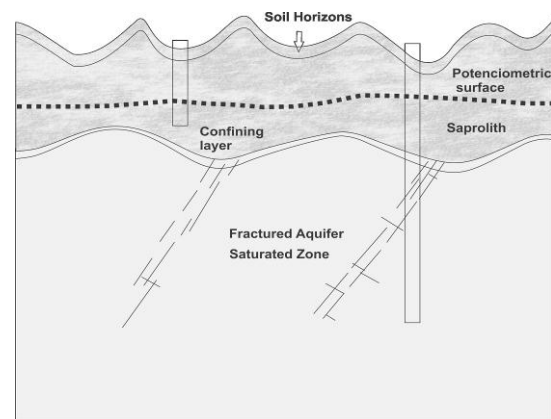


Figure 49 - Model with one potentiometric surface with confinement (Lousada and Campos, 2005).

Pipiripau watershed is bounded on the northeast and southwest by faults from Paranã, which put tectonically the Paranoá Group on the Bambuí Group. On the west and northwest, the watershed substrate is represented by units of the Paranoá Group in the upper layers as shown in Figure 50. The flow scheme of groundwater is structurally determined by the interference pattern of folds related to Brasiliano tectonics (650 million years), resulting in the formation of the Pipiripau structural dome that locally represent a recumbent anticline (Figure 51). Regional

flow direction in the study area is from NW to SW, and fractures plans control the flows from west to east and from east to west, on the left and right margins of the stream, respectively. Recharge areas in the basin occur preferentially in flat to gentle undulating areas in NW and SE of the study area.

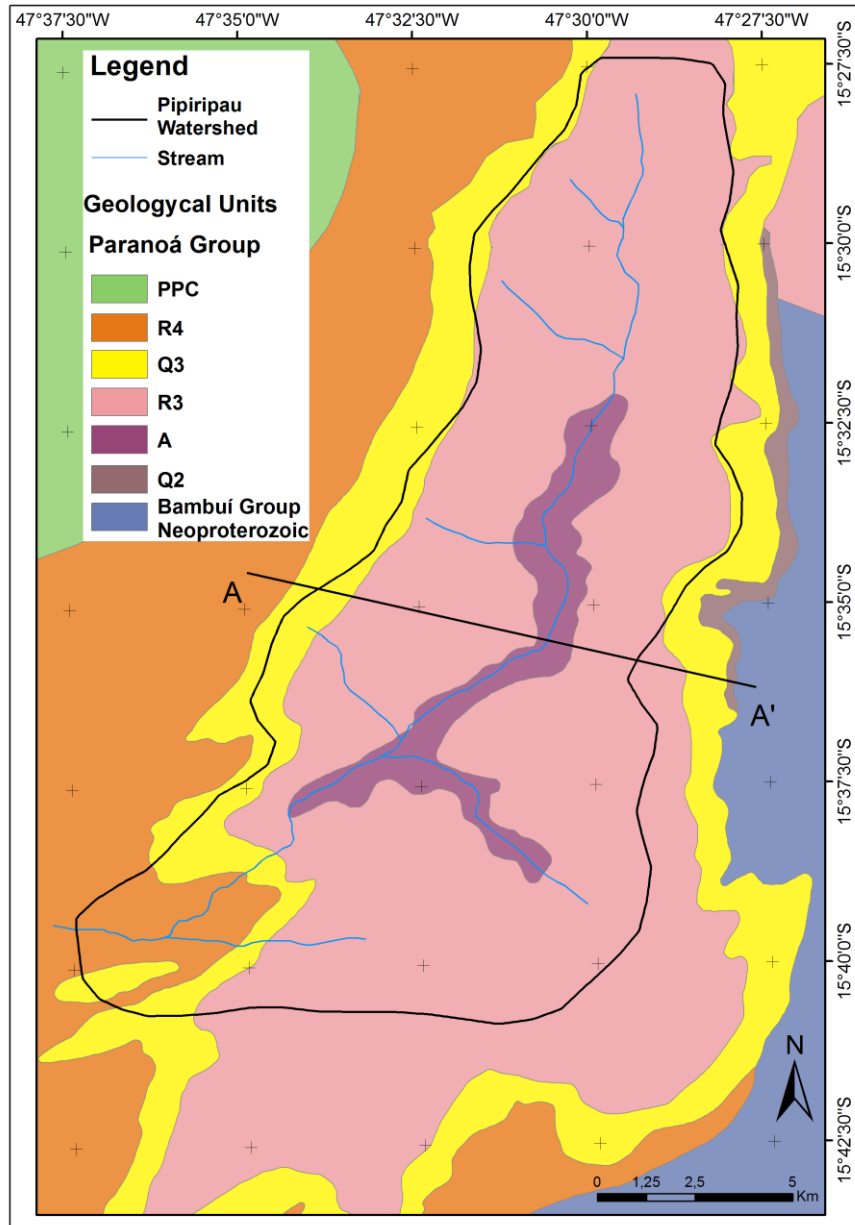


Figure 50 - Geological Map of the Pipiripau region. Modified from Campos and Freitas-Silva (1998).

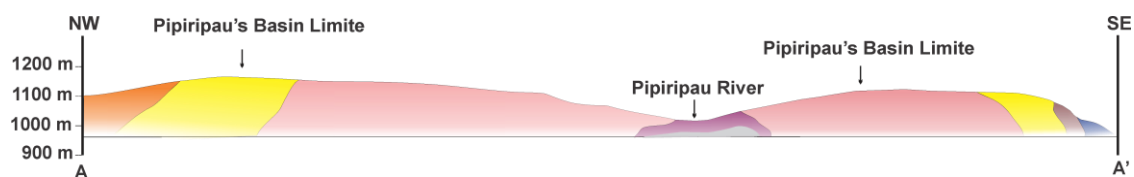


Figure 51 - Geological profile of the Pipiripau area.

6.3.2 - Governing Equations

Hydrological processes in the surface and subsurface as well as their interactions can be described by partial differential equations (PDEs) (Freeze and Cherry, 1979). In general, PDEs can not be solved analytically. For this reason OGS implements a numerical method – the finite element method - by means of applicable governing flow equation describing the hydraulic head at each of the boundaries of the aquifer and equations describing the initial conditions of head in the aquifer (Fetter, 1998).

The governing equation of the groundwater flow is based on the water mass balance and Darcy's law:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

where h is the hydraulic head; k_x , k_y and k_z are the hydraulic conductivity in ∂x , ∂y and ∂z directions, respectively; q_s is the source/sink term that represents the groundwater recharge/discharge and S_s is the specific storage capacity.

Eq. (1) describes the 3D transient flow in a saturated, anisotropic medium. In this study, Eq. (1), with the boundary conditions, the initial conditions, and the spatial distribution of the hydrogeological parameters that control of the flow, constituted the numerical model of the groundwater flow implemented in OGS.

6.3.3 - Spatial and Temporal Discretization

In order to implement of numerical simulation model, spatial description of the problem domain must be developed through 3D structural model. The construction of the 3D model for the Pipiripau watershed started with organization of the important geological features, such as channels, folds, thickness variations in different geological strata in addition to the borehole logs. This geological data were pre-processing in a Geographic Information System (GIS) and later, the appropriate files were imported into Groundwater Modeling System - GMS (Geuzaine and Remacle, 2009).

GMS has a good interface with OGS, as noticed by Sun et al. (2011), and a series of powerful modules provides different interpolation methods to deal with the stratigraphic scattered points based on the borehole logs. The GMS was firstly executing with scattered points to generate the 2D mesh file. The 2D mesh is used to define the topology and boundary of the 3D mesh. Then each interface between different materials on a borehole log was created a layered mesh. Finally, the information of the DEM (Digital Model Elevation) was applied at each layer to generate the 3D mesh with accuracy of the heterogeneity of the medium. The 3D mesh, created with GMS, can be exported into an ASCII file, which can be imported into OGS (Rink et al. 2012). The 3D mesh file generated to the Pipiripau watershed, containing 28.205

nodes geometry and 48.844 elements (prism and tetrahedron) topology as well as six material groups connected with elements (Figure 52).

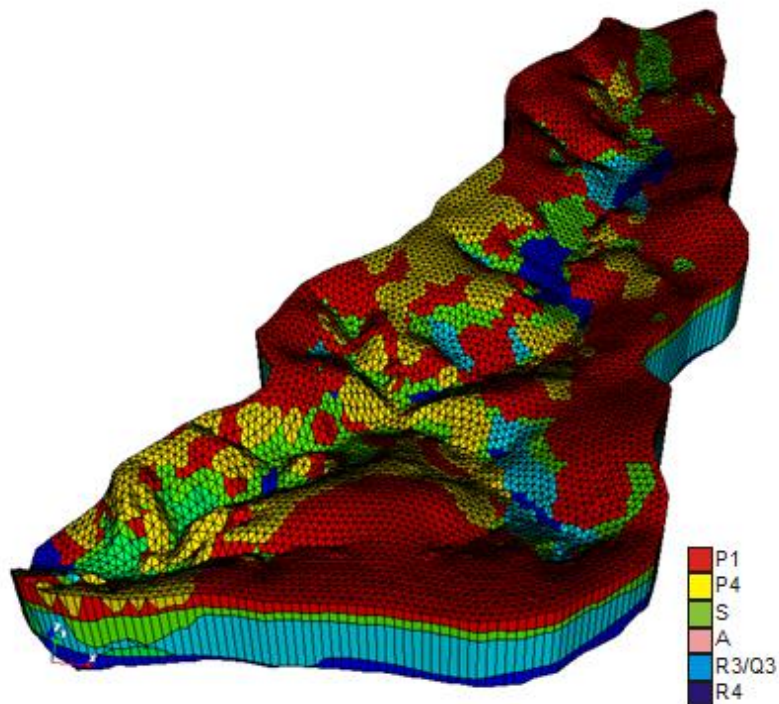


Figure 52 - 3D mesh file generated for the Pípiripau watershed into GMS and displayed on OGS, showing the different materials.

The simulation of the groundwater flow in the Pípiripau watershed was developed for 2004-2007 time period. Groundwater flow model in 2004 was first calibrated to steady-state conditions using the measured water level data from eleven observations wells, in order to understand the trend of groundwater level in whole domain.

The figure 53 show borehole logs, the DEM, the distribution of the measured water level used to the spatial and temporal discretization.

6.3.4 - Boundary Conditions

The boundary conditions are set according to previous studies (Coimbra, 1987; Campos and Freitas-Silva, 1998; Souza, 2001; Carmelo, 2002; Lousada and Campos, 2005; Almeida et al., 2006; Fiori et al., 2010; Gonçalves et al. (submitted-a) and Gonçalves et al. (submitted-b) within the FD and surrounding regions. The physical boundaries for whole domain were defined on the Pípiripau surface watershed limits. Although it is known that the physical boundaries of the hydrogeological basins do not necessarily overlap with watershed boundaries. In a smaller basin such as Pípiripau, the qualitative and quantitative variations associated with geographical differences provide small differences in the water dynamics.

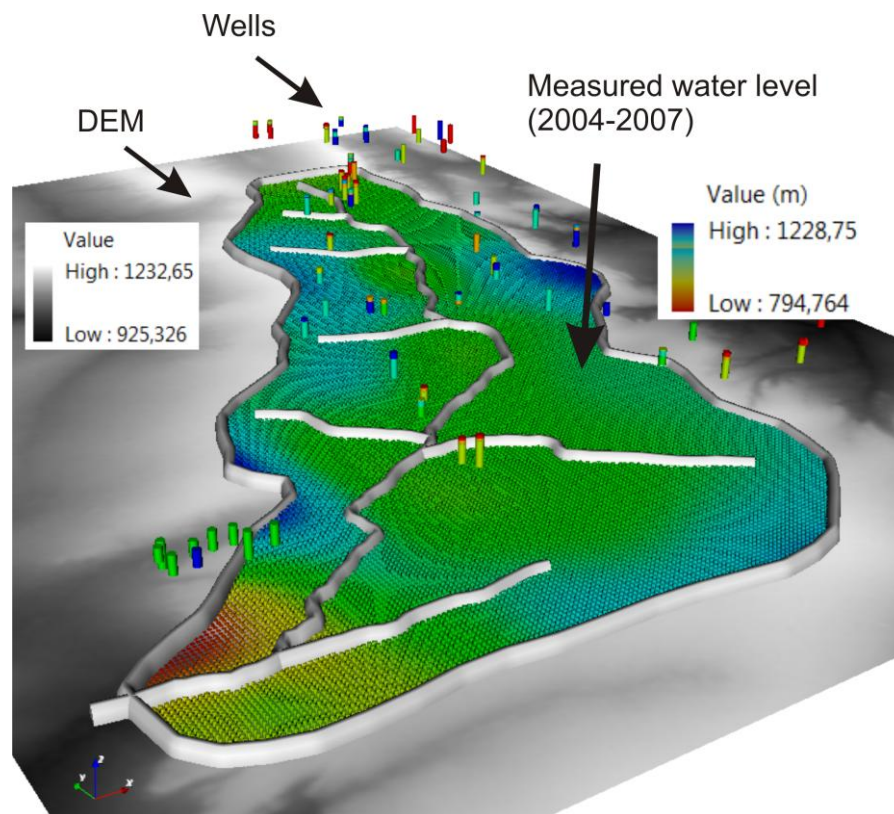


Figure 53 - Measured water level, DEM and wells of the study area

On the northwest and southwest edges, hydraulic boundaries were assigned with specific head conditions for the steady-state. The head conditions is affected by the interference pattern of Pípiripau structural dome and the initial values of the head fluxes were indicated according to the measured head values of the wells. In the southwestern edge, the regional groundwater flows out of the model domain and the head values of this boundary were acquired using the measured water level in the Frinocap station and surrounding monitoring wells. Along the northeast and southeast edges, due to fracture plans that control the regional flows, these boundaries conditions were treated as no-flow. Variable hydraulic heads were assigned to all vertical nodes of the southwestern boundary. For all surface stream the boundary conditions was assumed as a drainage system without considering the stream influence on the model.

On top of the model boundary, the water recharge from infiltration and discharge process is modelled and assigned as source/sink terms in OGS. Precipitation data were defined to the time interval of water level (2004-2007), and monthly rainfall distributions were obtained by interpolating daily results by Kriging interpolation method. In the study area was assumed that recharge rate represents 12% of the annual precipitation according to Coimbra (1987). Recharging provided by return flow from irrigation was not considered in this model because of lack of data.

The bottom geologic layer is formed by metasedimentary rocks or low-permeability sedimentary rocks. Anisotropic and heterogeneous aquifer, such in Pípiripau region, has a boundary condition and effort was made to develop a reasonable representation (Figure 54).

The water recharge occurs by downward flow of porous domain and is conditioned by the presence of hydraulic barrier at the interface of both systems. Furthermore, the recharge occurs by the lateral flow of water infiltrated in elevated flat areas. In sites where there are confining layers, the volume of water flowing through the confined aquifer is lower than those where the aquifer cropped out in the recharge areas (Figure 55). The bottom boundary of whole domain was assumed to have no water fluxes.

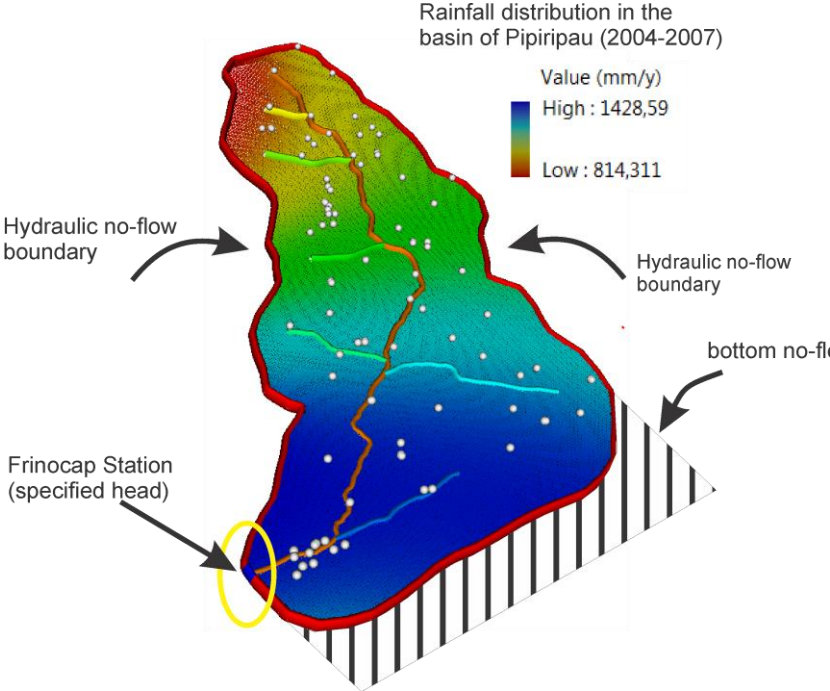


Figure 54 - Main boundary conditions of the study area.

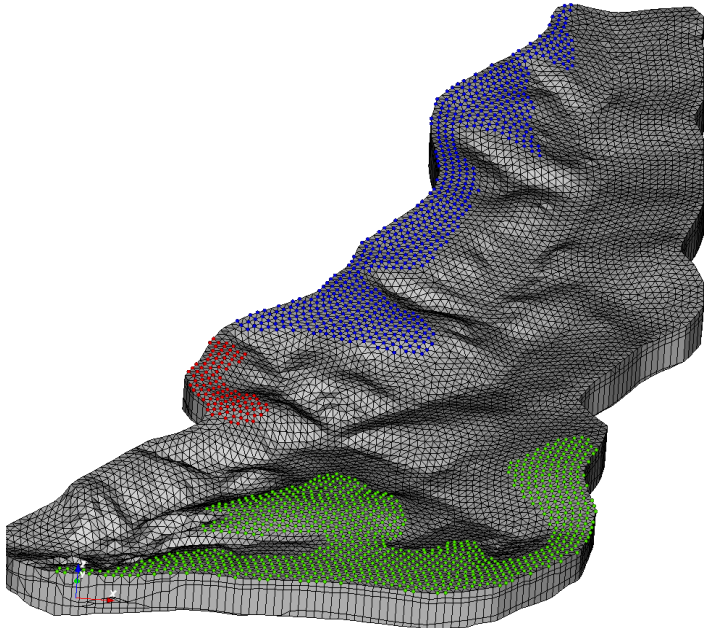


Figure 55 - Recharge areas.

6.3.5 - Material Properties

Material properties must be set according to hydrodynamic characteristics of each hydrogeological unit. The hydrogeological parameters such as hydraulic conductivity, specific storage, porosity and their characteristics applied for the numerical simulations on this study area were compiled from Gonçalves *et al.* (submitted-a) and Gonçalves *et al.* (submitted-b)

Based on infiltration tests in the FD and on comparison and addition with former studies, Gonçalves *et al.* (submitted) established mean values for the hydraulic conductivity of soils. Same authors applied different pumping test methods to estimate the transmissivity of the fractured aquifers. Specific storage values are assumed to correspond to the specific capacity, from the production and the thickness saturated. Porosity values were estimate by Almeida *et al.* (2006) in comparison to aquifers of the Goiás State. Between Upper and Lower aquifers there are a transition material knows as Saprolite. Saprolites are a chemically weathered rock (rotten rock) and form in the lower zones of the soil horizons and represent deep weathering of the bedrock surface. The aquifer systems and its main hydrodynamic characteristics are shown in Table 12.

Table 12 - Hydrodynamic parameters of the aquifers in the Federal District.

Upper Aquifer Porous						
Aquifers Systems	K-values (m/s)	Average production (m ³ /h)	Transmissivity (m ² /s)	Specific capacity (m ³ /h/m)	Porosity ηe or Ifi (%)	Average thickness saturated (m)
P1 - aquifer	1,68 x 10 ⁻⁶	0,8	4,20 x 10 ⁻⁵	-	11	25
P4 - aquitard	3,11 x 10 ⁻⁷	0,3	3,11 x 10 ⁻⁷	-	3	1
Saprolite	1,68 x 10 ⁻⁶ - 3,11 x 10 ⁻⁷	0,8 - 0,3	4,20 x 10 ⁻⁵ - 3,11 x 10 ⁻⁷	-	3-11	0-50
Lower Aquifer Fractured						
A - aquitard	2,06 x 10 ⁻⁶	4,0	1,15 x 10 ⁻⁴	3,32 x 10 ⁻¹	2,5	115
R3/Q3 - aquifer	8,43 x 10 ⁻⁷	12	3,46 x 10 ⁻⁴	1	2,5	140
R4 - aquifer	1,26 x 10 ⁻⁶	6,0	1,24 x 10 ⁻⁴	3,59 x 10 ⁻¹	2,5	100

Source: Gonçalves *et al.* (submitted-a) and Gonçalves *et al.* (submitted-b).

6.3.6 - Calibration Procedure

In this study, the Pest code integrated in OGS was applied to calibrate the model. The main procedure of OGS/PEST integration is shown in Figure 56. The advantages of applying such a model independent parameter estimation system in the model calibration process has been successfully used in several case studies (i.e., Poeter and Hill, 1997; Aster *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2011).

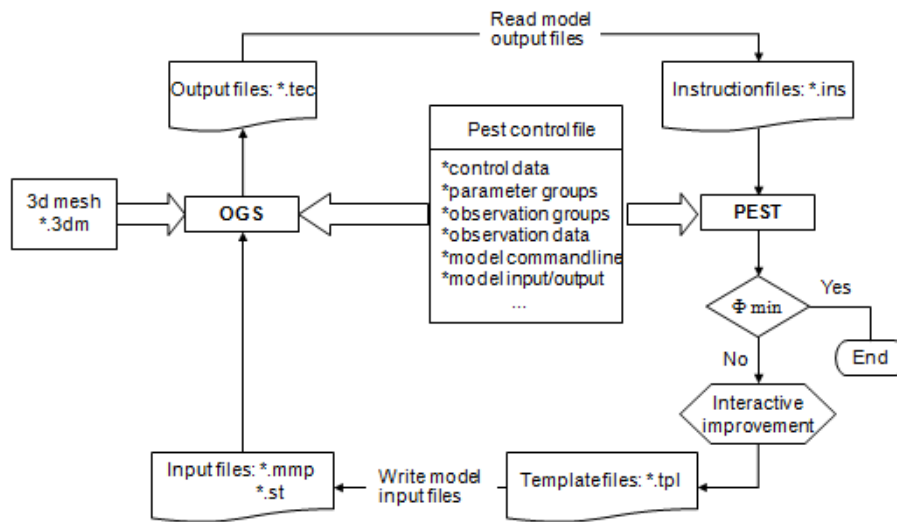


Figure 56 - The workflow of OGS/PEST integration. Source: adapted from Sun et al. (2011).

The OGS and PEST integration occurs through own model of input/output files and the corresponding prepared template/instruction files. In the Pest control file are defined initial values and ranges for each parameter as well as command line. The template file includes parameter delimiter and instruction file with values that need to be compared. More detailed discussions about the Pest parameter estimation with OGS can be found in Sun et al.(2011) and details about the control file can be found in the Pest manual (Doherty, 2004).

6.4 - Results and Discussion

The results of calibration show the accuracy of the groundwater model between calculated and measured hydraulic head in the whole domain. In this study, the calibration of the numerical model involved two sequential steps: the steady-state model representing the pre-developed aquifer system using the measurement water level data from ten (10) observation wells.

During the run of PEST, parameter values were adjusted according to the control settings until model-generated heads fit observed heads as accurately as possible. A range of ~50% of the estimated value was used in the first calibration. Therefore, PEST searches a parameter set until the sum of squared deviations between calculated and measured values at the observation wells are reduced to a minimum. The initial values and range for each parameter are defined in the Pest control file. The results of the calibration hydraulic conductivities parameter are shown in Table 13.

Table 13 - Initial values and range for hydraulic conductivity induced to the model and optimized values.

Parameter	Zone	Initial Values	Ranges	Optimized values
Hydraulic conductivity (m/s)	K0	$1,68 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5} \sim 1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-5}$
	K1	$3,11 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6} \sim 1,0 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-6}$
	K2	$1,26 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5} \sim 1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-5}$
	K3	$1,26 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5} \sim 1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-5}$
	K4	$8,43 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6} \sim 1,0 \times 10^{-5}$	$8,0 \times 10^{-6}$
	K5	$2,06 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5} \sim 1,0 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-5}$
	K6	$2,06 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-5} \sim 1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$

The groundwater contour map in Figure 57 shows the hydraulic head distributed from measurement water level in 2004 and simulated heads from observed wells. The observed wells are distributed in different parts of the study area and the scatter diagram of the observed versus calculated water level show the correlation coefficient between simulated and observation hydraulic head (Figure 58). The correlation coefficient around 0.7 is considered acceptable but the difference between the measured and calculated water level of the 10 wells varied between 23 to 87m. This big difference can be related to heterogeneity of material and to anisotropic behaviour that can substantially induce the behaviour of the vertical flow. Furthermore, the calibration of the model indicates an overestimation of the values, which can be associated to recharge rate. Because no data was available for the recharge rate in the study area, an infiltration of ~12% of the rainfall is assumed in the model. In order to reach a balance between infiltration and outflow, the corresponding outflow flux is estimated.

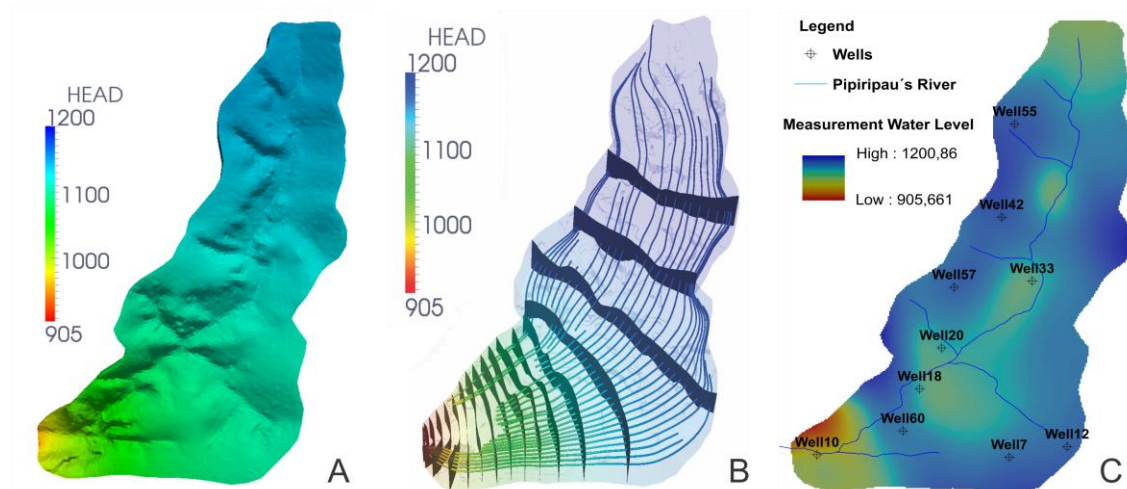


Figure 57 - Visualization of flow field comparison between simulated heads and measured head in selected wells.. A-Simulation Head; B-Head Isosurfaces; C-Measured Head.

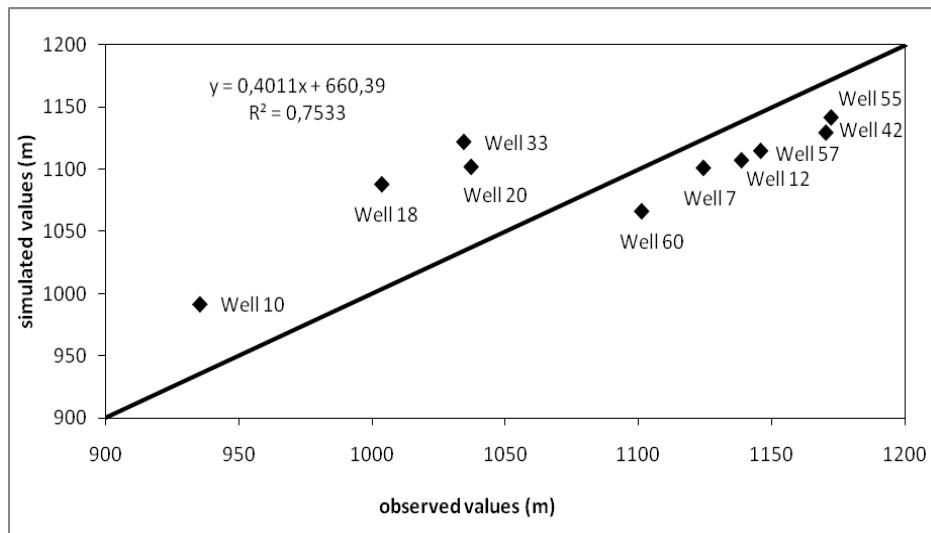


Figure 58 - Measured vs. simulated groundwater level in monitoring wells.

6.5 - Conclusions and Recommendations

The goal of this model was to reproduce correctly the groundwater levels in order to improve management practices. However, the quality of the model depends on both the input data and the numerical efficiency of the tools to solve problems. All available data relevant to these processes were used to analyse the groundwater flow regime in the study area but still not enough to identify all hydrogeological features. In order to reduce the uncertainties, the presented hydrogeological model will be improved in the future by developing appropriate monitoring strategies and integrating collecting more detailed data when available.

GMS (for data pre-processing) and PEST (for inverse parameter calibration) were integrated into the OpenGeoSys (OGS) code for groundwater finite element analysis and this procedure was a good method because this way was possible to integrate another attributes to the model.

Calibration results showed the distribution of hydraulic head in the model domain, where the highest values occur in the recharge areas to the east and west of the study area, while the lowest values occurring southwest of the basin. The correlation coefficient around 0.7 between observed and simulated hydraulic head is considered acceptable but the difference between the measured and calculated water level of the 10 wells varied between 23 to 87m. This big difference can be related to heterogeneity of material and to anisotropic behaviour that can substantially induce the behaviour of the vertical flow. Furthermore, the calibration of the model indicates an overestimation of the values, which can be associated to numerical method used.

The current model represents only the first step toward a comprehensive effort to the scenario analysis for a sustainable water resources management in Pipiripau watershed. The simplified hydrological and hydrogeological characterization of the Pipiripau catchment demonstrated the limits of the simplified model because the results cannot represent the natural behavior of the catchment. The calculations of groundwater recharge require another method to

compare the current data because the behavior of effluent rivers was not considered. Furthermore, the recharge of different area widely varies depending on rainfall distribution, topographical situation, soil cover, etc. Because no data was available for the recharge rate in the study area, an infiltration of 10mm / year the rainfall is assumed in the model. In order to reach a balance between infiltration and outflow, the corresponding outflow flux is estimated.

The hydraulic system depends upon the recharge and discharge conditions to or from the model area. A preliminary simulation has been carried out. The next step for the groundwater modeling is to develop more realistic infiltration and recharge conditions based on observations.

These results indicate that it is possible to have good representation of the geological structure of the basin but the estimates of the hydrodynamic conditions of the study area should to be analyzed more intensively. However, must be add to numerical model, water level time series, abstractions rates of the wells for the calibration of the transient model, data about land use, irrigation and socioeconomic characteristics to optimize hydrological modelling, in order to improve the systemic management of water resources in the Pípiripau watershed.

Capítulo 7: Proposta de Análise Integrada para a Gestão de Recursos Hídricos: Estudo de Caso na Bacia do Ribeirão Pípiripau, Distrito Federal

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um método de análise a partir da interação dos sistemas ambientais e socioeconômicos, objetivando subsidiar a gestão integrada de recursos hídricos. Aborda-se também, a necessidade de incluir, nos modelos hidrológicos que se preocupam com questões sobre a disponibilidade, qualidade e quantidade de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, aplicativos que considere as características socioambientais das bacias hidrográficas. Com base nos dados compilados da literatura e de observações de campo, priorizou-se para análise, a bacia do Ribeirão Pípiripau, importante região hidrográfica do DF. O estudo mostrou os padrões espaciais que refletem a degradação biótica, física e socioeconômica da área. Constatou-se, também, que a integridade dos recursos hídricos vem sendo ameaçada não só pelo aumento da demanda por água, mas também pela supressão da vegetação nativa e pelo uso indiscriminado de insumos agrícolas. Por outro lado, ressalta-se que a inclusão de aplicativos, em softwares de modelagem, capazes de gerenciar a outorga em diferentes períodos do ano, pode ser uma alternativa para mediação de conflitos pelo uso da água.

Palavras-chave: sistemas socioambientais, gestão de recursos hídricos, softwares de modelagem.

ABSTRACT

This paper presents an analysis method based on the relations between environmental and socioeconomic systems, in order to support the integrated management of water resources. It was also discussed the need to include, inside of the hydrological models, which care about availability, quality and amount of surface and subsurface water resources, applications that consider socioeconomic characteristics of the watersheds. Based on compiled data from the literature and field observations, the prioritized for analysis, the Ribeirão Pípiripau watershed, an important hydrographical region in the Federal District. This study showed the spatial pattern, which reflects the biotic, physical and socioeconomic degradation. The integrity of the water resources is threatened not only by demand increased for water, but also by the native vegetation suppression and the indiscriminate use of agricultural inputs in the region. On the other hand, it is emphasized that the inclusion of the applicative programming into software of modeling, capable of management the water rates in different times of year may be a good alternative to mediation of the conflicts over water use.

Keywords: socio-environmental systems, water management, software modeling.

7.1 - Introdução

Os maiores problemas relativos à exploração dos recursos hídricos decorrem, principalmente, de fatores, tais como: desmatamento, contaminação e poluição das águas e do

solo, compactação da superfície e impermeabilização das áreas de recarga, construção inadequada dos sistemas de captação, subdimensionamento e má conservação das redes adutoras e dos sistemas de reservação, falta de controle dos volumes bombeados e carência de conhecimento a respeito das características hidrológicas e das influências antrópicas sobre os sistemas hídricos.

Considerando a importância do ciclo hidrológico para a manutenção da vida e a interdependência dos sistemas ambientais e sociais que dele dependem, as políticas públicas de gestão integrada de recursos hídricos buscam, mediante observação e implementação de ações capazes de proteger os mananciais, atender, com mais eficiência, as demandas de água da população e a minimizar impactos sobre os ecossistemas. Neste sentido, a referida gestão tem caráter multidisciplinar, é complexa ao traduzir as relações que envolvem o homem e a natureza e deve estar atrelada à gestão ambiental e à promoção do desenvolvimento sustentável.

No Brasil, a gestão integrada dos recursos hídricos constitui um dos fundamentos da Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997 (Brasil, 1997), que considera o ciclo hidrológico como unidade necessária ao estabelecimento de critérios de outorga de direito de uso dos recursos hídricos. A outorga é o mecanismo pelo qual o uso integrado e múltiplo das águas pode ser tecnicamente aplicado, com vistas a assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos das águas e o efetivo exercício a seu acesso. No entanto, a aplicação de critérios integrados de outorga de águas superficiais e subterrâneas, que considere as relações socioeconômicas, ainda está fora da realidade atual do planejamento dos recursos hídricos no Brasil.

O falta de conhecimento científico dos hidrossistemas e as influências que sofrem decorrentes das atividades antrópicas impõem grandes limitações à efetiva gestão das águas. Em busca de otimizar a obtenção de dados e informações hidrológicas, o uso de ferramentas de modelagem passou a ser uma alternativa. Com os avanços na capacidade computacional e nas técnicas de obtenção e análise de dados espaciais foi possível, desde a década de 70, o desenvolvimento de sofisticados softwares voltados à representação e modelagem dos ciclos da água. Contudo, a despeito da importância dessas ferramentas quanto ao entendimento dos hidrossistemas, é necessário considerar também, a possibilidade de incluir nesses softwares, aplicativos automáticos que gerenciem as demandas, segundo os usos múltiplos das águas, incorporando em seus atributos aspectos socioeconômicos.

A bacia do Ribeirão Pipiripau, área de estudo desta pesquisa, apresenta forte aptidão agrícola e devido a escassez dos recursos hídricos é alvo de frequentes conflitos entre os usuários de água da bacia. O agravamento desses conflitos, em 2002, levou à intervenção da Agência Nacional de Águas - ANA que, com o apoio da CAESB, da Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMARH e da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal – EMATER adotou medidas mitigadoras de controle e racionamento das águas. Dentre as principais iniciativas adotadas pelo poder público, destacam-se o

cadastro dos usuários, os levantamentos técnicos e o monitoramento permanente das vazões do ribeirão Pípiripau, nos cinco pontos de controle da bacia.

Essas iniciativas representam um avanço na busca pelo conhecimento da dinâmica hídrica da região. Entretanto, as alterações nas características e na qualidade dos componentes do sistema ambiental biofísico, que tenham relevância para a vivência das comunidades humanas, tais como a poluição hídrica, a redução das vazões dos rios e a sobreexploração dos aquíferos, requer esforços no sentido de compatibilizar os usos sustentáveis dos recursos hídricos com a capacidade de auto-organização dos ecossistemas (UNESCO, 2003).

Assim, o tratamento integralista dos hidrossistemas requer considerar as inter-relações entre os usos e a conservação dos recursos. Nesta perspectiva, o objetivo deste estudo foi analisar, na região do Pípiripau, as interações entre os sistemas ambientais e socioeconômicos que ameaçam a integridade ecológica e cultural dos seus sistemas naturais e sociais, respectivamente. Para gerenciamento mais eficiente foi, também, abordado a necessidade de se incluir, nos softwares de modelagem hidrológica, aplicativos que considere as características socioambientais das bacias hidrográficas, a fim de subsidiar a gestão integrada dos recursos hídricos.

7.2 - Caracterização e análise socioambiental

A caracterização socioambiental da bacia do ribeirão Pípiripau revela a existência de relações que envolvem a população humana e os demais elementos integrantes da natureza. Sob a ótica da abordagem sistêmica, foram compiladas informações secundárias para melhor compreender a interdependência e a integração necessárias à unidade homem/natureza inseridas nos seguintes temas: meio físico, meio biótico e meio socioeconômico.

7.2.1 - Meio Físico

O sistema hidrológico refere-se a um conjunto integrado de elementos e processos, de modo que as águas superficiais e subterrâneas estão inter-relacionadas. Assim, a dinâmica das águas é determinada por fatores que condicionam a evolução morfodinâmica da paisagem como por exemplo a infiltração, a circulação, o armazenamento e a exploração das águas.

Neste estudo, o meio físico foi analisado quanto as características que dizem respeito a disponibilidade, qualidade e quantidade, e à dinâmica hídrica da bacia.

Localização da área de estudo

O Ribeirão Pípiripau está localizado ao nordeste do Distrito Federal (DF), limitado ao sul e ao norte pelas coordenadas UTM 213.601 E / 8.264.250 N e 235.913 E / 8.289.742 N,

respectivamente (Figura 59). Localizada na região do Domo estrutural do Pípiripau, o ponto mais alto da bacia possui 1.206 m de altitude, enquanto que o mais baixo, possui 930 metros.

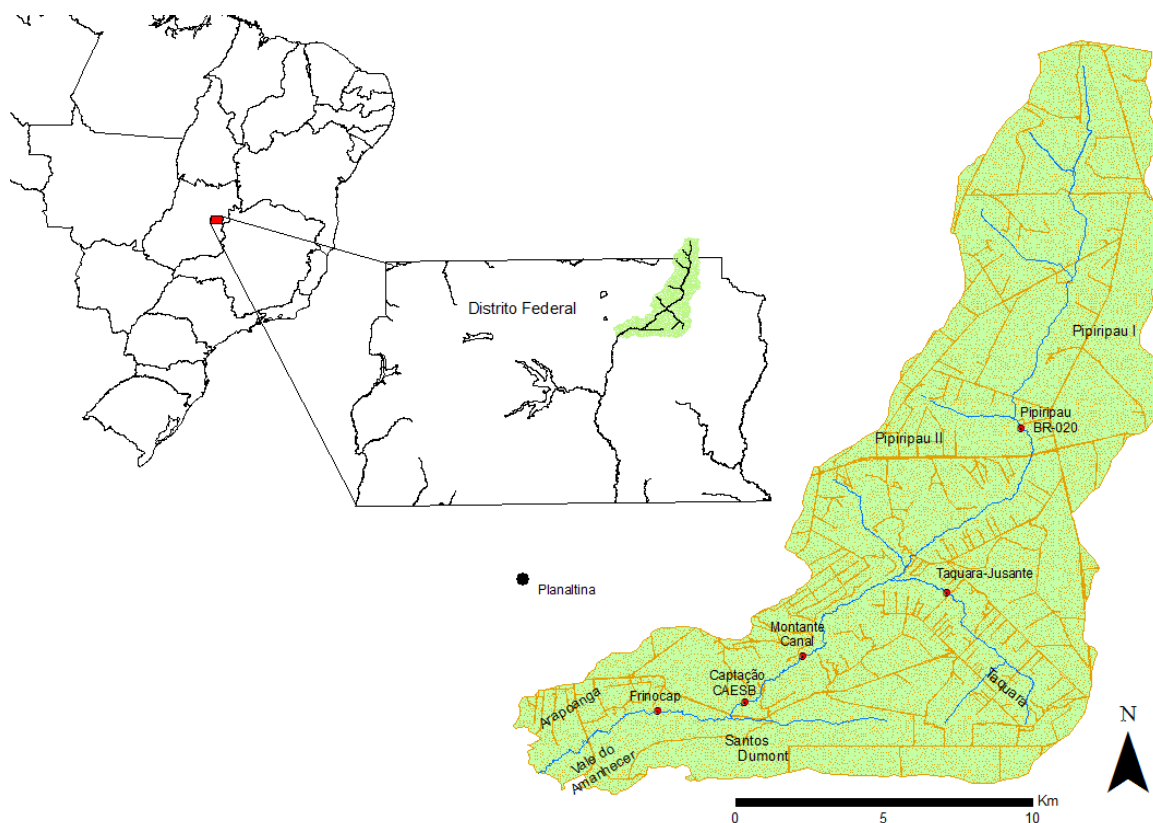


Figure 59 - Localização da bacia do Ribeirão Pípiripau.

Clima e Hidrologia

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 na bacia do ribeirão Pípiripau é marcado por forte sazonalidade. No período de outubro a março ocorre o maior índice de pluviosidade, cerca de 85% da precipitação anual. No período de menor pluviosidade, entre julho a setembro, o total de precipitação é em média 51 mm e a precipitação média anual, de longo período, entre 1979 e 2009, é de 1.438 mm/ano. (Figura 60, ANA, 2011).

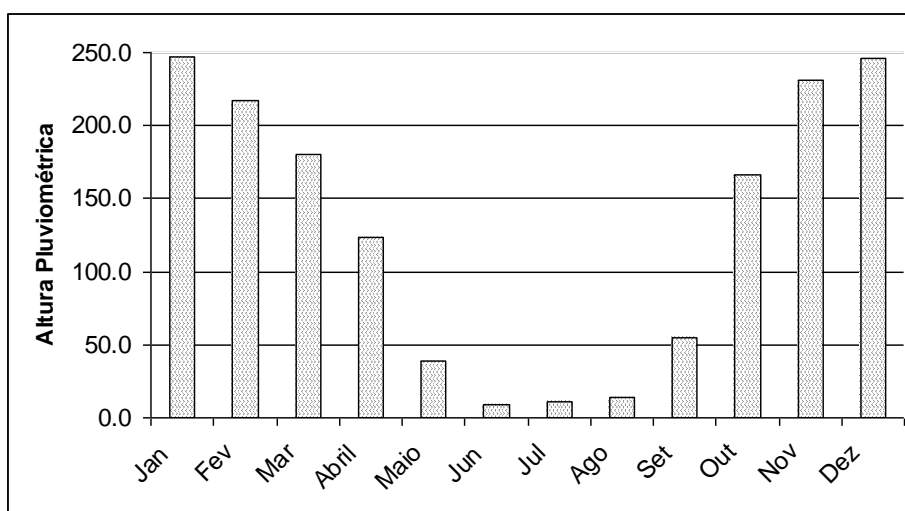


Figure 60 - Precipitação média plurianual da bacia do Ribeirão Pipiripau - Estação Taquara.

O monitoramento hidrológico da bacia, realizado por cinco estações fluviométricas, a saber: Trecho 1: Estação Taquara-Jusante (60472200); Trecho 2: Estação Pipiripau BR-020 (60472230); Trecho 3: Estação Pipiripau Montante Canal (60472240); Trecho 4: Estação Pipiripau Montante Captação (60472300) e Trecho 5: Estação Frinocap DF130 (60473000) revela as vazões de longo período (1979 - 2009) medidas na estação Frinocap são apresentadas na Figura 61 (ANA, 2011).

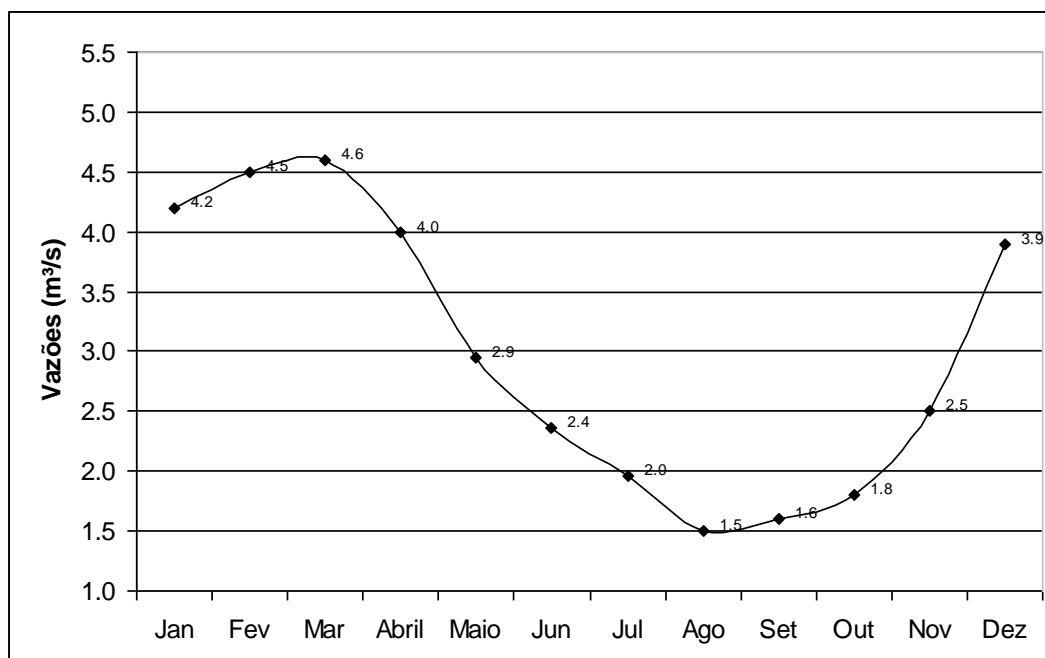


Figura 61 - Vazão média plurianual da bacia do Ribeirão Pipiripau - Estação Frinocap.

Geologia e Hidrogeologia

No Distrito Federal existem quatro conjuntos litológicos reconhecidos: Canastra, Paranoá, Araxá e Bambuí. A bacia hidrográfica do ribeirão Pipiripau está situada sobre duas

dessas unidades estratigráficas, quais sejam, Paranoá e Canastra, ambas de idade meso/neoproterozóica.

O Grupo Paranoá é formado por extensas unidades de metarritmitos originados de metassedimentos predominantemente finos e médios, distribuídos de maneira intercalada. O Grupo Canastra é representado por uma unidade constituída principalmente de filitos fortemente intemperizados, com lentes centimétricas e métricas de quartzitos. Estes quartzitos, quando na forma de lentes mais espessas, são responsáveis pela presença de relevo mais elevado.

As unidades geológicas R3/Q3 correspondem a cerca de 87% da área total da bacia e possuem os melhores aquíferos da região. Os poços perfurados nessas unidades apresentam uma média de vazões de 12,7 m³/h e profundidade entre 150 e 180 m (ADASA, 2010).

Diretamente relacionado ao contexto geológico da bacia do ribeirão Pipiripau, Campos & Freitas Silva (1998) classificaram os aquíferos da região em dois Domínios: o Poroso e o Fraturado.

A classificação proposta Campos & Freitas Silva (1998) e as principais características dos aquíferos dos domínios poroso e fraturado presentes na bacia do Pipiripau estão resumidas na tabela 14.

Tabela 14 – Síntese dos aquíferos dos domínios poroso e fraturado presentes na bacia do Pipiripau e suas principais características

<i>AQUÍFERO (Sistema / Substema)</i>	<i>Principais Características</i>
<i>AQUÍFEROS DO DOMÍNIO POROSO</i>	
P1	São associados aos Latossolos espessos (>20m) e alta condutividade hidráulica (>10 ⁻⁶). Apresentam as melhores condições de infiltração e recarga.
P2	É representado pelos Nitossolos, Argissolos e Chernossolos de espessuras > que 5 metros. Tem importância local mediana.
P3	Gleissolos e Plintossolos com espessura > que 5 metros, baixa condutividade hidráulica e de pequena importância local
P4	É representado pelos Cambissolos, apresenta as piores condições de recarga, espessura > 2 metros e condutividade hidráulica muito baixa.
<i>AQUÍFEROS DO DOMÍNIO FRATURADO</i>	
<i>Sistema Paranoá</i>	
Substema A	Ocupa regiões de vales, podendo ou não apresentar pequena ou alta condutividade hidráulica, a depender da espessura saturada.
Substema R3/Q3	Possui as melhores condições hidrodinâmicas e está localizado nas partes altas da região
Substema R4	encontra-se em pequena faixa no exutório da bacia, sendo média a importância hidrogeológica.

Os padrões de fluxo das águas subterrâneas variam enormemente em distância, profundidade e tempo no qual a água se desloca entre os pontos de recarga e descarga do sistema subterrâneo. Uma série de fatores pode adiantar ou retardar este processo, como, por exemplo, a conservação da vegetação nativa ou a impermeabilização dos solos, respectivamente.

Geomorfologia

Segundo Ab'Saber (1977), 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.

Neste estudo, características geomorfológicas da paisagem local foram analisadas a partir da expressão hipsométrica e dos gradientes de declividade sugeridos por Campos (*in* ZEE, 2011).

Com base nas propostas de Novaes Pinto (1994a,b) e Martins & Baptista (1998) para o Distrito Federal, Campos (*in* ZEE, 2011) considera os seguintes compartimentos para o Distrito Federal: Plano Elevado, Plano Intermediário, Vale Dissecado, Rebordo e Rampa Íngreme. As principais características de cada compartimento presente na região do Pipiripau são: Plano Elevado - exibe padrão de relevo plano a suave ondulado com declividades inferiores a 10% e cotas superiores a 1.100m. Na região predominam os Latossolos e a densidade de drenagens é baixa; Plano Intermediário - o relevo plano a suave ondulado difere do padrão anterior apenas por apresentar declividades inferiores a 12% e cotas entre 950 e 1.050m; Vale Dissecado - apresenta padrão de relevo ondulado a forte ondulado com declividades superiores a 20% e cotas inferiores a 800m, apresentando predominância de Cambissolos e elevada densidade de drenagem; Rebordo - o padrão de relevo é ondulado com declividades entre 10 e 20% e cotas entre 950 e 1.100m, possuindo moderada densidade de drenagem e predominância de Cambissolos; e Rampa Íngreme - tem padrão de relevo forte ondulado a escarpado, declividades superiores a 25% e cotas entre 800 e 1.100m, ampla predominância de Latossolos e alta densidade de drenagem.

Solos

Os intensos processos de intemperismo químico, corrosão e lixiviação das rochas são responsáveis pela evolução dos solos, os quais são indicadores da relação do homem com a natureza, das atividades antrópica na bacia e da interface entre sua conservação e a conservação dos recursos hídricos.

As principais classes de solos encontradas na área foram mapeadas pelo Serviço Nacional de Levantamento de Solo (EMBRAPA, 1978), na escala 1:100.000. Os tipos pedológicos mais abundantes na região são: Latossolos (70%) e Cambissolos (12%). Outros solos, como Neossolos (8%) Gleissolos (7%) e Nitossolos (3%), são bem menos representativos.

Os Latossolos caracterizam-se por apresentarem perfil espesso, normalmente superiores a 2 m, constituídos por argilominerais do tipo 1:1, o que resulta em baixas capacidades de retenção de água e de troca iônica (EMBRAPA, 1978). Entretanto, apresentam alta permeabilidade e são pouco susceptíveis à erosão.

A ocorrência dos Latossolos, na região do Pípiripau, está relacionada a relevos Planos Elevados (ZEE, 2011) em áreas morfodinamicamente mais estáveis, com declividade menor que 5%, em associação com vegetação de campo cerrado e condição erosiva praticamente nula.

Apesar desse tipo de solo favorecer o uso de máquinas e implementos agrícolas, devido à baixa fertilidade natural, demanda uma grande adição de insumos e fertilizantes para a correção de sua fertilidade, o que dificulta o uso intensivo por agricultores de baixo poder aquisitivo.

Por outro lado, o manejo inadequado dos Latossolos pode causar graves danos ao meio ambiente. O desmatamento indiscriminado pode levar à formação de sulcos e voçorocas, especialmente nos Latossolos de textura média, pois estes apresentam elevada percolação de água ao longo do perfil.

Os Cambissolos são solos minerais pouco desenvolvidos, variando de 0,2 a 1,0 m, que apresentam baixa alteração física e química, sendo comum a presença de minerais primários, o que indica baixo grau de intemperização.

Esses solos ocupam áreas de pequena extensão na bacia, associados a relevos ondulados a forte ondulados (Vales dissecados e Reborbo) com declividades superiores a 20% (ZEE, 2011). Apresentam alta susceptibilidade à erosão e estão, em geral, associados à vegetação de campo limpo. A baixa fertilidade natural desses solos e a localização em relevo acidentado desfavorecem o seu uso agrícola.

Os outros solos, como os Neossolos (8%) Gleissolos (7%) e Nitossolos (3%), não foram analisados por estarem localizados em áreas muito restritas, em pontos isolados e ainda, não foram cartografados na região.

Aptidão, Uso e Cobertura dos Solos

A classificação do uso e aptidão dos solos na área de estudo tomou como referência o relatório da CAESB (2001), o qual aponta os graus de deficiência dos seguintes fatores: água, fertilidade, impedimento à mecanização, oxigenação e susceptibilidade à erosão.

A classe de solo mais favorável ao uso e aptidão agrícola na bacia do Pípiripau é o Latossolo. Este solo é o que menos impõe restrições ao manejo. Nesse tipo de solo não se verificam limitações quanto à declividade do terreno, constatando-se que a principal limitação observada é relativa à baixa fertilidade natural, exigindo para sua exploração investimentos para correção da acidez e dos teores de cálcio, magnésio e fósforo, principalmente.

Segundo a Unesco (2003), uma forma de mensurar o grau de pressão antrópica numa dada região é verificar a estrutura da paisagem e o grau de fragmentação da vegetação dentro e contígua à área.

A bacia do Pípiripau apresenta grande variedade de culturas, áreas de pastagens, ocupações urbanas e outras edificações de uso múltiplo. A principal categoria de uso da terra

corresponde à agricultura extensiva (39,29%), seguida pela pastagem (21,76%) e pela produção hortifrutigranjeiras (7,17%). Nas zonas agrícolas, podem ser encontrados galpões para a criação de suínos e aves e o plantio tomate, pimentão, maracujá e outros produtos.

A vegetação nativa, na área de estudo, ocupa apenas 18% do total da área, configurando um quadro que já é comprometedora a biodiversidade da região. Assim, as áreas naturais, em termos percentuais, são menores que as zonas de ocupação antrópica (68%).

O Mapa de Uso e Cobertura dos Solos (Figura 62), em 2009, já mostrava o grau de fragmentação da vegetação nativa e a falta de conectividade entre os habitats. Segundo o Art. 2º do Código Florestal, para se garantir a biodiversidade de uma região, as Áreas de Preservação Permanente (APP's), aquelas situadas ao longo dos rios ou de qualquer corpo d'água num raio de 50 m em áreas rurais e 30 m em áreas urbanas, devem ser preservadas. Infelizmente, essa legislação tem sido sistematicamente desrespeitada na bacia do Pípiripau.

Processos Erosivos e sedimentação

Os processos erosivos na bacia do Pípiripau estão associados, principalmente, à supressão da vegetação nativa nas margens dos cursos d'água.

As práticas mecanizadas de manejo do solo, utilizadas pela maioria dos agricultores locais, são a principal causa do desmatamento das encostas do ribeirão. A bacia possui apenas cerca de 20% de remanescentes de vegetação nativa, conforme mostra a figura 60.

Verificou-se um crescente processo de assoreamento do Pípiripau, em diversas partes da bacia, ocasionados pelo carreamento superficial de um grande volume de sedimentos que chegam ao corpo hídrico.

O assoreamento do ribeirão Pípiripau conta, ainda, com um incremento decorrente da extração e lavagem de areia, retirada de outra localidade fora bacia, que ocorre a menos de 2 km da cabeceira do ribeirão. Essa prática é extremamente predatória, pois resulta na redução significativa de água do rio.

Adicionalmente, o acelerado crescimento populacional de diversas áreas, como no Condomínio Arapoanga, no Núcleo Rural do Córrego Taquara e no Vale do Amanhecer, determina o aumento da área impermeabilizada na bacia, diminuindo a infiltração de águas pluviais e favorecendo o escoamento de água superficial e o surgimento de focos erosivos pela ação hídrica.

De acordo com Alipaz (2010), o aporte de sedimentos que chega da bacia que chega ao curso d'água é de 3,1 mil toneladas por ano, principalmente decorrente do mau uso e manejo do solo. Entretanto, vale destacar que foram observadas ações corretivas em pontos isolados, implementadas pelos próprios produtores rurais, como reflorestamento das margens dos córregos.

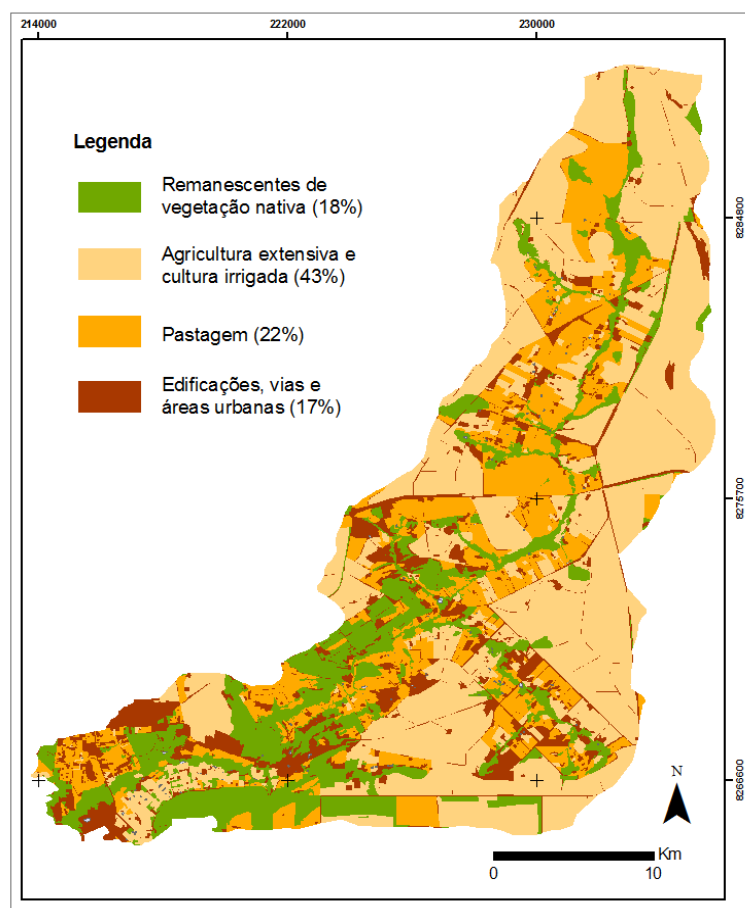


Figura 62- Mapa de Uso e Cobertura dos Solos em 2009 (ANA, 2010).

Contaminação e Poluição

A contaminação da água na área de estudo se deve, essencialmente, à poluição orgânica, promovida por destinação inadequada de resíduos líquidos e sólidos e à contaminação tóxica por metais e resíduos de pesticidas oriundos do uso indiscriminado de defensivos agrícolas.

Os limites e as condições da contaminação da água do Ribeirão são definidos pela Resolução do CONAMA nº 020/86 (Brasil, 1986), que estabelece a classificação das águas doces conforme seus usos preponderantes.

Segundo relatório da ANA (2011), as mudanças na qualidade da água, nos períodos de cheia e estiagem, examinadas segundo o Índice de Qualidade da Água – IQA, mostraram que o IQA do ribeirão Pípiripau, no ponto de captação – estação Frinocap, sofre um decréscimo substancial no período chuvoso (IQA=63) em comparação ao período de estiagem (IQA=73). Assim, de acordo com o IQA, as águas do Pípiripau apresentam, durante o período de estiagem, características de classes 2 e 3, sendo adequadas para o abastecimento doméstico após tratamento convencional. Porém, no período chuvoso, ocorre um declínio nas condições de qualidade da água, que atinge a classe 4, inviabilizando o seu aproveitamento até pela fauna silvestre.

Demanda e disponibilidade hídrica

Numa área aproximada de 24 mil hectares, a bacia do Ribeirão Pipiripau possui zonas urbanas (Vale do Amanhecer, Condomínio Arapoanga e parte da cidade de Planaltina) e zonas rurais (Núcleos Rurais Santos Dumont, Taquara e Pipiripau).

A área de estudo apresenta irrefutável vocação agrícola e possui duas importantes captações de água superficial: a do canal Santos Dumont e o sistema de adução e tratamento de água (ETA-Pipiripau). Esta última possui outorga de 400 l/s, entretanto, em virtude dos longos períodos de estiagem e da qualidade de água, muitas vezes impróprias para captação, vem operando com uma captação de apenas 280l/s (ANA, 2011).

O canal Santos Dumont tem uma demanda média para irrigação, no período de estiagem, que varia de 20 a 80 m³/ha/dia (ANA, 2011). Estima-se que a área total irrigada na bacia é de 398 ha (ANA, 2011). A Resolução ANA 340/2006 (Brasil, 2006) concede outorga para captação de 350l/s no canal, no entanto, as perdas médias atuais de vazão no canal, entre o período de março a outubro, são de cerca de 267 l/s (ANA, 2011). Esse valor representa as perdas por infiltração no canal, por infiltração e evaporação nos reservatórios existentes nas propriedades e dos sistemas de irrigação.

A Tabela 15 mostra a quantidade de água necessária ao suprimento de cultivos irrigados existentes na bacia do Pipiripau durante os 180 dias de estiagem (julho – setembro).

Tabela 15 - Estimativa de demanda hídrica para cultivos irrigados da bacia do Pipiripau.

Sistemas de Irrigação	Área (ha)	Demanda Hídrica	
		(m³/dia)	(m³/ano)
Aspersão Convencional	161.00	6.440	1.200.000 ⁽¹⁾
Gotejamento	78.00	1.560	300.000 ⁽²⁾
Pivô Central	51.00	2.040	370.000 ⁽¹⁾
Microaspersão	6.00	180	33.000 ⁽³⁾
Sulcos	102.00	8.160	1.500.000 ⁽⁴⁾
TOTAL	398.00	18.380	3.403.000

Fonte: CAESB (2001)

(1) refere-se à estimativa da demanda hídrica média, baseada no consumo de 40 m³/ha/dia ao longo de 180 dias por ano.

(2) base: 20 m³/ha/dia

(3) base: 30 m³/ha/dia

(4) base: 80 m³/ha/dia

Com relação à demanda de água subterrânea na bacia, existem, hoje, cerca 67 poços cadastrados no banco de dados da ADASA (2010), cuja vazão média outorgada é de 2,33 m³/h para bombeamento de até 12 horas por dia.

Quanto à disponibilidade hídrica da bacia, a CAESB considera a vazão mínima ($Q_{7,10}$) do curso d'água medidas na estação Frinocap, para mensurar o uso múltiplo do ribeirão. A redução da vazão mínima é um indicador de alteração de uso do solo na bacia e segundo Camelo (2011), o valor da vazão mínima remanescente de $0,375 \text{ m}^3/\text{s}$ está abaixo do marco regulatório da bacia (Figura 63).

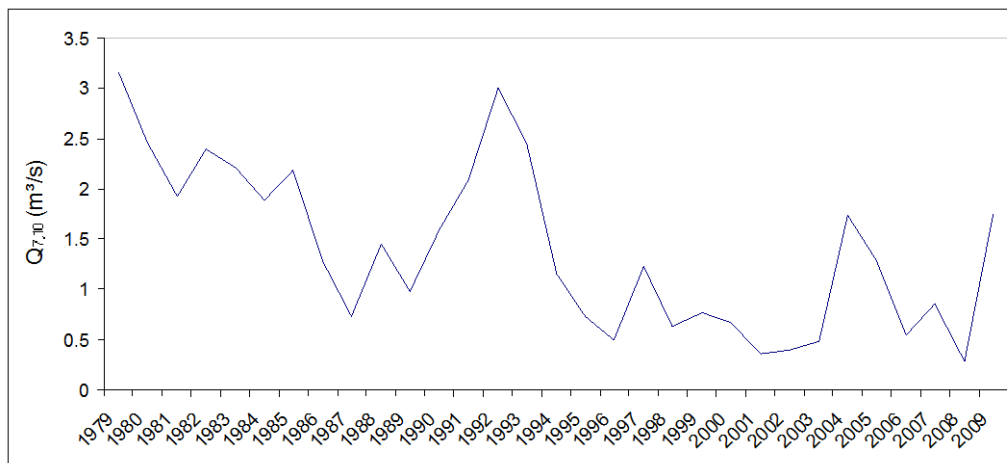


Figura 63 - Vazão mínima $Q_{7,10}$ na estação Frinocap.

As vazões remanescentes, conhecidas como vazões ecológicas, são necessárias para manter as funções dos ecossistemas, embora não haja legislação específica, fato que compromete a sustentabilidade dos ecossistemas.

7.2.2 - Meio Biótico

Quanto ao meio biótico, foram abordados aspectos da vegetação relacionados à conservação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos e aspectos da fauna, relativos à dinâmica desta população em função das ações antrópicas.

Vegetação

A bacia do Ribeirão Pipirpau está inserida no bioma Cerrado, onde a cobertura vegetal nativa destaca-se como elemento de grande importância para a recarga dos sistemas aquíferos.

A fitofisionomias do bioma cerrado observadas na bacia são: formações florestais, savânicas e campestres, que representam, respectivamente, cerca de 4,2, 10,7 e 3,5% da área da bacia. Esse total de remanescente de vegetação nativa não alcança o percentual de 20% exigido legalmente. Entretanto, as áreas de preservação permanente, definidas no Art. 2º do Código Florestal (Brasil, 1965), ainda mantêm suas matas ciliares, apesar da degradação que atualmente atinge mais de 50% da área de estudo (ANA, 2011).

As áreas de campo e cerrado são as mais afetadas pela expansão da atividade agropecuária. A substituição da cobertura vegetal nativa por culturas de ciclo curto e o manejo inadequado do solo levam à supressão da cobertura vegetal, contribuindo para o

desenvolvimento de processos erosivos acelerados, que levam a formação de sulcos e voçorocas e, conseqüentemente, causam o assoreamento dos cursos d'água.

A modificação da paisagem em função das ações antrópicas e a fragmentação da vegetação nativa não só comprometem as diversas espécies animais que habitam a região, mas também, interferem nas interações entre animais e plantas, prejudicando a recolonização de habitats degradados, fato que pode causar danos irreversíveis ao meio ambiente.

Fauna Terrestre

A modificação da paisagem pelo homem na bacia do ribeirão Pipiripau, a ponto dos habitats naturais ficarem contidos em fragmentos da vegetação nativa, circundados por grandes espaços ocupados pela agricultura, dificulta a dispersão dos animais, bem como o investimento na reconstituição da cobertura vegetal em locais reconhecidos como corredores de dispersão.

Espécies de animais vertebrados que se alimentam de frutos exercem expressivo papel no processo de reconstituição da cobertura vegetal. Entretanto, a existência de corredores ecológicos que permitem o trânsito de animais silvestres e, conseqüentemente, a recolonização de áreas usadas para produção agrícola está comprometida devido a existência de rodovias e estradas nas proximidades entre a Unidade de Conservação de Águas Emendadas e a bacia do rio Pipiripau.

As características biológicas, ecológicas, geográficas e comportamentais conferem à fauna uma variada interação de hábitos e usos do habitat que dificultam sua identificação e caracterização, necessitando de um esforço contínuo e diferenciado para abranger tal escopo de variação. Assim, espécies da mastofauna, avifauna, herpetofauna e ictiofauna necessitam de levantamento quantitativo e qualitativo de longa duração e, por isso, não foram abordados neste estudo. Entretanto, são de grande importância à integridade ambiental da bacia em questão.

7.2.3 - Meio Socioeconômico

Na perspectiva holística de análise dos sistemas ambientais físicos, não se pode excluir o conhecimento provindo dos estudos sobre os sistemas socioeconômicos, considerando os seus componentes e processos, sem omitir o estudo sobre o comportamento e a tomada de decisões políticas (Santos *et al.*, 1996).

No que diz respeito ao meio socioeconômico, foram tratados aspectos como estrutura fundiária, produção e qualidade de vida da população da área de estudo.

População, Estrutura Fundiária e Produção

A bacia do Pípiripau está inserida na Região Administrativa de Planaltina (RA VI) e integra a dinâmica e as características demográficas da RA, ainda que a mesma não esteja incluída no âmbito da bacia em estudo.

A região do Pípiripau que contribui, atualmente, para que a RA VI seja a maior população rural do DF, cerca de 2.300 habitantes (ANA, 2011).

Além dos arrendatários, posseiros e propriedades particulares, existe na bacia um assentamento do Movimento dos Trabalhadores Rurais Sem Terra (MST), que há oito anos ocupa uma área de 2.320 ha, localizada na parte nordeste da bacia, onde, de acordo com o MST, moram 169 famílias.

Com relação a estrutura fundiária da bacia, a distribuição da área total das propriedades por classe de tamanho, tem a seguinte configuração: 8% dos estabelecimentos ocupam área de até 20 ha, 31% ocupam de 20 a 93 ha, 27% estão no segmento entre 93 e 370ha e cerca de 34% ocupam área entre 370 e 1588 ha (ANA, 2011). O tamanho médio das propriedades é de 48ha sendo que, 45% das 424 propriedades mapeadas na bacia tem, conforme a ANA (2011), déficit de Área de Proteção Ambiental, 64% tem déficit de Reserva Legal e 84% das propriedades tem qualquer passivo ambiental.

Embora seja um processo preocupante em relação às demandas habitacionais sobre as áreas produtivas e também de proteção ambiental, o grande crescimento da população urbana fez com que a agricultura na bacia assumisse importante papel como pólo de produção de fruticultura e hortigranjeiros.

A produção de grãos e hortaliças é importante, sobretudo na região do Núcleo Rural Taquara, onde predominam as propriedades de 200 ha. A cultura de grãos ocupa 4.240 ha, sendo 60% dessa área utilizada para a lavoura da soja. O milho e o feijão também são importantes, ocupando, cada cultura, em torno de 20% da área destinada à produção de grãos. A soja é cultivada no sistema de plantio direto e o milho e o feijão no sistema convencional (ANA, 2011).

No Núcleo Rural Pípiripau, a horticultura ganha maior relevância e vem gerando excedentes de tomate, pimentão e couve-flor, que são destinados à Região Norte do país. A principal cultura desse segmento é o tomate, com 28 ha plantados e produtividade média de 65 mil Kg/ha. Destaca-se também a produção de pimentão e cenoura (ANA, 2011).

Nos Núcleos Rurais Santos Dumont e Pípiripau II, as hortaliças ocupam 129 ha, com predominância das culturas de tomate, pimentão, cenoura, beterraba e verduras diversas. Merece destaque, ainda, as lavouras de grãos (feijão, soja e milho) e a fruticultura, especialmente citros e goiaba (ANA, 2011).

No Núcleo Rural Taquara, a pecuária também é uma atividade econômica de importância, especialmente a bovinocultura, que envolve aproximadamente 100 criadores que manejam 1900 cabeças em 725 ha de pastagens. A suinocultura é praticada por cerca de 10

criadores que contam com 6000 cabeças, cujos dejetos são aproveitados como fertilizante orgânico nas áreas cultivadas. No segmento da avicultura, há uma dezena de criadores que produzem 800.000 aves terminadas a cada lote, cujos resíduos também são aproveitados na adubação orgânica. Quinze criadores dedicam-se à piscicultura em uma área inundada total de 1,5 ha.

Nos Núcleos Rurais Santos Dumont e Pipiripau II, cerca de 1.600 ha são destinados à pastagem, sendo registrados 28 criadores e um rebanho de 650 cabeças de gado. É um setor onde se registram queimadas acidentais no período seco, o que deve estar vinculado ao uso de pastos naturais. A piscicultura é praticada por apenas 3 produtores e a avicultura de corte por outros 2 criadores.

Sob o aspecto tecnológico, os produtores desta região recebem assistência técnica da EMATER, que possui três escritórios locais: no Núcleo Rural Pipiripau, no Núcleo Rural Taquara e em Planaltina. A assistência abrange informações sobre técnicas de irrigação, tratamentos culturais, práticas de conservação do solo e medidas de segurança no manuseio de agrotóxicos, cultivo de hortaliças em estufas, uso de mecanização e insumos agrícolas, entre outros.

Qualidade de vida

A mensuração sobre a qualidade de vida de uma população pode ser examinada segundo os seguintes indicadores: ofertas de serviços públicos, grau de instrução, condições ambientais e grau de satisfação.

Quanto ao nível de renda na região da bacia, um seguimento é constituído por arrendatários e proprietários de chácaras ou módulos rurais, que têm um padrão razoável de renda, e outro, por trabalhadores rurais, agregados ou temporários, com baixo nível de instrução e renda, que se caracterizam pela mobilidade de emprego.

A população economicamente ativa ocupa-se da agricultura e, normalmente, a estrutura da força de trabalho envolve todos os integrantes da família, alguns empregados e, em determinados casos, trabalhadores temporários.

De modo geral, a área de estudo dispõe de boa oferta de serviços públicos, podendo-se destacar o acesso à energia elétrica, a existência de escolas e postos de saúde públicos e a orientação aos produtores rurais prestada pelos Escritórios Locais da EMATER. Além disso, desde 2008, a ANA e ADASA assinaram um Termo de Cooperação Técnica 002/2008 para desenvolvimento de ações na área de gestão de recursos hídricos na bacia do Pipiripau. Outra iniciativa foi a adoção da bacia pela UNESCO como bacia HELP (*Hydrology for the Environment, Life and Policy*). Este programa visa aprimorar as pesquisas nos meios físicos, socioeconômicos e legais, a fim de garantir o desenvolvimento sustentável da região.

No que diz respeito a infra-estrutura física de unidades escolares, existem cerca de 33 escolas e um total de 2.969 matrículas desde os níveis infantil, especial e educação de jovens e adultos. Segundo dados do PDAD (2004), 3,9% da população da RA VI é analfabeta.

Quanto às reivindicações da população, destaca-se a construção de escolas, voltadas aos cursos de interesse da comunidade, e a regularização fundiária das áreas ocupadas pelas seguintes comunidades: Santos Dumont, Larga da Pedra, Córrego do Meio, Rajadinha e Córrego do Atoleiro. Além disso, reivindicações gerais das comunidades, como asfaltamento de vias públicas, construção de pontes, implantação de linhas de ônibus, instalação de telefones públicos, instalação de posto policial, reformas e construção de quadras poliesportivas e melhoria das escolas públicas são frequentemente relatadas a técnicos da EMATER.

No tocante ao setor produtivo, reivindicam ações para melhoria da vida do pequeno agricultor, através de medidas que possibilitem agregar valor ao produto e facilitar a distribuição do produto *in natura*.

Nas áreas de meio ambiente e saúde/saneamento, as demandas apresentadas pelas comunidades demonstram o conhecimento dos principais problemas que afetam a região da bacia e a sua população: controle do uso de agrotóxicos, disposição de resíduos e recipientes; tratamento da água consumida no meio doméstico; educação ambiental de forma ampla, incluindo aspectos de saúde e saneamento; reflorestamento de nascentes e matas ciliares; criação de áreas de reserva ambiental; programa de proteção das áreas rurais na vizinhança do núcleo urbano etc.

7.3 - Modelos hidrológicos aplicados à gestão dos recursos hídricos

Os modelos hidrológicos são ferramentas úteis à gestão dos recursos hídricos, não só por representar os processos hidrodinâmicos, mas também, por simular prognósticos de situações reais a partir de um modelo conceitual, idealizados com base no levantamento e interpretação de dados e observações de campo.

Em busca de compreender e representar a complexidade dos fenômenos naturais que integram o ciclo hídrico, os modelos descrevem, de modo geral, a distribuição espacial da infiltração e o armazenamento de água no solo, as perdas por evaporação do sistema e os fluxos de água superficial e subterrânea. Segundo Tucci (1998), quanto mais complexo são os sistemas e seus processos, mais desafiadores e necessários são os modelos que possibilitam prever situações futuras, algumas vezes passadas, porém sempre buscando direcionar ações de decisão.

Os primeiros registros da elaboração de modelos hidrológicos datam da década de 1930, entre eles destacam-se: a teoria da hidrógrafa unitária (Sherman, 1932) e a teoria da infiltração de Horton (1933), que buscaram identificar os fatores relacionados aos processos de transformação da precipitação em escoamento e suas interações. Até a década de 1950, os

métodos utilizados em hidrologia se limitavam ao uso de indicadores estatísticos relacionados os processos hidrológicos, os chamados modelos empíricos.

Na década de 1990, o modelo TOPMODEL foi considerado uma evolução por representar, ainda que de modo simplificado, os principais processos físicos do ciclo hidrológico (Beven *et al.*, 1997).

Atualmente, graças aos avanços no campo da computação, das técnicas numéricas e das formas de obtenção de dados espaciais, os modelos matemáticos suplantaram os modelos físicos por possibilitarem a aplicação de equações matemáticas e condições iniciais de contorno para descrever o fenômeno físico. Assim, a modelagem tornou-se ferramenta essencial para auxiliar, tanto na avaliação quanto no planejamento e na gestão dos recursos hídricos (Cabral & Demetrio, 2008).

Entretanto, acoplar os fenômenos do ciclo hidrológico em modelos matemáticos exige enorme quantidade de dados necessários ao ajuste dos parâmetros, muito dos quais não estão disponíveis. Assim, os algoritmos utilizados atualmente são diferenciados em função da representação do ciclo hídrico, que ora é bem mais detalhada para processos ligados ao fluxo de água superficial e ora detalha melhor os fluxos de água subterrânea. Devido a diferenciação dos modelos, convencionou-se chamar de modelos hidrológicos aqueles que melhor representam a parte superficial do fluxo e modelos de água subterrânea aqueles que descrevem detalhadamente os parâmetros da hidrogeologia dos aquíferos (Silva, 2007).

Programas como o *Surface Water Modeling System - SMS* (Owen *et al.*, 1996), *Rainfall-Runoff Model - TOPMODEL* (Beven *et al.*, 1997), *Mike-SHE* que emergiu do *European Hydrological System - SHE* (DHI Water and Environment, 2009) e *Soil Water Assessment Tool - Swat* (Arnold *et al.* 1998), são exemplos de ferramentas comumente utilizadas para manipular, analisar e compreender dados e medições associadas à modelagem de água de superfície. Outros *softwares* como MODFLOW2000 (Harbaugh *et al.*, 2000), FEFLOW (Trefry & Muffels, 2007), HydroGeoSphere (Therrien *et al.*, 2009), Groundwater Modeling System - GMS (Owen *et al.*, 1996) e OpenGeoSys - OGS (Kolditz & Shao, 2010), são largamente utilizados para interpretação e previsão de fluxos de água subterrânea. No entanto, alguns *softwares* como, por exemplo, o SWAT e o OGS, incorporaram ferramentas de interfaces com modelos como o MODFLOW e o GMS, respectivamente, para pré e pós processamentos, a fim de melhor representar fisicamente a interação entre os mananciais superficiais e subterrâneos.

O SWAT, que tem como principal objetivo modelar a produção de água, a produção e o transporte de sedimentos e a qualidade de água, em bacias hidrográficas complexas, considerando longos períodos de tempo. Embora haja módulo específico para os componentes subterrâneos no SWAT, modelos integrados com o MODFLOW são desenvolvidos através de diferentes métodos para calcular a quantidade de descarga de água subterrânea e superficial, determinadas pela análise hidrológica da bacia hidrográfica em estudo.

O OGS é um software de código aberto focado na simulação numérica de processos termo-hidro-mecânico/químico e, com base em conceitos orientados a objeto, descreve processos hidrológicos complexos através de métodos de elementos finitos e específicas condições de contorno. Este *software* permite a comunicação com o GMS através de uma interface simples de gerenciamento que importa dados do GMS para o OGS e vice-versa.

Contudo, o objetivo desses modelos é possibilitar o entendimento do comportamento dos processos hidrodinâmicos que ocorrem nas bacias hidrográficas, a partir de interpretação de problemas atuais e simulações de cenários futuros.

No Brasil, existem algumas iniciativas, como por exemplo, Silva (2007) que utilizou a modelagem integrada (interações rio-aquífero) para propor critérios de outorga dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, entretanto, a maioria das iniciativas agregaram apenas informação do meio físico.

Assim, para que a modelagem matemática sirva efetivamente à elaboração de programas de gerenciamento de recursos hídricos, deve-se considerar não apenas as questões relacionadas à disponibilidade, qualidade e quantidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, mas também questões relativas às demandas e conflitos atuais e potenciais entre os usuários no âmbito das bacias hidrográficas.

A inserção de aplicativos automáticos que gerenciem a demanda hídrica das bacias hidrográficas, segundo os usos múltiplos das águas, com critérios de outorga bem definidos, e a incorporação em seus atributos, de aspectos socioeconômicos, pode ser uma alternativa para mediação de conflitos pelo uso das águas nas bacias hidrográficas.

7.4 - Resultados e Discussão

Devido à ocupação antrópica significativa na bacia, observou-se uma forte pressão sobre os remanescentes da vegetação nativa, que têm reduzido os contatos entre eles. Esses contatos deveriam formar os necessários corredores para a fauna silvestre, cuja ausência pode determinar o isolamento de determinadas espécies em *habitats* insulares.

Considerando a proximidade da Unidade de Conservação de Águas Emendadas em relação à bacia do ribeirão Pipiripau, admite-se a possibilidade de recuperação dos habitats degradados da bacia, face à existência de corredores de dispersão, cujo solo permite o trânsito de animais silvestres.

Vale ressaltar que o sistema hidrológico refere-se a um conjunto integrado de elementos e processos, de modo que as águas superficiais e subterrâneas estão definitivamente inter-relacionadas. Nesse contexto, a superexploração do aquífero fraturado determina uma redução da quantidade de água do aquífero poroso, o que contribui para a diminuição da quantidade de água das nascentes.

Entretanto, em vários locais na bacia já se observa diversas agressões antrópicas, as quais estão refletindo significativamente no equilíbrio morfodinâmico da área e, conseqüentemente, na dinâmica e manutenção das águas subterrâneas e superficiais da região.

Os dados referentes às estações de captação de água superficial permitem observar que, no período de 1979 a 2009, as condições de estiagem prevaleceram na bacia hidrográfica, não tendo sido verificadas precipitações responsáveis por cheias. Ao contrário, após o ano de 1993, a tendência foi de redução das precipitações e, conseqüentemente das vazões. Além disso, observa-se que o uso da água, tanto para o abastecimento público quanto para a irrigação, extrapola o limite recomendado, fato que deverá contribuir, à médio prazo, para o aumento dos conflitos pelo uso da água.

Os conflitos pelo uso da água na bacia são frequentes e podem ser classificados como: conflito de destinação de uso, conflito de disponibilidade qualitativa e conflito de disponibilidade quantitativa.

Os conflitos de destinação de uso ocorrem, em maior intensidade, entre os agricultores do núcleo rural Santos Dumont e a CAESB. Com a intervenção da ANA, a expectativa é de que os atores envolvidos adotem medidas mais eficazes quanto ao uso múltiplo das águas do ribeirão.

O conflito de disponibilidade qualitativa decorre da poluição das águas do ribeirão, causada, principalmente, pela contaminação por agrotóxicos e efluentes domésticos, pelo lançamento direto no córrego de restos de animais e lixos orgânicos e inorgânicos, pela construção de fossas junto aos poços, etc.

O conflito de disponibilidade quantitativa decorre da exploração indiscriminada ou inadequada e da má distribuição das águas da bacia. É comum o uso de irrigação por sulco e por gravidade, quando o mais econômico seria a implantação de sistemas de irrigação mais por gotejamento e microaspersão. Além disso, a expansão da Agrovila Taquara aumentou a utilização de águas subterrâneas, sendo necessário o gerenciamento para evitar a superexploração dos aquíferos.

Os resultados confirmam que o acelerado crescimento populacional tanto rural como urbano do ribeirão Pípiripau, tem sido o principal responsável pelo aumento da demanda por água, fato que vem contribuindo significativamente para a escassez e a degradação dos recursos hídricos.

Constatou-se também, que a integridade dos recursos hídricos superficiais e subsuperficiais da bacia vem sendo ameaçada principalmente pela supressão da vegetação nativa tanto nas áreas rurais, devido à ocupação agropecuária, quanto nas áreas consideradas suburbanas, em decorrência da construção de moradias e outras benfeitorias.

Além disso, a dinâmica de crescimento, manutenção e restauração da vegetação, depende, direta ou indiretamente, da fauna local, tornando indispensável adotar medidas que

minimizam os efeitos da ampliação da infra-estrutura viária, responsável pela grande incidência de atropelamentos e pelo impedimento da livre dispersão dos animais.

Logo, percebe-se que a condição atual da bacia oferece sérios riscos à manutenção e à diversidade dos ecossistemas terrestres, embora ainda existam alguns habitats interligados e uma significativa fauna, provavelmente pelo fato da vegetação nativa estar presente em cerca de 32% da área total daquela unidade de planejamento e pela sua proximidade à Estação Ecológica de Águas Emendadas.

A falta de critérios na ocupação do solo em áreas residenciais, bem como a abertura de ruas sem observar aspectos da declividade do terreno, tem favorecido a ocorrência de erosões em algumas áreas, contribuindo também para o assoreamento da bacia.

Esse processo de erosão laminar tem influência direta na produção agrícola, devido ao carreamento da camada mais fértil do solo em direção as zonas mais baixas do terreno. Tal fato ocorre em alguns pontos da bacia, abrangendo áreas onde o manejo do solo mostra-se incipiente ou inadequado, em especial na área denominada “Mestre d’Armas”, próxima ao Vale do Amanhecer, onde a maior declividade do terreno e a ausência de medidas corretivas adequadas àquela situação aceleram a evolução de processos erosivos.

Além disso, a qualidade da água do ribeirão Pípiripau está seriamente comprometida em decorrência da contaminação por agrotóxicos e efluentes domésticos. Os resultados das coletas indicaram que os teores admitidos pelo CONAMA, de substâncias potencialmente prejudiciais, como mercúrio, aldrin, DDT, coliformes totais e fecais, foram ultrapassados em períodos chuvosos, inviabilizando seu uso não só pela população, mas até pela fauna silvestre.

Por outro lado, embora o entendimento de sustentabilidade ambiental seja restrita na comunidade da bacia do ribeirão Pípiripau, a utilização dos recursos hídricos assume diferentes perspectivas de acordo com a localização dos núcleos rurais na bacia do ribeirão Pípiripau.

A cultura da abundância de água nestas localidades ainda contribui para a errônea visão de que o recurso é ilimitado e de pouco valor econômico. Nesta ótica, os conflitos tornam-se evidentes somente quando começam existir limitações ao uso do recurso. Deste modo, pode-se inferir que a busca de soluções para a degradação, de qualquer recurso natural, provavelmente ocorrerá quando se apresentar algum tipo de conflito.

Tal situação percebe-se no núcleo rural Santos Dumont, onde as discussões se encontram em estágio bem mais avançado do que nos outros núcleos rurais localizados na bacia. A necessidade de racionalização da água, nos últimos anos, fez com que o poder público (ANA) e a comunidade local do núcleo Santos Dumont se unissem para discutir e negociar propostas de uso da água.

Além disso, o baixo nível de escolaridade da população e o baixo valor agregado aos produtos agrícolas são fatores que contribuem para a insatisfação e falta de perspectivas das comunidades quanto à melhora das condições de vida na bacia em estudo.

Com relação aos softwares de modelagem, é possível observar que, embora robustos, faltam ainda aplicativos capazes de integrar as questões sociais nos modelos hidrológicos. A gestão dos recursos hídricos deve contemplar a gestão ambiental e os avanços tecnológicos devem, nos próximos anos, motivar a inserção de aplicativos que contemple a complexidade das questões sociais e políticas.

Diretrizes gerais para inserção de aspectos socioeconômicos nos modelos hidrológicos

Seja qual for a destinação do uso das águas de uma região, a manutenção das condições de equilíbrio dos hidrosistemas depende da eficiência da gestão dos recursos hídricos. Com base nos aspectos legais, sociais, ambientais e técnicos é possível subsidiar a gestão integrada dos recursos hídricos de modo amplo, em consonância com os preceitos da sustentabilidade.

A outorga de direito de uso de água dos recursos hídricos é um dos aspectos legais pelo qual o uso integrado e múltiplo pode ser tecnicamente aplicado, pois assegura o controle quantitativo e qualitativo dos usos das águas e o efetivo exercício de direitos a seu acesso. A referida outorga é concedida aos usuários por meio de valores de vazões de captação, por tempo determinado e segundo critérios previamente definidos.

A legislação brasileira relativa à outorga de recursos hídricos superficiais estabelece as modalidades de vazão para que seja mantido um fluxo residual mínimo à jusante das derivações. As vazões mínimas mais comuns são denominadas $Q_{7,10}$ e Q_{90} . A $Q_{7,10}$ é definida como a vazão mínima medida por 7 dias consecutivos com recorrência de 10 anos. A Q_{90} representa a vazão de permanência por pelo menos 90% do tempo.

Com relação à outorga de águas subterrâneas, a legislação é negligente quando não define critérios técnicos, estabelecendo procedimentos diversos em função da disponibilidade, tipo de aquífero, tempo de bombeamento, taxa de recarga, dentre outros.

Alguns autores, como Gonçalves (1997) e Corrêa (2011), propuseram percentuais de vazões outorgáveis para o Distrito Federal, com base na favorabilidade dos sistemas aquíferos, definida segundo seus parâmetros hidrodinâmicos e nas condições de uso e ocupação da superfície local. Para Corrêa (2011), a emissão de outorgas deve estar associada às características inerentes de cada poço, conforme os seguintes critérios técnicos: análise qualitativa de dados de ensaios de bombeamento, rebaixamento disponível, capacidade específica e tempo de bombeamento diário do poço.

A metodologia desenvolvida por Corrêa (2011) propõe, ainda, 19 Unidades de Gerenciamento para o DF, estabelecidas a partir da integração das características hidrodinâmicas dos diferentes aquíferos e do tipo de uso, se rural ou urbano, das áreas de captação.

De acordo com as outorgas de recursos hídricos superficiais estabelecidas pela legislação vigente e as outorgas definidas segundo as Unidades de Gerenciamento, propostas por Correia (2011), é possível modelar os aspectos quantitativos e qualitativos que definem a disponibilidade de recursos hídricos numa bacia hidrográfica. A expectativa é de que, nos próximos anos, os *softwares* de modelagem incorporem aplicativos orientados a objetos capazes de gerenciar aspectos socioeconômicos segundo os usos múltiplos.

A combinação de atributos e comportamentos, na linguagem de programação orientada a objeto, pode "conversar" de modo a definir as vazões a serem outorgadas conforme o uso múltiplo das águas, estabelecendo usos prioritários em situações de escassez. Como as demandas por água nos variados usos vêm aumentando, os conflitos de interesses envolvendo a água também vêm crescendo. Por isso, os referidos aplicativos devem gerenciar, por meio das vazões outorgadas, os conflitos entre os diversos setores, como: elétrico e hidroviário, saneamento e turismo, irrigação e elétrico, abastecimento e agricultura e outros, a depender das atividades socioeconômicas desenvolvidas em cada bacia.

7.5 - Conclusões e Recomendações

Nos dias de hoje é imprescindível tratar das interações que envolvem o homem e a natureza, tendo em vista as implicações das alterações qualitativas e quantitativas, dos sistemas ambientais, para a vivência das comunidades humana.

Na bacia do ribeirão Pípiripau, as atividades humanas vêm desestabilizando os ecossistemas da região e, conseqüentemente, modificando as organizações espaciais. A compreensão da complexidade desses sistemas torna-se fundamental ao estabelecimento da proposta de planejamento e desenvolvimento sustentável na referida bacia.

Mudanças ambientais na região, tais como, poluição hídrica e perda da biodiversidade, alteraram as características e a qualidade dos componentes do sistema ambiental biofísico, relevantes à qualidade de vida da comunidade local.

A evolução dos processos de degradação ambiental e poluição dos cursos d'água na bacia determinam que o consumo de água *in natura* compromete diretamente a saúde de sua comunidade rural, enquanto que nas regiões urbanas, o tratamento da água para abastecimento público e a coleta e tratamento dos esgotos passam a exigir processos mais onerosos para garantir a qualidade de vida daquela população. A reversão desse quadro é um processo lento e gradual, que somente pode ser alcançada mediante o empenho da sociedade na conscientização de todos os atores envolvidos quanto à necessidade de utilização de técnicas conservacionistas. Neste sentido, valorizar a participação da comunidade local em todas as instâncias do processo decisório é uma tentativa de garantir as mudanças de comportamento no plano pessoal e social, entendidas aqui como a única forma de se alcançar a sustentabilidade da vida.

Estudos mais detalhados devem ser desenvolvidos quanto a disponibilidade e demanda das águas da bacia. A expectativa é de que os modelos matemáticos possam incorporar em seus aplicativos ferramentas automáticas capazes de modelar não só os processos hídricos que ocorrem na superfície e em subsuperfície, mas também aqueles de âmbito social, as demandas e os conflitos. Esta modelagem deve contemplar as particularidades de cada região como, por exemplo, a sazonalidade do clima observada na região do Pípiripau. A compatibilidade entre uso e conservação pode permitir a sobreexploração dos recursos hídricos em períodos de estiagem com a devida compensação em períodos chuvosos.

Acredita-se que, assim, os softwares de modelagem poderão subsidiar o planejamento e a gestão dos recursos hídricos por meio do gerenciamento das vazões outorgadas.

Conclusões Finais e Recomendações

A complexidade e variabilidade lateral do meio físico e dos padrões hidrodinâmicos dos aquíferos impõem certa dificuldade à representação em modelos matemáticos, de modo sistêmico, não só das interações dos fluxos de água superficial e subterrânea, mas, também, dos impactos sobre os recursos hídricos decorrentes das atividades humanas. Nesta pesquisa, a escassez de informações hidrogeológicas exigiu a compilação e a análise de dados por diferentes métodos.

Verificou-se que a aplicação e a avaliação de funções de pedotransferência, adaptadas a solos de países com clima tropical, permitem boas estimativas de condutividade hidráulica, conforme mostram os resultados, descritos no Capítulo 3, obtidos para solos do Distrito Federal. Constatou-se ainda, que a heterogeneidade e a anisotropia dos aquíferos porosos decorrem, em grande parte, de parâmetros texturais e estruturais dos solos, além de feições de bioturbação (por raízes, insetos e até vertebrados).

Os resultados dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos por meio do método de Cooper & Jacob, que utiliza dados de capacidade específica, mostraram a eficiência deste método para estimar a transmissividade dos aquíferos fraturados do Distrito Federal. Este método pode ser útil à avaliação de testes de bombeamento em regiões de clima tropical, aonde predominam rochas metassedimentares semelhantes às aqui analisadas.

Os resultados sugerem que os métodos para determinação de parâmetros hidrodinâmicos (condutividade hidráulica e transmissividade) podem ser aplicados para regiões cujos contextos pedológico e geológico sejam similares, notadamente em áreas de clima tropical-subtropical, com solos espessos e feições geológicas representados por metassedimentos de baixo grau metamórfico.

O modelo numérico tridimensional, desenvolvido para a bacia do Pípiripau, permitiu integrar não só os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos porosos e fraturados da região do Distrito Federal, mas também dados climatológicos e geomorfológicos da bacia do Ribeirão Pípiripau. Entretanto, a complexidade da representação geométrica do modelo demandou mais tempo do que o previsto, fato que limitou a inserção de outros processos hidrodinâmicos e socioeconômicos necessários à modelagem integrada. Além disso, limitações inerentes ao *software* utilizado, como, por exemplo, a dificuldade de geração dos elementos prismáticos pelo mapeamento das superfícies de contatos geológicos, a incorporação de fraturas, falhas, drenagem e variações da espessura das camadas, também contribuíram para as deficiências, em termos de representação dos meios, observadas no modelo. No entanto, sabe-se que a implementação de métodos numéricos envolvendo a descrição geométrica dos geossistemas, com a aplicação de análise de elementos finitos, é de vital importância para se investigar e modelar meios complexos e integrados. Apesar das dificuldades apresentadas, os resultados das simulações numéricas, em estado estacionário, apresentaram boa correlação entre os

dados medidos em campo e os estimados pelo modelo. Assim, o modelo aqui desenvolvido para a bacia do Ribeirão Pipiripau, embora não seja considerado um modelo validado, é a base para a integração de dados futuros, em particular, dos mecanismos de recarga e descarga em longos períodos, das interações rio-aquífero, das reservas hídricas disponíveis e das demandas locais.

O modelo aqui desenvolvido representa apenas o primeiro passo em direção a um esforço abrangente para a análise de cenários futuros em direção a gestão sustentável dos recursos hídricos na bacia do Ribeirão Pipiripau.

Outro aspecto do modelo a ser ressaltado, diz respeito à dificuldade de se estabelecer a simetria entre os limites da bacia hidrográfica e os limites da bacia subterrânea na região do Pipiripau. Considerou-se no modelo os limites da bacia hidrográfica até o ponto de captação da Estação Frinocap, devido à disponibilidade de dados que viabilizou o desenvolvimento do modelo na região. Entretanto, a sustentabilidade dos hidrossistemas requer considerar o caráter integrado dos fluxos de água superficial e subterrânea. Desse modo, recomenda-se pesquisa mais detalhada dos limites da bacia subterrânea na área de estudo, a fim de que a gestão das águas, naquela região, seja subsidiada por critérios técnicos/científicos mais adequados.

A análise das interações que envolvem o homem e a natureza na bacia do Ribeirão Pipiripau mostrou o comprometimento dos ecossistemas da região, face aos impactos das atividades agrícolas na bacia. Verificou-se que a integridade dos recursos hídricos vem sendo ameaçada não só pelo aumento da demanda por água, mas também pela supressão da vegetação nativa e pelo uso indiscriminado de insumos agrícolas. Contudo, ressaltou-se que a gestão dos recursos hídricos deve contemplar a gestão ambiental e que os *softwares* de modelagem devem, nos próximos anos, inserir aplicativos que contemplam a complexidade das questões sociais e políticas, como alternativa à mediação de conflitos pelo uso da água. Nesses aplicativos, os gerenciadores devem permitir avaliar a concorrência entre usuários, a determinação de usuários preferenciais e critérios objetivos para distribuição das vazões em diferentes períodos do ano, de modo a compatibilizar os usos múltiplos com distribuição o mais equânime possível para garantir a conservação dos recursos hídricos.

Independentemente das imperfeições do modelo proposto e da necessidade dos futuros trabalhos recomendados, a simulação numérica e a análise dos processos dinâmicos e socioambientais realizados na bacia do Ribeirão Pipiripau mostraram que, embora os níveis de água subterrânea não estejam comprometidos do ponto de vista quantitativo, pelo menos para o período analisado, o grau de degradação observado na bacia sugere o comprometimento qualitativo dos sistemas hídricos da região.

Referências Bibliográficas

- Ab'Saber, A.N. 1977. Os domínios morfoclimáticos na América do Sul: primeira aproximação. *Geomorfologia*, v.52, p.17-28.
- ADASA. 2010. Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal. Boletim de Monitoramento da Bacia do Ribeirão Pípiripau. Brasília/DF.
- Agarwal, R.G. 1980. A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyze pressure build-up and other test data. SPE 9289 - 55th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, TX, Sept. 21-24.
- Albuquerque, R.W. 2009. *Levantamento de malha fundiária e diagnóstico ambiental das propriedades da bacia do Pípiripau (DF/GO) para a participação no Programa Produtor de Água*. Final work of undergraduate in Forest Engineering.
- Alipaz, S.M.F. 2010. Quantificação e Valoração Econômica dos Serviços Ambientais Redutores de Sedimentação na Bacia do Ribeirão Pípiripau. Dissertação de Mestrado. *Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília*. Brasília/DF
- Almeida, L., Resende, L., Rodrigues, A.P., Campos, J.E.G., 2006. Hidrogeologia do Estado de Goiás Superintendência de Geologia Mineração. Governo do Estado de Goiás. Brazil. 230.
- ANA. 2004. Agência Nacional de Águas. Estudos de disponibilidade de água para a Bacia do Pípiripau" ("Availability Studies of Water for the Pípiripau Basin"). <http://www.ana.gov.br>.
- ANA. 2009. Agência Nacional de Águas. Portal HidroWeb – Banco de Dados. Site: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: 16/01/2009.
- ANA. 2010. Agência Nacional de Águas. The Nature Conservancy, TNC; Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal, EMATER; Secretaria de Agricultura Pecuária e Abastecimento, SEAPA. Programa Produtor de Água: Relatório de diagnóstico socioambiental da bacia do ribeirão Pípiripau. 59p.
- ANA. 2011. Agência Nacional de Águas. Relatório de diagnóstico socioambiental da bacia do Ribeirão Pípiripau. Brasília/DF.
- Arnold, J.G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R.S., 1998. Large-scale hydrologic modeling and assessment - Part I: model development. *JAWRA Journal of American Water Resources Association*, 34 (1): 73–89.
- Aster, R.C., Borchers, B., Thurber, C.H. Parameter Estimation and Inverse Problems Elsevier, Amsterdam (2005) 301 p.
- Barreto, C.E.A.G.; Wendland, E.; Gomes, L. H.; Marcussi, F. F. N. 2006. A interação rio-aquífero na bacia do Ribeirão da Onça: aplicação de equação empírica para estimativa do escoamento de base. In: Anais do XIV Congresso Brasileiro de Água Subterrânea, Curitiba. p.20.
- Barros, J.G.C. 1994. Geological and hydrogeological characterization of the Federal District. In: Cerrado characterization, occupation and prospects. Brasília/DF: UnB/SEMATEC; 265-283.
- Bell, J.W. 2006. Las Vegas Valley: land subsidence and fissuring due to groundwater withdrawal. Disponível em: <http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/hydrology/impacts/hydrology/vegas_gw/>. Acesso em: 26/12/2008.
- Benetti, A.D.; Lanna, A.E.; Cobalchini, M.S. 2003. Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 8: 2.
- Benites, V.M., Machado, P.L.O.A., Fidalgo, E.C.C., Coelho, M.R., Madari, B.E., 2007. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*, v. 139, pp. 90-97.
- Bertoni, C.B.; Tucci, C.E.M. 2009. Precipitação. In: Hidrologia: ciência e aplicação. Tucci, C.E.M. (org.) 4ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. ABRH. p. 177- 242.
- Beven, K.J.; Lamb, R.; Quinn, P.; Romanowicz, R.; Freer, J. 1995. TOPMODEL. In: SINGH, V.P. (ed.). Computer Models of Watershed Hydrology. *Water Resource Publications*, Colorado, p.627-668.

- Beven, K.J.; Kirkby, M.J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, v.24, n.1, p.43–69.
- Beven, K.J. 1997. "TOPMODEL: a critique". *Hydrological Processes*, 11: 1069-1085.
- Beyer, W. 1964. Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. *Wasserwirtsch-Wassertechn.* v. 14, pp.165-168.
- Bouma, J., Van Lanen, J.A.J., 1987. Transfer functions and threshold values: from soil characteristics to land qualities. In: Beek, K.J. et al. (Eds.). *Quantified Land Evaluation. Proc. Workshop ISSS and SSSA, Washington, D.C., April 27-May 2, 1986.* Int. Inst. Aerospace Surv. and Earth Sci. Publ. 6, ITC, Enschede, pp. 106-110.
- Brasil. 1965. Código Florestal Brasileiro. Criado pela Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 O Código estabelece limites de uso da propriedade, que deve respeitar a vegetação existente na terra, considerada bem de interesse comum a todos os habitantes do Brasil.
- Brasil. 1988. Constituição Federal.
- Brasil. 1986. Resolução CONAMA nº 20, de 18 de Junho de 1986. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Estabelece a classificação das águas, doces, salgadas, salobras e salinas do Território Nacional.
- Brasil. 1997. Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do Art. 21 da Constituição Federal.
- Brasil. 1998. Decreto nº 2.612 de 03 de junho de 1998 - Regulamenta o Conselho Nacional de Recursos Hídricos e dá outras providências.
- Brasil. 2000a. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000 - Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências.
- Brasil. 2000b. Resolução CNRH nº 7, de 21 de junho de 2000 - Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Institui a Câmara Técnica Permanente de Integração de Procedimentos, Ações de Outorga e Ações Reguladoras, de acordo com os critérios estabelecidos no Regimento Interno do CNRH.
- Brasil. 2001. Resolução CNRH nº 16, de 08 de maio de 2001- Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Estabelece critérios gerais para outorga de direito de uso de recursos hídricos.
- Brasil. 2006. Resolução nº 340, de 10 de agosto de 2006. Resolve outorgar aos usuários listados na Tabela 1, doravante denominados outorgados, o direito de uso de recursos hídricos para captação de água no ribeirão Pipiripau.
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. Civil Engineering Dept., Colorado State University, Fort Collins, CO, Hydrological Paper 3, pp. 27.
- Bruand, A., Tessier, D., Baize, D., 1988. Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux: importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, v. 307, pp.1937–1941.
- Cabral, J.J.S.P.; Demetrio, J.G.A. 2008. Aplicação de Modelos em Hidrogeologia. In: Fernando A. C. Feitosa; João Manoel Filho, Edilton Feitosa; José Geilson Demétrio. (org.). *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM, , v. 1, p. 687-707.
- Cadamuro, A.L.M., 2002. Aquíferos Fraturados Proposta, Avaliação e Aplicabilidade de Técnicas de Recarga Artificial em para Condomínios Residenciais do Distrito Federal. Brasília: Universidade de Brasília. (Ph.D. thesis). 130 p.
- CAESB. 2001. Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. *Plano de Proteção Ambiental do Ribeirão Pipiripau* (Environmental Report of Pipiripau basin).
- Camelo, A.P.S. 2011. *Quantificação e valorização do serviço ambiental hidrológico resultante da recomposição de passivos ambientais na bacia hidrográfica do Ribeirão Pipiripau*. MSc Thesis (PPG EFL). DM-155/2011, Faculty of Technology, Department of Forest Engineering, University of Brasília. Brasília, DF, Brazil, 78p.
- Campana, N.A.; Monteiro, M.; Koide, S.E.; Moraes, O.C. 1998. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. MTARH-UnB/SRH/SEMATEC. Brasília.

- Campos, J.E.G., Freitas-Silva, F.H., 1998. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. IEMA / SEMATEC / UnB, Brasília, Brazil, pp.1-85 (Vol. IV- Technical Report).
- Campos, J.E.G., Tröger U. 2000. Groundwater Occurrence in Hard Rocks in the Federal District of Brasília. A sustainable supply? Proceedings do XXX IAH Congress. Cape Town. 109-113.
- Campos, J.E.G. 2004. Hydrogeology of the Federal District: bases for the management of groundwater resources. *Revista Brasileira de Geociências*. 34: 41-48.
- Campos, J.E.G. 2010. Borehole completion report and pumping tests of Wells in rural and urban Areas in the Federal District. Joint Cooperation Project CAESB/UnB Água DF.
- Campos, J.E.G. 2011. *Relatório do Meio Físico e Biótico*. In: ZEE – Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Federal. Chapter III. 172p.
- Carmelo, A.C. 2002. *Caracterização de aquíferos fraturados por integração de informações geológicas e geofísicas*. Geociences Institut - University of Brasília. Brasília, DF, Brazil, 179p. (PhD Thesis)
- Carriger, S. 2005. Reducción de la pobreza por medio de la gestión integrada de las aguas subterráneas y superficiales. Centro Consultivo do Global Water Partnership, IWMI, 10p.
- Carta de Brasília, 2000. Documento Resultante do Fórum Nacional Declaração de Helsinki: Perspectivas da Sociedade Brasileira. Brasília: Anis - Instituto de Bioética Direitos Humanos e Gênero/ Conselho Federal de Medicina/Fundação Oswaldo Cruz. http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/carta_brasilia_odm.pdf
- Carvalho, J.C.; Sales, M.M.; Souza, N.M.; Melo, M. T. S. 2006. Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC.
- Chow, V.; Maidment D R; Mays L W. 1988. Applied Hydrology. EUA. McGraw-Hill. 572p.
- Christofolletti, A. 1999. *Modelagem de sistemas ambientais*. São Paulo: Edgard Blucher
- Cicco, V.; Faria, A.J.; Arcova, F.C.S.; Shimomichi, P.Y. 1987. Determinação do balanço hídrico com emprego de bacia hidrográfica experimental em mata natural secundária. Boletim Técnico do Instituto Florestal de São Paulo, v.41,n.1,p.55-67.
- CODEPLAN. 1984. Companhia de Desenvolvimento do Planalto. *Atlas do Distrito Federal*. Brasília, GDF. 78p.
- Coimbra, A.R.S.R., 1987. Balanço hídrico preliminar do Distrito Federal. In: Inventário Hidrogeológico do Distrito Federal. (GDF/CAESB) Brasília/DF, Brazil, pp.50-78.
- Collischonn, W. Simulação hidrológica em grandes bacias. 2001. Porto Alegre: UFRGS. Tese Doutorado. 194p.
- Collischonn, W.; Delgado, M.C.; Kirchheim, R.; Silva, B.C. 2005. Análise do efeito da extração de água subterrânea sobre a disponibilidade de água superficial na bacia do rio Grande (BA). In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa. Anais do SVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa : ABRH.
- Cooper, HH & Jacob CE. 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. American Geophyscis Union Transactions. 27: 526-534.
- Corrêa, P.M. 2011. Critérios para a Determinação de Vazões Outorgáveis em Mananciais Subterrâneos: Aplicação no Distrito Federal.
- Costa, W.D. 2000. Uso e Gestão de Água Subterrânea. In: Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. Feitosa, F.A.C. & Manoel, Filho J. (Coord.). Fortaleza – CE. CPRM/REFO, LABHID-UFPE. p.341-367.
- Cresswell, H.P., Mckenzie, N.J., Paydar, Z., 1999. A strategy for determination of hydraulic properties of Australian soil using direct measurement and pedotransfer functions. In: Van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., Wu, L. (Eds). Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. Riverside, CA: University of California. pp. 1143-1159.
- Custódio, E. 2002. Overexploitation, what does it mean? *Hydrogeology Journal*, 10 (2), 254–277.

- Danalatos, N.G., Kosmas, C.S., Driessen, P.M., Yassoglou, N., 1994. Estimation of the draining soil moisture characteristic from standard data as recorded in routine soil surveys. *Geoderma*, v. 64, pp. 155-165.
- DeVries, J.J.; Hromadka, T.V. 1993. "Computer models for surface water." *Handbook of hydrology*, David R. Maidment, ed., McGraw-Hill, New York.
- Dexter, A.R., 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v. 120, pp. 201–214.
- DHI. 2009. Water & Environment (Ed.). MIKE SHE. Hørsholm, Dänemark.
- Dingman, S.L. 2002. Physical Hydrology. 2ª Edição. Nova Jersey: Prantice Hall, p.646.
- Distrito Federal (DF). 2001a. Lei nº 2.725, de 13 de junho de 2001 - Institui a Política de Recursos Hídricos do Distrito Federal, cria o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Distrito Federal e dá outras providências (revoga a Lei nº 512, de 28 de julho de 1993).
- Distrito Federal (DF). 2001b. Decreto nº 22.358, de 31 de agosto - Dispõe sobre a outorga de direito de uso de água subterrânea no território do Distrito Federal de que trata o inciso II, do artigo 12, da Lei n.º 2.725 de 13 de junho de 2001, e dá outras providências.
- Distrito Federal (DF). 2001c. Decreto nº 22.359, de 31 de agosto - Dispõe sobre a outorga de direito de uso de recursos hídricos no território do Distrito Federal e dá outras providências.
- Distrito Federal (DF). 2004. Lei nº 3.365, de 16 de junho de 2004 – Cria a Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal – ADASA/DF e dá outras providências.
- Distrito Federal (DF). 2006. Resolução nº 350, de 23 de junho de 2006 .Estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga do direito de uso dos recursos hídricos em corpos de água de domínio do Distrito Federal e em corpos de água delegados pela União e Estados.
- Domenico, P.A.E; Schwartz, F.W. 1990. Physical and chemical hydrogeology. New York: John Wiley e Sons, 824p.
- Driscoll FG. 1986. Groundwater and Wells (2nd ed.): Johnson Filtration Systems, St. Paul, Minnesota, 1089p.
- Doherty, J. 2010. PEST Model Independent Parameter Estimation User Manual: 5th Edition. Watermark Numerical Computing.
- Duffield, G.M. 2007. AQTESOLV for Windows Version 4.5. User's Guide. Reston, Virginia: HydroSOLVE Inc. Available at <http://www.aqtesolv.com/manual.asp>.
- EMBRAPA, 1978. Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal. Boletim Técnico nº53. Rio de Janeiro, Brazil. 455 p.
- EMBRAPA, 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, 2 ed. EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, Brazil. 412 p.
- Faria, A. 1995. Estratigrafia e sistemas deposicionais do Grupo Paranoá nas áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D'Aliança - Alto Paraíso de Goiás. Brasília: Universidade de Brasília/ Instituto de Geociências. (Ph.D. thesis). 199 p.
- Feitosa, F.A.C *et al.* (coord.) 2008. Hidrogeologia conceitos e aplicações. 3 ed. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID-UFPE, 812 p.
- Feitosa, F.A.C. & Manoel Filho, J. (coords.) 1997 - *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*, Fortaleza: CPRM / LABHID – UFPE, 412 p.
- Fetter, C.W. 2000. Applied hydrogeology. 4th Edition. NJ: Prentice Hall. 598 p.
- Fiore, J.P.O., Campos, J.E.G., Almeida, L., 2010. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do Estado de Goiás. *Geociências*, v. 29, n. 2, pp. 229-235.
- Freeze, R. A.; Cherry, J. A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Ins., Englewood
- Freeze, R. A.; Witherspoon, P.A., 1967, Theoretical analysis of regional groundwater flow, 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation: *Water Resources Res.*, v. 3, p. 623-634.

- Gaiser, T., Graef, F., Cordeiro, J.C., 2000. Water retention characteristics of soils with contrasting clay mineral composition in semi-arid tropical regions. *Australian Journal of Soil Research*, v. 38, pp. 523-526.
- Geuzaine, C. and Remacle, J.F. 2009. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume 79, Issue 11, pages 1309-1331.
- Girard, P.; Da Silva, C. J.; Abdo, M. 2003. River-groundwater interactions in the Brazilian Pantanal – The case of the Cuiabá River. *Journal of Hydrology*, v. 283. P. 37 – 66.
- Gonçalves, T.D., 2007. Geoprocessamento como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos na região do Distrito Federal. Universidade de Brasília/Instituto de Geociências. Brasília, Brazil. (M.Sc. dissertation). 225 p.
- Gonçalves, T.D.; Lohe C.; Campos, J.E.G. Submitted to Geoderma - a. Porous aquifer from the Federal District, Brasil: Characterization and Evaluation of Hydraulic Conditions.
- Gonçalves, T.D.; Lohe C.; Campos, J.E.G. Submitted to Hydrological Processes - b. Evaluation of Different Pumping Tests Methods Applied to Fractured Aquifers: Case Study in the Federal District, Brazil
- GREENTEC. 2010. Empresa de Tecnologia Ambiental. Mapa de Uso do Solo e Cobertura Vegetal 2009. Zoneamento Ecológico-Econômico do DF.
- Hantush, M.S. 1961. Drawdown around a partially penetrating well. *Journal of the Hydrology* 87: 83-98.
- Hantush MS. 1964. Hydraulics of wells. In: *Advances in Hydrosience*. Academic Press: Inc., New York, 281-442.
- Harbaugh, A.W., E.R. Banta, M.C. Hill, and M.G. McDonald. 2000. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model—User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process. USGS Open-File Report 00-92. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey.
- Heitfeld, K.H., 1979. Durhlassigkeitsuntersuchungen mittels. WD-Test.-Mitt. Ing.- u. Hydrogeol. 9, pp.175–218.
- Hillel, D. 1972. The field water balance and water use efficiency. In: *Optimizing the soil physical environment towards greater crop yields*. New York: Academic Press. p.79-100.
- Hoodnett, M.G., Tomasella, J., 2002. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new water retention pedotransfer function developed for tropical soils. *Geoderma*, v. 108, pp. 155-180.
- Horton, R.E. 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*. 1933. 14: 446 – 460.
- Huntley D. 2000. Analytic determination of hydrocarbon transmissivity from baildown tests, *Ground Water* 38: 46-52.
- HydroGeoLogic. 2006. MODHMS: a comprehensive MODFLOW based hydrologic modeling system, Version 3.0, Code documentation and user's guide.
- IBGE. 2011. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Atlas do Censo Demográfico 2010 <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010>.
- INMET. 2011. Instituto Nacional de Meteorologia. Estações automáticas. Disponível em: www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto.
- ISO, 2012. Geotechnical investigation and testing, Geohydraulic testing, Part 2: Water permeability tests in a borehole using open systems, Final Draft, Ref.: ISO/FDIS 22282-2:2012(E).
- Kaiser, I.M. 2006. "Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos," Tese de Doutorado, USP, São Carlos.
- Kalbacher, T.; Mettier, R.; Mcdermott, C.; Wang, W.; Kosakowski, G.; Taniguchi, T.; Kolditz, O.. 2007. *Geometric modelling and object-oriented software concepts applied to a heterogeneous fractured network from the Grimsel rock laboratory*. *Comput Geosci* 11:9–26.

- Karmann, I. 2000. O ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: Wilson Teixeira; Thomas Rich Fairchild; Maria Cristina Motta de Toledo; Fabio Taioli. (Org.). Decifrando a Terra. 1ª ed. São Paulo: Oficina de textos. p. 113-138.
- Kim, N.W.; Chung, I.M.; Won, Y.S. 2004a. The development of fully coupled SWAT–MODFLOW model (I) evaluation of model J. Korea Water Resour. Assoc., 37 (6) (2004), pp. 513–521 (in Korean)
- Kim, N.W.; Chung, I.M.; Won, Y.S. 2004b. The development of fully coupled SWAT–MODFLOW model (II) evaluation of model J. Korea Water Resour. Assoc., 37 (6) (2004), pp. 513–521 (in Korean)
- King L.C. 1956. A geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, 18(2):147-165.
- Kolditz, O. 1995. Modelling flow and heat transfer in fractured rocks: dimensional effect of matrix heat diffusion. *Geothermics*, 24(3): 421- 437.
- Kolditz, O. and Shao, H. 2010. OpenGeoSys Developer Benchmark Book. <http://www.opengeosys.net>.
- Kollet, SJ; Maxwell, RM. 2006. Integrated surface-groundwater flow modeling a free-surface overland flow boundary condition in a parallel groundwater flow model. *Advanced Water Resources* 29(7): 945–958.
- Kruseman GP, de Ridder NA. 1990. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data (2nd ed.), Publication 47. Intern. Inst. for Land Reclamation and Improvement. Wageningen. The Netherlands, 370p.
- Larkin, R.G.; Sharp Jr., J.M. 1992. On the relationship between river-basin geomorphology, aquifer hydraulics, and ground-water flow direction in alluvial aquifers. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 104, p. 1608-1620. Disponível em: <<http://www.gsjournals.org/archive/0016-7606/104/12/pdf/i0016-7606-104-12-1608.pdf>>. Acesso em: 20/10/2008.
- Larson, K.J.; Basagaoglu, H.; Mariño, M.A. (2001). Prediction of optimal safe groundwater yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model. *Journal of Hydrology*, 242: 79-102.
- Lemos, R.C., Santos, R. D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 1984. 2.ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Embrapa-SNLCS. 46p.
- Llamas, M.R.; Martinez Santos, P. 2006. Significance of the silent revolution of intensive groundwaters use in world water policy. In: Rogers, P. P.; Llamas, M. R.; Martinez Cortina, M. (Ed.). *Water crisis: myth or reality?* Espain: Fundación Marcelino Botín, Taylor & Francis. p.163-80.
- Llamas, R. 2004. Água e ética – Uso da água subterrânea. Série: Água e Ética, ensaio 7. França: Unesco, 39 p.
- Lohe, C.; Gonçalves, T.D.; Campos, J.E.G. Submitted to Hydrological Processes. Evaluation of diferente pumping test methods applied to fractured aquifers: case study in the Federal District, Brazil.
- Lombardi-Neto, F.; Bellinazzi Júnior, R.; Galeti, P. A.; Bertolini, D.; Lepsch, I. F.; Oliveira, J. B. Nova abordagem para o cálculo de espaçamento entre terraços. Simpósio sobre terraciamento agrícola. Campinas, 1989. Fundação Cargill. p. 99-124.
- Lousada, E.O., Campos, J.E.G., 2005. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 3, pp. 407-414.
- Mace RE. 1997. Determination of transmissivity from specific capacity tests in a karst aquifer. *Ground Water* 35: 739-742.
- Machado, R. E. 2002. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. Tese de doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

- Manoel-Filho, J. 2000. Ocorrência das Águas Subterrâneas. In: Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. Feitosa, F.A.C. & Manoel, Filho J. (Coord.). Fortaleza – CE. CPRM/REFO, LABHID-UFPE. p.13-32.
- Markstrom SL, Niswonger RG, Regan RS, Prudic DE, Barlow PM. 2008. GSFLOW: coupled ground-water and surface-water flow model based on the integration of the Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS) and the Modular GroundWater Flow Model (MODFLOW-2005). US Geological Survey Techniques and Methods 6–D1.
- Martins, E. S. & Baptista, G. M. M. 1998. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In: Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal. IEMA/ SEMATEC/ UnB. Brasília. Parte II. 53p.
- Maxwell, R.M.; Miller, N.M. 2005. Development of a Coupled Land Surface and Groundwater Model. *Journal Hydrometeor.* 6: 233–247.
- Mckenzie, N.J., Jacquier, D.W., 1997. Improving the field estimation of saturated hydraulic conductivity in soil survey. *Australian Journal of Soil Research*, v. 35, pp. 803-825.
- Meinzer, E.O. 1949. *Physics of the earth*, pt. 9, Hydrology. New York: Dover Pub. 712 p.
- Miles, B.; Kalbacher, T.; Kolditz, O.; Chen, C.; Wang, W. and Peter, A. 2007. *Development and parameterisation of a complex hydrogeological model based on high-resolution direct-push data*. *Environmental Geology*, 52(7): 1399 – 1412.
- Minasny, B., Mcbratney, A.B. 2002. The neuro-m method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. *Soil Science Society of American Journal*, v. 66, pp. 352-361.
- Minasny, B., Mcbratney, A.B., Bristow, K.L., 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. *Geoderma*, v. 93, pp. 225-253.
- Moench AF. 1984. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. *Water Resources Research* 20: 831-846.
- Moench AF. 1988. The response of partially penetrating wells to pumpage from double-porosity aquifers. *Proceedings of the International Conference on Fluid Flow in Fractured Rocks*, Atlanta, GA, May 16-18.
- Monteiro, C.A.F. 1951. Notas de Figueiredo. Notas para estudo do clima do Centro-Oeste brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia*.
- Moraes LL. 2010. Borehole Completion Report and Pump tests of Wells in Rural and Urban Areas in the Federal District. Joint Cooperation Project CAESB/UnB/Agua DF.
- Mualem, Y., 1976. A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v. 12, pp. 513–522.
- Myers, N.; Mittermeyer, R.A.; Mittermeyer, C.G.; Fonseca, G.A.; Kent, J. 2005. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*. p. 403, 853-858.
- Neuman, S.P. 1972. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response of the water table. *Water Resources Research* 8: 1031-1045
- Novaes Pinto, M., 1994a. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: Novaes Pinto, M. (org). *Cerrado: Caracterização, Ocupação e Perspectivas*. Brasília. Editora UnB. 2a ed., pp. 285-320.
- Novaes Pinto, M., 1994b. Paisagens do cerrado no Distrito Federal. In: Novaes Pinto, M. (org). *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*. 2a ed. Brasília:UnB. 1994, p. 511-542.
- Oliveira, L.B., Ribeiro, M.R., Jacomine, P.K.T., Rodrigues, J.J.V., Marques, F.A., 2002. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências de Solo*, v. 26, pp. 315-323.
- Owen, S.J.; Jones, N.L., and Holland, J.P. 1996. "A comprehensive modeling environment for the simulation of groundwater flow and transport". *Engineering with Computers* 12 (3–4): 235–242.
- Pachepsky, Y. A., Rawls, W.J., 1999. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 63, pp. 1748-1756.

- PDAD – Pesquisa Distrital Por Amostra de Domicílios. 2004. PDAD 2004 – dos agregados para o Distrito Federal e Regiões Administrativas – Brasília: SEPLAN – Subsecretaria de Estatística e Informações.
- Pádua, J.A. 2004. A Ocupação do Território Brasileiro e a Conservação dos Recursos Naturais. In Unidades de Conservação: atualidades e tendências 2004 / Organizadores: Miguel Serediuk Milano, Leide Yassuco Takahashi, Maria de Lourdes Nunes. Curitiba – Fundação O Boticário de Proteção a Natureza,.
- Paniconi C, Marrocu M, Putti M, Verbunt M. 2003. Newtonian nudging for a Richards equation-based distributed hydrological model. *Adv Water Resour* 26(2):161–178.
- Poeter, E.P.; Hill, M.C. 1997. Inverse models: a necessary next step in ground-water modeling. *Ground Water*, 35(2), 250–260.
- Rawls, W. J., Gish, T.J., Brakensiek, D.L., 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Advances in Soil Science*, v. 16, pp. 213-234.
- Reatto, A., Bruand, A., Silva, E.M., Martins, E.S., Brossard, M., 2007. Hydraulic properties of the diagnostic horizon of Latosols of a regional toposequence across the Brazilian Central Plateau. *Geoderma*, v. 139, pp. 51-59.
- Refsgaard, J.C. 1997. Validation and intercomparison of different updating procedures for real-time forecasting. *Nordic Hydrology*, 28, 65-84.
- Rennó, C. D.; Soares, J. V. 2000 – Relatório Técnico. Inpe - Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas Ação "Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental" Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/geopro/modelagem/relatorio_modelos_hidrologicos.pdf. Acesso em: 24/01/2009.
- Ribeiro, J.F.; Walter, B.M.T. 2008. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: Sano S.M. et al. Cerrado: ecologia e flora. Brasília, DF. Embrapa, p. 151-212.
- Santos, H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. A.; Oliveira, J. B.; Coelho, M. R.; Lumbreiras, J. F.; Cunha, T. J. F. 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SBCS. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa solos. 306p.
- Sartori, A. 2004. Avaliação da classificação hidrológica do solo para determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos. Universidade de Campinas, Campinas – SP, dissertação de Mestrado, 159p.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., Van Genuchten, M.Th., 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, v. 251, pp. 163-176.
- Scheytt, T., Hengelhaupt, F., 2001. Auffüllversuche in der wassergesättigten und ungesättigten Zone – ein Vergleich unterschiedlicher Verfahren; Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 2/2001; Springer Verlag.
- Sherman, L. K. 1932. Streamflow from Rainfall by the Unit Graph Method. *Eng. News Rec.*, 108, 501-505.
- SCS. 1984. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture. Soil Survey Manual, Chap. 2. SCS contract 430-V-SSM. Washington, D.C.
- SEDUH, 2006. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação. Diagnóstico Preliminar dos Parcelamentos Urbanos Informais no Distrito Federal. Brazil, 66p.
- Setti, A. A. 2001. Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos. Freitas M.A.V. (org.) Lima, J. E. F. W.; Chaves, A.G.M.; Pereira, I. C. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional de Águas. 328p.
- Sherman, L.W. 1932. "Streamflow from rainfall by the unit-graph method", *Engineering News-Record*, 108p.
- Shuttleworth, W.J. 1988. Evaporation from Amazonian rainforest. *Proc. R. Soc. Lond.B* 233: 321-346.
- Silberstein, R.P. 2006. "Hydrological models are so good, do we still need data?" *Environmental Modelling & Software*, 21(9), 1340-1352.

- Silva, F. C. 2007. Análise Integrada de Usos de Água Superficial e Subterrânea em Macro-Escala numa Bacia Hidrográfica: O Caso do alto Rio Parnaíba. Dissertação de Mestrado. *Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.*
- Sophocleous, M. 2002. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*. 10:52–67.
- Souza, M.T. 2001. Fundamentos para Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Distrito Federal. Universidade de Brasília/Instituto de Geociências, Brasília, Brazil. (M.Sc. dissertation) 94p.
- Souza, M.T., Campos, J.E.G., 2001. O papel dos regolitos nos processos de recarga de aquíferos do Distrito Federal. *Revista Escola de Minas*, v. 54, n. 3, p. 315-323.
- Sun, Feng. 2011. *Computational Hydrosystem Analysis: Applications to the Meijang and Nankou Catchments in China*. Department of Environmental Informatics. Dresden University. Germany. 120p. (PhD Thesis).
- Spera, S.T., Reatto, A., Correia, J.R., Sousa Silva, J.C., 2000. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro no Cerrado de Planaltina, DF, submetido à ação do fogo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.35, n.9, p.1817-1824.
- Theis, CV. 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *American Geophysics Union Transactions* 16:519-524.
- Therrien R, McLaren RG, Sudicky EA and Panday SM. 2009. HygroGeoSphere: A Three-dimensional Numerical Model Describing Fully-integrated Subsurface and Surface Flow and Solute Transport. Code documentation and user's guide. Groundwater Simulations Group, University of Waterloo. Canadá.
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. In: *Geographical Review*.38, p.55-94.
- Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R. 1955. The water balance. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p.
- Toll, M.; Wu, Y.; Wang, W.; Kolditz, O.; Sauter, M. 2009. *Groundwater resource in Western Jordan: a hydrogeological investigation of the influence of complex geological features on groundwater flow paths and storage*. In: European Water Resources Association's (EWRA) 7th International Conference. Limassol, Cyprus, 25-27 June 2009.
- Tomasella, J., Hoodnett, M. G., 1997. Estimating unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian soils using soil water retention data. *Soil Science*, v. 162, p. 703-712.
- Tomasella, J., Hoodnett, M.G., Rossato, L., 2000. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 64, pp. 327-338.
- Tomasella, J., Pachepsky, Y., Crestana, S., Rawls, W., 2003. Comparison of two techniques to develop pedotransfer functions for water retention. *Soil Science Society of American Journal*, v. 67, pp. 1085-1092.
- Trefry, M.G.; Muffels, C. 2007. "*FEFLOW: a finite-element ground water flow and transport modeling tool*". *Ground Water* 45 (5): 525–528.
- Tucci, C.E.M. 1998. *Modelos Hidrológicos*. Edit. UFRGS ABRH 652 p.
- Tucci, C.G., Braga, B (org). 2003. *Clima e Recursos Hídricos no Brasil*. ABRH, vol. 9; 348p.
- Tucci, C.E.M. (org). 2004. *Hidrologia: ciência e aplicações*. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS. 943p.
- Tucci, C.E.M. 2009. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4^a Edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS. ABRH. 943 p.
- Tucci, C.E.M.; Collishonn, W. Previsão de vazão. 2003. In: Tucci, C. E. M.; Braga, B. (org.). *Clima e recursos hídricos no Brasil*. Porto Alegre: ABRH. p.281-348.
- Tundisi, J. G. 2003. Água no século 21: enfrentando a escassez. *RIMA/IIIE*, 247p.
- Tundisi, J. G.; Matsumura-Tundisi, T. 2008. *Limnologia*. São Paulo: Oficina De Textos. 631p.

- Tundisi, J.G. 2008. Conservação e uso sustentável de recursos hídricos. In: Barbosa, F. A. (Org.) *Ângulos da água: desafios da integração*. Belo Horizonte: Editora UFMG, p.157-83.
- UNESCO. 2003. Subsídios ao Zoneamento da APA Gama Cabeça-de-Veados e Reserva da Biosfera do Cerrado: caracterização e conflitos socioambientais. *Unesco*: Brasília/DF
- Valeriano, M. M. 2004. *Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 72 p. (INPE-10550-RPQ/756).
- Van den Berg, M., Klamt, E., Van Reeuwijk, L.P., Sombroek, W.G., 1997. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma*, v. 78, p. 161-180.
- Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 44, pp. 892–989.
- Veloso, H.P., Rangel Filho, A.L.R. & Lima, J.C.A. 1991. Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal. IBGE, Rio de Janeiro.
- Viessman, W.; Lewis, G.L. 2002. *Introduction to Hydrology*, 5th ed., 624 pp., Prentice-Hall, Upper Saddle River, N. J.
- Villagra, M.M., Matsumoto, O.M., Bacchi, O.O.S., Moraes, S.O., LIBARDI, P.L., Reichardt, K., 1988. Tensiometria e variabilidade espacial em Terra Roxa Estruturada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 12, pp. 205-210.
- Walton, W.C. 1962. *Selected analytical methods for well and aquifer evaluation*. Illinois: Statewater Survey. 81p.
- Williams, J., Ross, P.J., Bristow, K.L., 1992. Prediction of the Campbell water retention function from texture, structure and organic matter. In: van Genuchten, M.T.H., LEIJ, F.J., Lund, L.J. (Eds.) *Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. Riverside, CA: University of California. pp. 427-441.
- Winter, T.C.; Harvey, J.W.; Lenh Franke, L.; Alley, W.M. 1998. *Ground Water and Surface Water A Single Resource*. U.S. Geological Survey Circular 1139. Denver, Colorado. 79p.
- Wösten, J.H.M., 1997. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.) *Soil quality for crop production and ecosystem health*. *Developments in Soil Science*, v. 25, pp. 221-245.
- Wösten, J.H.M., Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J., 2001. Pedotransfer functions: bridging gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, v. 251, pp. 123-150.
- Wtisten, J.H.M., Van Genuchten, M.Th., 1988. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Science Society of American Journal*, v. 52, pp. 1762-1770.
- Wu, Y.; Wang, W.; Toll, M.; Alkhoury, W. Sauter, M. Kolditz, O.. 2010. *Development of high-precision groundwater model based on scarce data: The wadi Kafrein catchment/Jordan*. *Environ Earth Sci* (2011) 64:771–785.
- ZEE, 2011. Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Federal. Disponível em: <http://www.zee-df.com.br/produtos.html>.