

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RICHARDSON GUENTHER SCHECHI

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO  
DE ÁGUA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO – SÃO  
JOSÉ DOS PINHAIS - PR.**

CURITIBA  
2012

RICHARDSON GUENTHER SCHECHI

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO  
DE ÁGUA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO – SÃO  
JOSÉ DOS PINHAIS - PR.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Conservação da Natureza, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Nivaldo Eduardo Rizzi

CURITIBA  
2012

Ficha catalográfica elaborada por Denis Uezu – CRB 1720/PR

Schechi, Richardson Guenther

Avaliação da capacidade potencial de armazenamento de água da bacia hidrográfica do Rio Pequeno – São José dos Pinhais – PR / Richardson Guenther Schechi – 2012.

128 fls. : il.

Orientador: Prof. Dr. Nivaldo Eduardo Rizzi

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 27/02/2012.

Área de concentração: Conservação da Natureza

1. Bacias hidrográficas - Administração. 2. Bacia hidrográfica do Rio Pequeno, PR. 3. Teses. I. Rizzi, Nivaldo Eduardo. II. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. III. Título.

CDD – 551.48

CDU – 556.511



Universidade Federal do Paraná  
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da  
Madeira  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

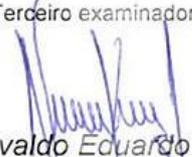
**PARECER**  
Defesa nº. 899

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após argüir o(a) mestrando(a) *Richardson Guenther Schechi* em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado " **AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO - SÃO JOSÉ DOS PINHAIS - PR.**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Mestre* em Engenharia Florestal, área de concentração em **CONSERVAÇÃO DA NATUREZA**.

  
*Dr. Omar Ferreira Lopes*  
Universidade Federal do Paraná  
Primeiro examinador

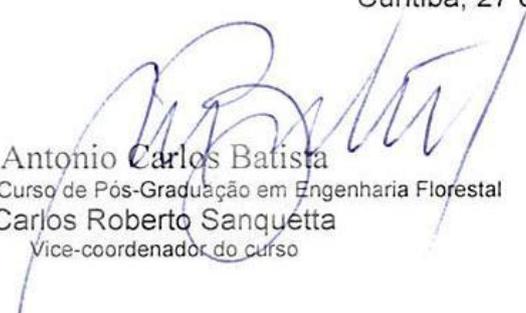
  
*Dr. Oromar João Bertol*  
EMATER-PARANÁ  
Segundo examinador

  
*Dr. Hideo Araki*  
Universidade Federal do Paraná  
Terceiro examinador

  
*Dr. Nivaldo Eduardo Rizzi*  
Universidade Federal do Paraná  
Orientador e presidente da banca examinadora



Curitiba, 27 de fevereiro de 2012.

  
Antonio Carlos Batista  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Carlos Roberto Sanquetta  
Vice-coordenador do curso

*“Vivamos a verdade simples,  
unidos pela vontade de SERVIR”  
(B.P.)*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela Vida, Saúde e Proteção

Ao Prof. Dr. Nivaldo Eduardo Rizzi pela oportunidade, orientação, compreensão e amizade;

A Universidade Federal do Paraná, em especial ao Curso de Pós Graduação em Engenharia Florestal, por proporcionar as condições necessárias para a realização desta dissertação;

A Prefeitura de São José dos Pinhais, por intermédio da Secretária de Agricultura que disponibilizou pessoal para as visitas a campo;

A SANEPAR e SUDERHSA, pelos dados fornecidos;

Aos Professores da Pós Graduação que disponibilizaram seus tempos para sanar minhas duvidas e assim poder dar continuidade aos meus estudos,

A minha companheira Carolina Heyse Neibisch, pela confiança em mim depositada, paciência e compreensão nos momentos difíceis,

A minha família pelo apoio e dedicação de todos;

Ao meus companheiros de Pós Graduação que estiveram sempre presentes durante a realização deste trabalho;

A equipe Lost, que sempre ajudou a relaxar quando a cabeça parava de funcionar “É Nois”

Aos quatro mosqueteiros e a mosquinha pela irmandade;

A Cooredenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível, Superior (CAPES/REUNI) pelo apoio financeiro;

Aos funcionários do Curso de Engenharia Florestal da UFPR;

A todos aqueles que contribuíram, de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Os estudos de manejo de bacias hidrográficas devem ir além de apenas passar pela superposição física entre mapas de uso potencial e atual do solo. Considerando esta como sendo um sistema complexo e aberto torna-se necessária a análise de suas características para que possam ser entendidas as suas interações. Desta maneira, o presente trabalho demonstra a capacidade potencial de armazenamento de água da bacia hidrográfica do rio Pequeno, São José dos Pinhais – PR que é uma região de crescente expansão industrial da região metropolitana de Curitiba. Com a análise da capacidade potencial de armazenamento de água da Bacia Hidrográfica podem ser identificadas áreas com maior ou menor capacidade de recarga de aquíferos auxiliando, desta maneira, na implementação de políticas de desenvolvimento socioeconômicas. Para tanto foi aplicada a metodologia proposta por CHIARANDA (2002) a qual consiste na análise e cruzamento, em ambiente de sistemas de informações geográficas (SIG), de informações temáticas como geologia, geomorfologia, solo, cobertura vegetal original e usos dos solos nos anos de 1986, 1996 e 2007. As classes de uso do solo foram determinadas a partir da análise de imagens de satélites e classificadas em Floresta, Capoeira, Várzea, Reflorestamento, Campos, Urbano e Agricultura. Foram analisadas as expansões e/ou retrações de cada um dos tipos de uso do solo e de suas interações com o meio poroso da bacia para determinar a capacidade potencial de armazenamento. No ano de 2007 a bacia apresentou 74,10; 47,73 e 8,62% de sua área enquadrada nas classes de alta, média e baixa capacidade de armazenamento, respectivamente. Nas análises das séries históricas de vazão e precipitação foram identificados os anos de 1983 e 1998 como os de maior intensidade de precipitação. Verificou-se desta maneira que os usos da terra modificaram as características da capacidade potencial de armazenamento da bacia.

## ABSTRACT

Studies concerning watershed management must go beyond the physical overlap between current and potential soil use maps. Considering the watershed as a complex and open system it becomes necessary to analyze its characteristics in order to understand its interactions. Thus, this work demonstrates the potential water storage capacity from the Rio Pequeno watershed located in the municipality of São José dos Pinhais in Paraná state, Brazil. The city is part of Curitiba Metropolitan Area and has been going through a growing industrial expansion. The analysis of the Rio Pequeno watershed potential water storage capacity can identify areas with greater or less ability to recharge aquifers, helping the implementing of socioeconomic development policies. To that end, was applied the methodology proposed by CHIARANDA (2002). It consists in a Geographical Information System (GIS) analysis and combining of different sources of information such as geology, soil type, original plant cover and land uses in the years of 1986, 1996 and 2007. The different classes of land use were determined from the analysis of satellite images and classified as Forest, Floodplains, Forestry, Fields, Urban Areas and Agriculture. Expansions or retractions of each type of land use around the watershed and their direct relation with the supply areas of the watershed were analyzed to determine its potential water storage capacity. In 2007 the watershed had 74.10%, 47.73% and 8.62% of its area classified in high, medium and low storage capacity, respectively. The time series analysis of flow and precipitation identified the years of 1983 and 1998 as the higher intensity of precipitation in the watershed. This way was observed that land uses have changed the characteristics of the potential water storage capacity of Rio Pequeno watershed.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CICLO HIDROLÓGICO. ....	21
FIGURA 2 – FUNÇÕES HIDROLÓGICAS E ECOLÓGICAS DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA. ....	28
FIGURA 3 - HIDROGRAMA TIPO .....	33
FIGURA 4 – LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO. ....	42
FIGURA 5 – MAPA DE HIDROGRAFIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO .....	50
FIGURA 6 – MAPA DE GEOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO. ....	51
FIGURA 7 - MAPA DE GEOMORFOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO. ....	52
FIGURA 8 – MAPA DE SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO .....	53
FIGURA 9 – MAPA DE UNIDADES FITOESTRATIGRÁFICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO. ....	54
FIGURA 10 – MODELO DE ANÁLISE DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DA BACIA. ....	56
FIGURA 11 – FLUXOGRAMA METODOLÓGICO.....	58
FIGURA 12 – ORGANIZAÇÃO HIERÁRQUICA DOS COMPONENTES (VARIÁVEIS). ....	61
FIGURA 13 – ÁREA COM VÁRZEA NA BACIA DO RIO PEQUENO .....	65
FIGURA 14 – ÁREA COM CAMPO E FLORESTA NA BACIA DO RIO PEQUENO .....	65
FIGURA 15 – ÁREA COM REFLORESTAMENTO NA BACIA DO RIO PEQUENO .....	66
FIGURA 16 – MAPA DE PERMEABILIDADE DAS ROCHAS .....	81
FIGURA 17 – MAPA DE FLUXO PREFERENCIAL EM PROFUNDIDADE .....	82
FIGURA 18 – MAPA DE DECLIVIDADE .....	83
FIGURA 19 – MAPA DE POTENCIAL DE INFILTRAÇÃO DOS SOLOS .....	84
FIGURA 20 – MAPA DE POTENCIAL DA PROFUNDIDADE PARA ARMAZENAMENTO .....	85
FIGURA 21 – MAPA DO GRAU DE PROTEÇÃO DA COBERTURA VEGETAL ORIGINAL.....	86
FIGURA 22 – MAPA DE POTENCIAL HIDROLÓGICO DO RELEVO .....	90
FIGURA 23 – MAPA DE POTENCIAL HIDROLÓGICO DO SOLO.....	91
FIGURA 24 – MAPA DE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO DO MEIO POROSO .....	92
FIGURA 25 – MAPA DE CAPACIDADE POTENCIAL ORIGINAL DE ARMAZENAMENTO .....	95
FIGURA 26 – USOS DA TERRA NOS ANOS DE 1986, 1996, 2007 .....	96
FIGURA 27 – EXPANSÃO E RETRAÇÃO DAS CLASSES DE USO DO SOLO ENTRE 1986 E 2007. ....	98

FIGURA 28 – MAPA DE USO DO SOLO PARA O ANO DE 1986.....	99
FIGURA 29 – MAPA DE USO DO SOLO PARA O ANO DE 1996.....	100
FIGURA 30 – MAPA DE USO DO SOLO PARA O ANO DE 2007.....	101
FIGURA 31 – GRAU DE PROTEÇÃO DOS USOS DA TERRA NOS ANOS DE 1986, 1996, 2007.	102
FIGURA 32 – MAPA DO GRAU DE PROTEÇÃO NO ANO DE 1986.....	103
FIGURA 33 – MAPA DO GRAU DE PROTEÇÃO NO ANO DE 1996.....	104
FIGURA 34 – MAPA DO GRAU DE PROTEÇÃO NO ANO DE 2007.....	105
FIGURA 35 – CHACRINHAS NAS CABECEIRAS DA BACIA DO RIO PEQUENO.....	106
FIGURA 36 – CLASSES DE CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO.....	107
FIGURA 37 – RETRAÇÃO (-) E EXPANSÃO (+) DAS CLASSES DE CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO EM DECORRÊNCIA DOS USOS DO SOLO. ....	109
FIGURA 38 – MAPA DA CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO EM 1986.....	111
FIGURA 39 – MAPA DA CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO EM 1996.....	112
FIGURA 40 – MAPA DA CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO EM 2007.....	113
FIGURA 41 – PRECIPITAÇÃO ANUAL NO PERÍODO DE 1975 A 2006. ....	114
FIGURA 42 – DISTRIBUIÇÃO DA VAZÃO MÉDIA ENTRE 1976 E 2006. ....	116
FIGURA 43 – CURVA PERMANÊNCIA MENSAL DOS ANOS DE 1985 E 1986. ....	117
FIGURA 44 – CURVA PERMANÊNCIA MENSAL DOS ANOS DE 1995 E 1996. ....	118
FIGURA 45 – CURVA PERMANÊNCIA MENSAL DOS ANOS DE 2005 E 2006. ....	119

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DISTRIBUIÇÃO DA AGUA E DA TERRA NA SUPERFÍCIE GLOBAL.....	18
TABELA 2 – DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DOCE SUPERFICIAL NO MUNDO. ....	19
TABELA 3 – CLASSIFICAÇÃO SOBRE A MUDANÇA E USO DO SOLO.....	38
TABELA 4 – PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DA BACIA DO RIO PEQUENO. ....	43
TABELA 5 – UNIDADES GEOLÓGICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO .....	44
TABELA 6 – UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO. ....	46
TABELA 7 – CLASSES DE SOLO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO. ....	47
TABELA 8 – UNIDADES FITOESTRATIGRÁFICAS DA BACIA DO RIO PEQUENO .....	48
TABELA 9 – ESCALA DE VALORES DO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO PARA COMPARAÇÃO PAREADA. ....	62
TABELA 10 – CLASSES DE USO DO SOLO PARA OS ANOS DE 1986, 1996, 2007 .....	64
TABELA 11 – CLASSIFICAÇÃO E VALORAÇÃO DAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS QUANTO À PERMEABILIDADE.....	67
TABELA 12 – CLASSIFICAÇÃO E VALORAÇÃO DAS FORMAS DE RELEVO QUANTO AO FLUXO PREFERENCIAL EM PROFUNDIDADE. ....	68
TABELA 13 – CLASSIFICAÇÃO E VALORAÇÃO DA DECLIVIDADE DOS TERRENOS DA BACIA. ....	69
TABELA 14 – CLASSES DE POTENCIAL DE INFILTRAÇÃO DOS SOLOS. ....	69
TABELA 15 – POTENCIAL DA PROFUNDIDADE PARA ARMAZENAMENTO .....	70
TABELA 16 – CLASSES DE GRAU DE PROTEÇÃO DA COBERTURA VEGETAL ORIGINAL .....	71
TABELA 17– CLASSES DE GRAU DE PROTEÇÃO DOS USOS DO SOLO .....	71
TABELA 18 – PESOS CONSISTIDOS ATRIBUÍDOS AOS TEMAS SÍNTESES DERIVADOS.....	72
TABELA 19 – INTERVALOS DE CLASSES DE FATIAMENTO PARA POTENCIAL HIDROLÓGICO DO SOLO E PARA O POTENCIAL HIDROLÓGICO DO RELEVO .....	73
TABELA 20 – PESOS CONSISTIDOS ATRIBUÍDOS AOS TEMAS DERIVADOS.....	73
TABELA 21 – INTERVALOS DE CLASSES DE FATIAMENTO PARA POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO DO MEIO POROSO.....	74
TABELA 22 – QUANTIFICAÇÃO DA EXPRESSÃO HIDROLÓGICA DAS COMPONENTES .....	76
TABELA 23 – QUANTIFICAÇÃO DAS CLASSES DE POTENCIAL HIDROLÓGICO DO RELEVO E DOS SOLOS .....	88
TABELA 24 – QUANTIFICAÇÃO DAS CLASSES DE POTENCIAL ARMAZENAMENTO DO MEIO POROSO.....	88
TABELA 25 – CAPACIDADE POTENCIAL ORIGINAL DE ARMAZENAMENTO .....	93
TABELA 26 – USOS DA TERRA NOS ANOS DE 1986, 1996, 2007, EXPANSÃO E RETRAÇÃO DAS CLASSES ENTRE 1986 E 2007.....	96
TABELA 27 – GRAU DE PROTEÇÃO DOS USOS DA TERRA NOS ANOS DE 1986, 1996, 2007. ....	102
TABELA 28 – CLASSE DE CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO .....	107

TABELA 29 – RETRAÇÃO (-) E EXPANSÃO (+) DAS CLASSES DE CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO EM DECORRÊNCIA DOS USOS DO SOLO. ....	108
TABELA 30 – VALORES DE PRECIPITAÇÃO (mm) MENSAL E ANUAL DOS ANOS DE 1976 A 2006. ....	115
TABELA 31 – VALORES DE VAZÃO PARA CURVA PERMANÊNCIA 1985 - 1986.....	117
TABELA 32 – VALORES DE VAZÃO PARA CURVA PERMANÊNCIA 1995 - 1996.....	118
TABELA 33 – VALORES DE VAZÃO PARA CURVA PERMANÊNCIA 2005 - 2006.....	119

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1.OBJETIVO GERAL .....	16
1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1. PANORAMA DAS ÁGUAS .....	18
2.2. CICLO HIDROLÓGICO .....	21
2.2.1. Precipitação.....	22
2.2.2. Interceptação.....	23
2.2.3. Evaporação e evapotranspiração .....	23
2.2.4. Infiltração e percolação .....	24
2.2.5. Escoamento superficial e sub-superficial .....	24
2.3. BACIA HIDROGRÁFICA .....	25
2.4. BACIA HIDROGRÁFICA COMO SISTEMA NATURAL.....	26
2.5. VAZÃO E RENDIMENTO HÍDRICO.....	31
2.6. ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA .....	35
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	41
3.1. INSERÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA EM ESTUDO.....	41
3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO AMBIENTAL DA ÁREA DE ESTUDO.....	41
3.2.1. Caracterização morfológica da Bacia Hidrográfica.....	41
3.2.2. Clima e Hidrografia.....	43
3.2.3. Geologia e Geomorfologia.....	44
3.3.1. Capacidade atual de armazenamento.....	59
3.3.2. Fase I – Constituição de Banco de Dados .....	63
3.3.2.1. Processamento e Análises das Imagens.....	63
3.3.3. Fase II – Processamento dos Dados.....	66
3.3.4. Fase III – Modelagem para Integração.....	72
3.3.5. Análise de Precipitação .....	74
3.3.6. Análise de Vazão .....	75
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	76
4.1. ANÁLISE DAS EXPRESSÕES HIDROLÓGICAS DOS COMPONENTES .....	76
4.1.1. Permeabilidade .....	77
4.1.2. Fluxo preferencial em profundidade .....	77
4.1.3. Declividade.....	78

4.1.4. Potencial de infiltração do solo.....	78
4.1.5 Potencial da profundidade para armazenamento.....	79
4.1.6. Grau de proteção da cobertura vegetal.....	79
4.2. CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DO MEIO POROSO .....	87
4.3. CAPACIDADE POTENCIAL ORIGINAL DE ARMAZENAMENTO DA BACIA ...	93
4.4. DINÂMICA DO USO DO SOLO .....	94
4.5. ANÁLISE DA CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO .....	102
4.7. ANÁLISE YETOGRAMAS DE PRECIPITAÇÃO .....	114
4.8. ANÁLISE DOS HIDROGRAMAS DE VAZÃO .....	116
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>120</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>123</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os usos múltiplos da água são crescentes e para uma gestão sustentável desses recursos torna-se necessário compreender os fatores que o influenciam. Estudos hidrológicos desenvolvidos em bacias hidrográficas surgiram principalmente da necessidade de se compreender o funcionamento dos processos que controlam os movimentos da água e os impactos relacionados à mudança do uso do solo sobre a qualidade e disponibilidade do recurso hídrico (WHITEHEADE e ROBINSON, 1993). Lang e Blaschke (2009) relatam a importância de dados atuais de uso do solo para o planejamento e tomadas de decisões referentes à utilização dos recursos naturais principalmente, quando está se buscando gerar informações, a fim de facilitar o entendimento do que está ocorrendo em determinada área ou região.

No entanto, os estudos de manejo de bacias hidrográficas, não devem passar apenas pela superposição física entre mapas de uso potencial e atual do solo. É preciso levar em consideração a Bacia Hidrográfica como uma unidade geomorfológica com propriedades peculiares, que devidamente conhecidas, podem permitir um rendimento hídrico (quantidade e qualidade) econômico e social, contribuindo para a melhoria do estender da vida de seus usuários (VERACEL, 1992).

Com o passar do tempo as classes de uso do solo da categoria natural passaram a ser substituídas pelas de categoria antrópica e a demanda pelos recursos hídricos diversificou e aumentou. Estas alterações trouxeram impactos, devido às modificações das componentes e processos dos sistemas das bacias hidrográficas. Em decorrência, criou-se um quadro de incertezas quanto ao atendimento das demandas atual e futura e quanto aos aspectos de proteção ambiental (BRAUN, 2007).

Os diversos usos da terra quando passam a modificar as componentes e os processos hidrológicos, bem como as características de porosidade e permeabilidade dos solos e rochas, interferem no armazenamento das águas dentro da bacia (BRAUN, 2007). Na forma de uma melhoria das condições de armazenamento de água em uma bacia, o controle ambiental vem a ser uma ação

alternativa econômica e duradora para a minimização dos efeitos causados pelos usos da terra (GUIMARÃES, 2000).

O processo de planejamento de uso dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica requer um diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos; análises de alternativas de crescimento demográfico, da evolução das atividades produtivas e de modificações dos padrões de ocupação do solo; balanço entre disponibilidade e demandas futuras dos recursos hídricos; metas de racionalização do uso da água e projetos a serem implantados, entre outros (LANNA, 1999 *appud* SILVA et al., 2004).

A região metropolitana de Curitiba, devido ao elevado crescimento demográfico nos últimos anos, vem apresentando problemas com relação à escassez de recursos hídricos. Dentro deste contexto, o município de São José dos Pinhais, segundo dados do Caderno Estatístico, apresentou para o ano de 2010, uma densidade demográfica de 279,8 habitantes/Km<sup>2</sup>, e grau de urbanização 89,66% (INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, maio 2010).

Esta pesquisa é de caráter físico investigativo e busca levantar informações pertinentes referentes a capacidade de armazenamento de água para o planejamento da bacia hidrográfica do rio Pequeno no município de São José dos Pinhais.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

Diagnosticar aspectos de ordem geológica, edáfica, hidrológica e de uso do solo da bacia do rio Pequeno – São José dos Pinhais – PR a fim de identificar a distribuição espacial das áreas de recarga e conservação dos recursos hídricos objetivando a análise da capacidade potencial de armazenamento de água da bacia.

## 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar o potencial de armazenamento do meio poroso da Bacia Hidrográfica do rio Pequeno;
- Determinar a capacidade potencial de armazenamento de água da Bacia Hidrográfica do rio Pequeno;
- Avaliar a influência de variáveis físicas e do uso e ocupação do solo sobre o armazenamento dos recursos hídricos;
- Elaboração de mapas de capacidade potencial de armazenamento de água da bacia do rio Pequeno original e dos anos de 1986, 1996 e 2007.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. PANORAMA DAS ÁGUAS

A superfície da terra é de  $510.10^6 \text{ km}^2$  (510 milhões de  $\text{km}^2$ ), sendo  $361.10^6 \text{ km}^2$  (71%) cobertas pelos oceanos e  $149.10^6 \text{ km}^2$  de terras emergidas (29%). A água e a terra estão distribuídas no globo terrestre desigualmente como demonstra a tabela 1. As reservas de água na terra são de aproximadamente  $1386.10^6 \text{ km}^3$ . Estas reservas se diferenciam dos demais recursos naturais por se encontrar em contínuo movimento no espaço e no tempo, característicos de todos os tipos de água: as correntes oceânicas, o fluxo dos rios e das águas subterrâneas na terra, os deslocamentos das massas úmidas de ar sobre os oceanos e os continentes, o movimento da água desde as raízes até as folhas, constituem exemplos de intercâmbio inter-relacionado da água com a natureza (RIZZI, 2011, capítulo 2).

TABELA 1 – DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA E DA TERRA NA SUPERFÍCIE GLOBAL.

Hemisfério	Superfície coberta por terra		Superfície coberta por água	
	%	Área ( $\text{km}^2$ )	%	Área ( $\text{km}^2$ )
Sul	19	$49.10^6$	81	$206.10^6$
Norte	39	$100.10^6$	61	$155.10^6$

FONTE: RIZZI, 2011 Capítulo 2. Introdução ao manejo de bacias hidrográficas e ciclo hidrológico.

A água não é um bem renovável e se encontra distribuída desigualmente pelo globo, sendo que 10 países concentram cerca de 60% do total de água doce disponível. Os oceanos representam 97% das águas apresentando uma salinidade elevada que as tornam não potáveis. O restante, 3%, representa água doce, dos quais 2,5% estão indisponíveis para consumo humano na Antártica, no Ártico e na forma de geleiras, estando disponível para o consumo humano apenas 0,5% da água do planeta. Aproximadamente  $217.000 \text{ km}^3$  de água doce encontram-se disponível na forma de água superficial. O Brasil é um dos países mais privilegiados

do globo, possuindo 12% das águas doces superficiais disponíveis conforme demonstra a tabela 2 (ANA, 2009). A produção total de águas doces no Brasil representa 53% do continente sul-americano (334.000 m<sup>3</sup>/s) e 12% do total mundial (1.488.000 m<sup>3</sup>/s) (REBOUÇAS, JUNIOR E TUNDISI, 2011).

TABELA 2 – DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA DOCE SUPERFICIAL NO MUNDO.

País	Percentual de água doce
África	9,70%
Américas	39,60%
Ásia	31,80%
Europa	15%
Oceania	3,90%
Brasil	12% do total mundial

FONTE: ANA, 2009.

Segundo Rebouças, Junior e Tundisi (2011) o termo “água” se refere regra geral, ao elemento natural desvinculado de qualquer uso ou utilização. Por sua vez o termo “recurso hídrico” é a consideração da água como bem econômico passível de utilização com tal fim. Quando tratamos de recursos hídricos não podemos esquecer as águas subterrâneas, pois são de grande importância para o abastecimento de água de muitas regiões. Na maioria do território brasileiro, existem aquíferos com balanço hídrico positivo com grande recarga.

Em razão das peculiaridades climáticas causadas por diferenças latitudinais e altitudinais, as águas doces estão distribuídas desigualmente no planeta. Além da distribuição de água mundial ser desigual, há ainda variabilidade natural de séries hidrométricas históricas (medida dos volumes e vazões de rios) em determinadas bacias hidrográficas. Estas séries determinam os principais usos da água e as estratégias de gerenciamento deste recurso. As interferências das atividades humanas no ciclo hidrológico ocorrem em todos os continentes, e seus impactos no ciclo variam para cada região de acordo com o uso da água e ocupação do solo (REBOUÇAS, JUNIOR E TUNDISI, 2011).

Tanto águas superficiais quanto subterrâneas são influenciadas pela ocupação do espaço físico das bacias hidrográficas. O que leva ao reconhecimento da importância da preservação e conservação da vegetação natural, com maior especificidade a cobertura florestal e as matas ciliares, bem como a manutenção da

conservação e manejo do solo para a conservação dos recursos hídricos (CHIARANDA, 2002).

De acordo com Rebouças, Junior e Tundisi (1999) tanto a quantidade como a qualidade das águas sofrem alterações em decorrência tanto de causas naturais e quanto antrópicas. A quantidade e qualidade dos recursos hídricos que escoam pelo canal principal de uma bacia hidrográfica em condições naturais, dependem do clima e das características físicas e biológicas dos ecossistemas que os compõe. A interação contínua e constante entre a litosfera, a biosfera e a atmosfera acaba definindo um equilíbrio dinâmico para o ciclo da água, o qual define em última análise, as características e as vazões das águas. Qualquer modificação nos componentes do clima ou paisagem alterará a quantidade, a qualidade e o tempo de residência da água nos ecossistemas e, por sua vez, o fluxo da água e suas características no canal principal do rio. Segundo o autor citado acima esse equilíbrio depende basicamente:

- da quantidade e distribuição das precipitações: a quantidade de água proveniente das precipitações em uma bacia hidrográfica apresenta variações temporais e espaciais;
- o balanço de energia: a quantidade de água que é perdida pela evapotranspiração depende da energia solar disponível, da natureza da vegetação e das características do solo;
- da geomorfologia: regula o tempo de permanência da água que depende da inclinação das secções transversais e longitudinal da bacia hidrográfica;
- da natureza e da dimensão das formações geológicas: controla o armazenamento de água no solo e no subsolo e determina o fluxo de base dos afluentes e do canal principal descontinuidades e conectividade das estruturas;
- da vegetação natural que cobre a área: controla o balanço de energia, a infiltração da água, a evapotranspiração e a vazão final;
- da interação das espécies: a atividade dos ciclos biogeoquímicos depende da interação dos organismos vivos, incluindo a microfauna e microflora.

## 2.2. CICLO HIDROLÓGICO

A água é um recurso renovável, graças ao interminável ciclo hidrológico, em atividade desde a formação da hidrosfera e da atmosfera a aproximadamente 3,8 bilhões de anos atrás. O ciclo consiste nas fases que a água percorre em sua trajetória no globo terrestre, envolvendo o estado líquido, gasoso e sólido, um verdadeiro mecanismo vivo que mantém a vida no planeta (RIZZI, 2011, capítulo 11). O processo natural de movimentação da água na atmosfera é chamado de ciclo hidrológico (Figura 1) e compreende vários processos hidrológicos complicados como: precipitação, evaporação, interceptação, infiltração, evapotranspiração, percolação, escoamento superficial e sub-superficial (LIMA, 2008).



FIGURA 1 – CICLO HIDROLÓGICO.

FONTE: <http://educasitios.educ.ar/grupo094/?q=node/51>

Os processos hidrológicos na Bacia Hidrográfica possuem duas direções predominantes de fluxo: vertical e longitudinal. O processo vertical é representado pelos processos de precipitação, evapotranspiração, umidade e fluxo no solo, enquanto que o longitudinal, pelo escoamento na direção dos gradientes da

superfície (escoamento superficial e rios) e do subsolo (escoamento subterrâneo) (TUCCI & CLARKE, 1997).

### 2.2.1. Precipitação

A precipitação é definida como toda água que provém do meio atmosférico e atinge a superfície terrestre (TUCCI, 2004). Neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve, constituem as diferentes formas de precipitação e se diferenciam em função do estado em que a água se encontra. A formação das precipitações está ligada à ascensão das massas de ar, e a movimentação destas depende de fatores como a convecção térmica, o relevo e a ação frontal da massa (BRAUN, 2007).

A precipitação ocorre quando grandes massas de ar úmido atingem altitudes elevadas devido a convecção, a invasão de massas quentes e frias uma sobre a outra ou devido a forçagem orográfica. O resfriamento noturno devido à perda de radiação provoca orvalho e geada, mas não esfria massas de ar o suficiente para provocar chuva ou neve (SOARES, 2004).

Segundo Vilela & Mattos (1975) a chuva é o principal elemento da maioria dos projetos hidrológicos. Os problemas de engenharia relacionados com a hidrologia são em sua grande maioria consequência de chuvas de grande intensidade ou volume e da ausência de chuva em longos períodos de estiagem. A precipitação pode ser classificada em três mecanismos:

- Chuva de convecção: causadas por aquecimento solar diferencial do solo e camadas de ar mais baixas (principalmente no fim do verão). Células convectivas vão de 25 a 30 km<sup>3</sup>, mas a intensidade de chuva pode ser elevada pois as nuvens alcançam altitudes de até 15 km ou mais (granizo se forma nestas elevações).

- Chuva frontal ou ciclônica: causadas por ar quente invadindo ar frio ou vice-versa. O ar quente é forçado para cima, provocando precipitações de duração longa e sobre áreas extensas.

- Chuva orográfica: causada por ar úmido sendo forçado para cima por uma barreira física, como as montanhas de uma linha costeira (serra do mar, p.e.).

### 2.2.2 Interceptação

O processo de interceptação da água da chuva pelas florestas desempenha importante papel na hidrologia de uma dada área, ocasionando a diminuição proporcional da demanda da água do solo (LIMA & NICOLIELO, 1983). O principal efeito da interceptação em uma bacia é aumentar a evaporação e reduzir o escoamento. A interceptação apresenta maior importância no balanço hídrico em regiões onde predominam chuvas de baixa intensidade. Nestes casos, a evaporação da água interceptada ocorre durante o próprio evento chuvoso. De maneira distinta, em regiões com chuvas mais intensas o papel da interceptação no balanço hídrico é menor.

Tucci (2002) descreve que quando se inicia a chuva, a água molha a superfície das folhas e armazena nas concavidades das mesmas, gastando uma certa quantidade que fica aderida a enorme superfície foliar. Se continuar a chover, a capacidade de interceptação é ultrapassada e toda a água que chega as folhas e caules escoam; simultaneamente em uma parcela continua a evaporação à partir das folhas úmidas. Quando há vento, esse processo pode ser acelerado, aumentando as perdas por interceptação. A precipitação atinge o solo: a) atravessando a vegetação da floresta (em média 85% da precipitação incidente) ou; (b) através de gotejamento da copa (1 a 2% precipitação). A diferença é a interceptação.

### 2.2.3 Evaporação e evapotranspiração

O processo de evaporação é definido como a taxa de transferência para a atmosfera, da fase líquida para a fase de vapor, da água contida em um reservatório natural qualquer ou em um domínio definido na escala experimental. A evaporação da água para a atmosfera depende de vários fatores, dentre os quais, as condições climatológicas e de relevo, a umidade, a velocidade do vento, a disponibilidade de água e energia, a vegetação e as características do solo (BRAUN, 2007).

A evapotranspiração é a liberação de água para a atmosfera por parte da evaporação do solo e da transpiração das plantas, representando a soma total de

água de superfície que retorna à atmosfera (solo, gelo, neve e vegetação). Esta está condicionada às condições meteorológicas e ao grau de desenvolvimento da vegetação. Por isso, define-se evapotranspiração potencial como aquela que poderia apresentar uma superfície coberta por vegetação e bem suprida de água (PENMAN, 1956, *appud* TUCCI, 1993) e evapotranspiração real como a quantidade de água liberada para atmosfera nas condições reais dos fatores de umidade do solo (GANGOPADHYAYA et al., 1968 *appud* TUCCI, 1993; GUIMARÃES, 2000).

#### 2.2.4 Infiltração e percolação

A infiltração consiste no processo de entrada de água no solo e se restringe a camada superficial do mesmo. É a fase em que há a separação da precipitação em água que escoia superficialmente e/ou é evaporada e a água que penetra no solo. A taxa de infiltração de um solo depende muito das condições iniciais de umidade desse solo e também das alterações das características físicas (porosidade) e biológicas ocasionadas pelo manejo do solo. A água da chuva penetra no solo por força da gravidade (predominante em solos com poros grandes) ou da tensão capilar para baixo (predominante em solos com poros pequenos) (GUIMARÃES, 2000).

A percolação consiste no movimento vertical da água no perfil do solo, após a mesma se infiltrar pela superfície do solo. Este movimento está condicionado à permeabilidade ou condutividade hidráulica do solo e ao gradiente de potencial formado pela gravidade e pela tensão de umidade (LIMA, 1986 *appud* GUIMARÃES, 2000)

#### 2.2.5 Escoamento superficial e sub-superficial

O escoamento superficial representa a parte do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento das águas de superfície da Terra (PINTO et al., 2001 *appud* BRAUN, 2007). Conhecido também sob a denominação de deflúvio superficial consiste na lamina de água formada pelo excesso de chuva que não é infiltrado no solo e que se acumula inicialmente nas pequenas depressões do micro relevo.

Ocorre a partir do momento em que a camada superficial está completamente saturada e a transmissão de água para as camadas inferiores é muito baixa ou praticamente nula. O escoamento superficial sobre o solo saturado é formado por pequenos filetes de água que em razão da gravidade escoam para os pontos mais baixos do solo, formando uma microrede de drenagem que leva a água ao canal mais próximo. Vários fatores podem afetar o processo de escoamento superficial, e os principais seriam a declividade do terreno e as condições do solo para a infiltração de água (TUCCI, 2002, BRAUN, 2007).

O escoamento sub-superficial é o fluxo de água através da matriz do solo no sentido paralelo à declividade. Também ocorre em meio saturado, quando o perfil do solo já atingiu sua capacidade de campo, ou em meio insaturado quando a água se movimenta devido a forças de capilaridade (GUIMARÃES, 2000).

### 2.3. BACIA HIDROGRÁFICA

Vilella & Mattos (1975), citando Viessman, Harbaugh e Knaap, entende Bacia Hidrográfica como sendo uma área definida topograficamente, drenada por um ou um sistema conectado de cursos d'água tal que toda vazão efluente seja descarregada através de uma simples saída. Completando o conceito, Pinto (1976) define Bacia Hidrográfica como sendo a área geográfica coletora de água de chuva que, escoando pela superfície do solo, atinge um curso d' água. Já, Santos (2001) apresenta uma visão um pouco mais ampla a qual considera a Bacia Hidrográfica como sendo uma superfície limitada por um contorno, dentro do qual toda a água precipitada, quando não evaporada, infiltrada ou retida, escoam para um determinado ponto.

O Brasil adotou a Bacia Hidrográfica como uma unidade de planejamento e implantação da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) a partir das mudanças governamentais efetuadas mediante a aprovação da Lei nº 9.433/97. Braun (2007) citando Huebert et al. (2002) afirma que no Brasil, a gestão dos recursos hídricos, durante muitos anos foi feita de forma tímida, até mesma relegada a segundo plano, pois era necessário assegurar a infra-estrutura necessária ao desenvolvimento do país. O consumo de água nas atividades humanas varia muito entre regiões e países. Na Bacia Hidrográfica desenvolvem-se atividades humanas

que utilizam a água para múltiplas finalidades, inclusive de recepção, diluição e assimilação de esgotos urbanos, de efluentes industriais, e de rejeitos agrícolas. Os usos múltiplos da água e as permanentes necessidades de água para fazer frente ao crescimento populacional e às demandas agrícolas e industriais têm gerado permanente pressão sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos (REBOUÇAS, JUNIOR E TUNDISI, 2011).

A utilização da água é conceituada por uso consultivo e não consultivo. Os usos da água consultivos registram perdas por evaporação e infiltração no solo, evapotranspiração, absorção pelas plantas e incorporação a produtos industriais como observado no abastecimento urbano, industrial e irrigação. Em contrapartida, os usos não consultivos não afetam a qualidade da água disponível como observado na geração hidrelétrica e navegação fluvial (BARTH, 1999).

#### 2.4. BACIA HIDROGRÁFICA COMO SISTEMA NATURAL

A compreensão sistêmica dos processos cíclicos de energia e matéria na natureza em geral e das águas em particular constitui um dos grandes desafios das ciências hidrológicas e ambientais na virada do século XX para o XXI. Para tanto, torna-se necessário e urgente evoluir do pensamento mecanicista para o pensamento sistêmico. A ciência cartesiana acreditava que o comportamento do todo poderia ser analisado em termo das propriedades de suas partes. De maneira contrária, a ciência sistêmica mostra que as propriedades das partes só podem ser entendidas dentro de um contexto do todo maior (REBOUÇAS, JUNIOR e TUNDISI, 1999). De acordo com Chiaranda (2002) o estudo da dinâmica das bacias hidrográficas tem por fundamento a teoria dos sistemas, a qual contribui para definir limites, identificar componentes e variáveis mais importantes, os tipos de relações estabelecidas, além de propiciar suporte para a elaboração de tratamento de dados integrados.

Quando avaliadas estruturalmente, as bacias hidrográficas são sistemas em seqüência, por serem compostas por uma cadeia de subsistemas inter-relacionados por fluxos de energia e de matéria, no qual o fluxo de saída de um corresponde ao fluxo de entrada de outro. Já funcionalmente, são sistemas não isolados por

manterem relações com outros sistemas e abertos por efetuarem trocas constantes de matéria e energia, por meio de seus ambientes de entrada e de saída (CHIARANDA, 2002). As entradas do sistema são representadas pela precipitação e as saídas pela perda de água, sedimentos e materiais solúveis. Outro quesito bastante evidente e conhecido em bacias hidrográficas é o alinhamento hierárquico, característica básica dos sistemas complexos, onde bacias de menor ordem se constituem em sub-bacias de bacias de nível hierárquico superior (MATTOS, PEREZ FILHO, 2004).

Considerando a bacia hidrográfica como uma unidade organizada complexa, esta é formada por subsistemas, de cujas interações resultam a organização do sistema como um todo integrado. A existência de interações não lineares entre os componentes da bacia hidrográfica é um dos fatores que fazem com que esse sistema não se restrinja a ser um simples somatório de suas partes constituintes (MATTOS, PEREZ FILHO, 2004). As bacias hidrográficas apresentam como principais componentes estruturais rochas, relevo, solos, rede de drenagem, flora e fauna, e que podem, por si, constituírem-se em sistemas específicos ou subsistemas (CHIARANDA, 2002; BRAUM, 2007). Como conseqüência da interdependência dos fatores, as bacias hidrográficas apresentam propriedades inerentes e que diferem da soma das propriedades de seus componentes (CHIARANDA, 2002).

Segundo Black (1997; *appud* Chiaranda, 2002) as bacias hidrográficas apresentam cinco funções identificáveis: captação, armazenagem, descarga, meio para ocorrência de reações químicas e habitat. Sendo as três primeiras funções hidrológicas e as duas últimas ecológicas, como demonstradas na figura 2.

A função captação corresponde à captação das águas pela bacia hidrográfica ao longo de um dado período de tempo ou de um evento de precipitação. A quantidade de água captada depende: do posicionamento, da abrangência em relação à área da bacia, duração e intensidade da chuva, bem como do tamanho da bacia. Dentre os tópicos supramencionados dois problemas são relevantes em relação à captação: caso o evento de precipitação cubra a área da bacia totalmente (o que proporciona o fluxo máximo no decorrer do período) e a localização do evento caso este não cubra a área total (neste caso as respostas são variáveis em termos de pico de vazão) (BLACK, 1977).

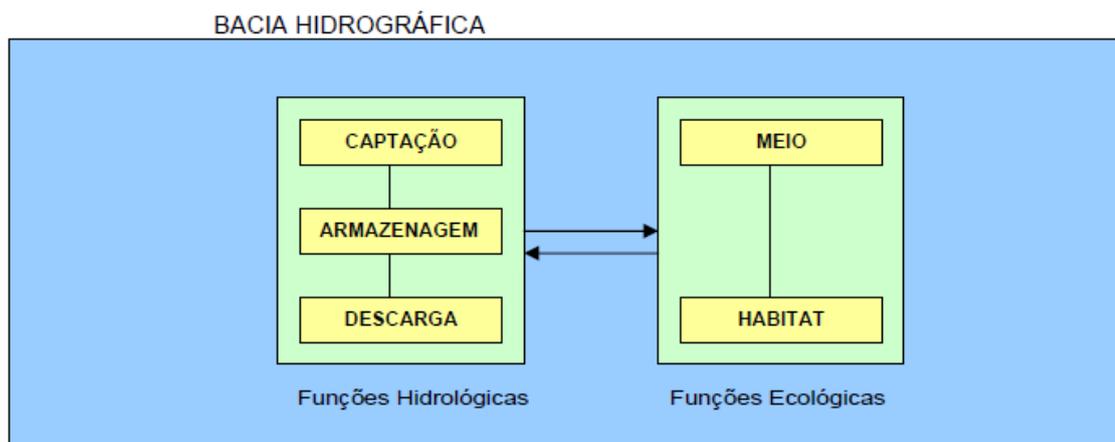


FIGURA 2 – FUNÇÕES HIDROLÓGICAS E ECOLÓGICAS DE UMA BACIA HIDROGRÁFICA.  
 FONTE: BRAUN, 2007.

Segundo Braun (2007) estes problemas citados acima em conjunto com a distância do percurso, declividade, gradiente dos cursos da água, padrão de drenagem e área de influência contribuem para a determinação do comportamento de vazão, da velocidade de escoamento e do tempo de concentração. O padrão de drenagem também desempenha um papel importante desde que o efeito de outros fatores sobre o comportamento do escoamento possam ser mascarado pela distribuição de fluxos nas redes de drenagem.

A função de captação de um divisor de águas é confundida com a natureza e a localização do evento que causa o escoamento: seu tipo, tamanho e distribuição ao longo da bacia hidrográfica; relação com padrões de clima e tempo, e interações com o uso do solo e a proximidade do uso do solo para a origem da área variável (BLACK, 1977).

De acordo com Chiaranda (2002) a área variável de influência (ou área variável de contribuição) desempenha papel importante na determinação do comportamento de vazão. Esta é uma componente da rede de drenagem tanto para a função captação quanto para a função descarga. É definida como sendo as porções do terreno limítrofes aos canais de drenagem e que devido ao seu posicionamento e características físicas do meio poroso contribuem com volumes de água na composição da vazão por intermédio do escoamento sub-superficial e superficial, em eventos de precipitação. Apresenta caráter dinâmico devido ao fato de sofrer expansões e contrações em decorrência da continuidade ou não dos eventos de precipitação e da umidade antecedente do solo (CHIARANDA, 2002). Considerando as características geomorfológicas e de solos o escoamento

superficial pode tornar-se o fluxo preferencial que escorre em canais escavados pela fauna e sistema radicular, nos poros e interface solo-rocha. Muitas vezes isto ocorre em decorrência da substituição da camada vegetal original por outro tipo de uso do solo diminuindo o tempo de concentração (BRAUN, 2007; CHIARANDA, 2002).

A função de armazenagem é uma função intermediária entre captação e descarga e refere-se à minimização dos eventos de precipitação captados pela bacia, através da retenção de água nas componentes de armazenagem. Conforme citado por Chiaranda (2002) e Braun (2007) as componentes foram classificadas por Hewlett (1982) em: interceptação pela vegetação, armazenagem por retenção sub-superficial e superficial, armazenagem por detenção na manta orgânica, armazenagem nas depressões do terreno e armazenagem no solo.

A interceptação pela vegetação se transforma em perda devido ao processo físico da evaporação, a armazenagem por retenção superficial ocorre quando as águas das chuvas são retidas pela resiliência imposta pelas irregularidades da superfície, como por exemplo, quando armazenada nas depressões do terreno. Já a armazenagem por detenção na manta orgânica é dado pelo processo de interceptação por esta através de um processo similar a que ocorre na retenção superficial.

Em contrapartida, a água armazenada no solo é normalmente dividida em porções capilares e não capilares, também conhecidos como armazenamento de retenção e detenção, respectivamente. A água temporariamente retida nos poros não-capilares flui durante as primeiras 24 horas após o evento escoamento (água retida por um curto período de tempo nos poros). No armazenamento de detenção a maioria da água não está disponível para as plantas (permanece por longos períodos nos capilares do solo), e contribui principalmente para o hidrograma temporal na ausência de percolação para reservatórios de água do solo. Em decorrência nota-se que o balanço do armazenamento do solo é mantido por retenção e detenção e afeta a função de descarga por influência direta sobre o fluxo de subsuperfície (BLACK, 1977).

O sistema de fluxo nas bacias hidrográficas pode incluir alguns ou todos os tipos de armazenamento que ocorrem na área. De acordo com Black (1977) dentre os tipos de armazenamento destacam-se o armazenamento no fluxo de solo, vegetação, e as zonas húmidas (incluindo depressão e de armazenamento de canal).

A função descarga corresponde à liberação da água para a rede de drenagem. Uma vez que esta função encontra-se diretamente atrelada às funções de captação e armazenamento é também influenciada pelos fatores que as afetam. O principal fator que afeta a função de descarga é a resistência do armazenamento em liberar água. Esta resistência é inerente aos meios de armazenagem e envolve as características da rede de drenagem, a proximidade dos locais de armazenamento bem como as interações entre ambas (BLACK, 1977). A eficiência da rede de drenagem é determinada principalmente pelas características topográficas da bacia como relevo, solos, rochas e orientação da rede de drenagem bem como pela forma da bacia (BLACK, 1977 *appud* CHIARANDA, 2002).

No que diz respeito às funções ecológicas, Black (1977) descreve que a bacia hidrográfica fornece diversos meios nos quais as reações químicas vitais ocorrem, além de fornecer o habitat para a fauna e flora. As reações químicas propiciam as relações fundamentais que suportam o conceito de homeostase, o qual leva, a longo prazo, à estabilidade das relações entre os elementos do ecossistema.

Com relação ao habitat, a bacia hidrográfica e suas funções hidrológicas são responsáveis por definir características responsáveis pelo suporte da vida aquática. Ao considerar bacias como sistemas abertos nota-se que suas características são influenciadas por insumos de outros sistemas (poeira, cinzas, resíduos biológicos, industriais e humanos) o que é diretamente refletido na qualidade de água. O movimento da água na bacia hidrográfica, através de suas funções hidrológicas, transporta materiais com características químicas, físicas e biológicas próprias, e apresenta como resultado final destas interações um suporte para os diversos nichos ecológicos. Assim, a qualidade do habitat e as características bióticas variam muito de acordo com a cobertura vegetal e os tipos de usos do solo (BLACK, 1977; BRAUN, 2007)

A resposta da combinação das cinco funções é o fluxo característico da rede de drenagem, através das quais, os materiais em suspensão ou solutos movem-se e são depositados nos locais de armazenagem. Estas funções não devem ser discutidas isoladamente já que elas refletem a organização do sistema, e apresentam uma intrínseca relação. As respostas integradas para estes parâmetros são importantes para todos os ambientes aquáticos, pois os componentes físicos das bacias minimizam os eventos de precipitação, assim como a movimentação da

água para fora dos locais de armazenagem regula a movimentação dos elementos químicos (CHIARANDA, 2002; BRAUN, 2007).

Sendo assim, as três funções hidrológicas e as duas funções ecológicas constituem a essência da hidrologia das bacias hidrológicas e da qualidade da água (BRAUN, 2007).

## 2.5. VAZÃO E RENDIMENTO HÍDRICO

Segundo Lima (1986 citado por GUIMARÃES, 2000) o deflúvio ou vazão pode ser considerado o produto residual do ciclo hidrológico. Considerando que o deflúvio corresponde ao volume total de água que passa em determinado período, pela secção transversal de um curso d'água. E, tendo por base que a expressão "rendimento hídrico" refere-se à descarga total da bacia durante um determinado período. Pode-se notar que o deflúvio anual define a expressão "produção de água" ou "rendimento de água" de uma Bacia Hidrográfica. (DNAEE, 1970 *appud* LIMA, 2008). O deflúvio é expresso em mm de altura de água sobre a bacia correspondente.

O termo vazão corresponde ao deflúvio na unidade de tempo ( $m^3/s$ , litros/segundo), e a avaliação da vazão de um córrego pode ser feita de várias maneiras, em função da sua profundidade de largura. A questão se resume a determinar a velocidade de fluxo ( $m^3/s$ ) e a área da secção de controle ou de saída ( $m^2$ ) do volume de água no rio para se obter o produto "V" x "A" e conseqüentemente a vazão ( $m^3/s$ ).

Na equação simplificada do balanço hídrico de uma bacia o deflúvio (Q) representa a fração da precipitação (P) que não é perdida por evapotranspiração (ET) mais ou menos a variação de água que pode ser armazenada no solo, ou seja:

$$P_p - ET - Q \pm \Delta S = 0$$

O deflúvio é geralmente classificado em escoamento direto ( $Q_d$ ) e escoamento base ( $Q_b$ ). O escoamento direto é a parte do deflúvio que é liberada pela bacia durante e imediatamente após a ocorrência de uma chuva. O escoamento

base é a parte do deflúvio que deriva da água subterrânea. Em cursos perenes,  $Q_b$  flui continuamente, enquanto que  $Q_d$  é de caráter intermitente, ocorrendo apenas como resposta da microbacia aos eventos chuvosos (LIMA, 2008).

O balanço hídrico pode ser representado por um hidrograma tipo (figura 3) após uma seqüência de precipitações. Segundo Reyes (2010) citando Tucci (1993) e Villela e Mattos (1975) descreve que após o início da chuva, existe um intervalo de tempo em que o nível começa a subir. Este retardo no tempo de resposta é ocasionado pela interceptação da vegetação e pelas depressões do solo, além do próprio retardo de resposta da bacia em função do tempo de deslocamento da água na bacia. Em geral, a elevação da vazão até o pico apresenta um gradiente maior que a parte posterior ao mesmo. O processo predominante neste período é o escoamento superficial em resposta ao comportamento aleatório da precipitação.

O hidrograma atinge o máximo do seu pico em função da distribuição da precipitação para logo depois apresentar uma recessão onde se observa um ponto de inflexão, que caracteriza o final do escoamento superficial e a predominância do escoamento subterrâneo. Isto ocorre porque o escoamento superficial acontece num meio de rápida resposta e finaliza antes do escoamento subterrâneo que apresenta um retardo maior devido a escoar no solo poroso (REYES, 2010).

A produção de água de uma microbacia inclui o deflúvio e a variação do armazenamento na bacia, inclusive a recarga da água subterrânea. Segundo Lima (1986 citado por GUIMARÃES, 2000) o deflúvio ou vazão pode ser considerado o produto residual do ciclo hidrológico e será influenciado por três grandes grupos de fatores: clima, fisiografia e uso do solo. O clima terá um papel preponderante na formação do escoamento por ser o determinante tanto da precipitação quanto da evapotranspiração.

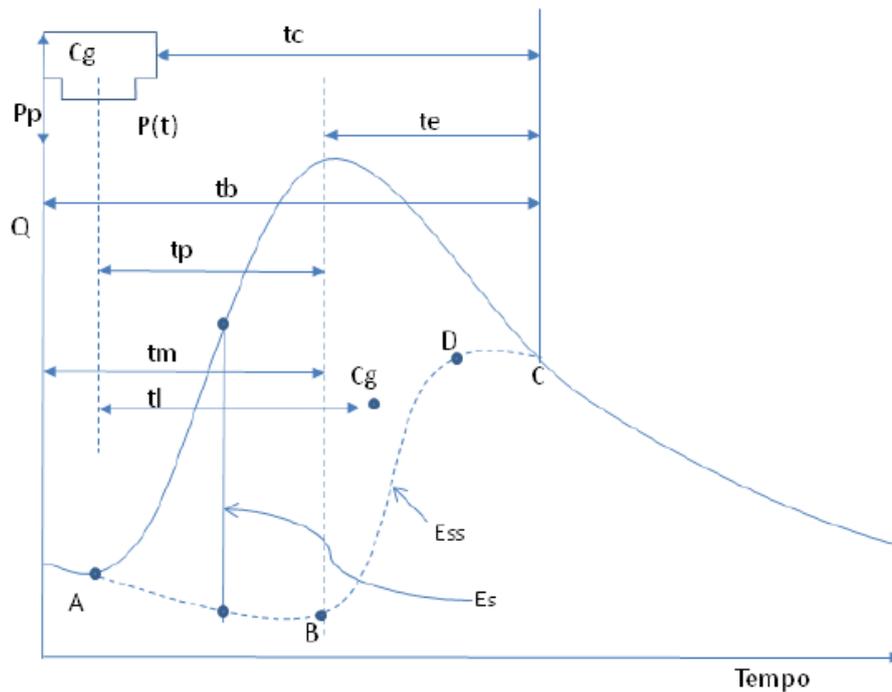


FIGURA 3 - HIDROGRAMA TIPO

FONTE: REYES (2010)

NOTA:  $P_p$  = Precipitação;  $Q$  = Vazão;  $C_g$  = Precipitação efetiva, que produz escoamento direto;  $E_s$  =  $Q_d$  = Escoamento Superficial ou Escoamento Direto;  $E_{ss}$  =  $Q_b$  = Escoamento Subsuperficial ou Escoamento Básico; A = Ponto de inflexão de início de  $Q_d$ ; B = Ponto ou instante de máxima vazão; C = Curva de descenso (tendência de retorno a A); D = Momento de máxima contribuição de  $Q_b$ ;  $t_l$  = tempo de retardamento;  $t_m$  = Tempo ascensão;  $t_p$  = Tempo ponta ou de máxima vazão (pico);  $t_c$  = Tempo de concentração;  $t_e$  = Tempo de recessão;  $t_b$  = Tempo de base

As diferentes manifestações geológicas de uma bacia influenciarão principalmente o escoamento subterrâneo, a característica que mais condiciona o comportamento hidrológico de uma rocha será a sua cristalização. Materiais inconsolidados não apresentam material de cimentação em seus poros e por isso apresentam maior porosidade que os materiais consolidados, a permeabilidade tende a ser baixa (LIMA, 1986 *appud* GUIMARÃES, 2000). As características geomorfológicas da bacia, como a declividade, influenciam todos os processos ligados ao deflúvio (infiltração, escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo), enquanto que outras características físicas como a forma e tamanho da bacia, tipo e densidade de drenagem, variação de altitude determinam a forma do hidrograma decorrente de uma certa precipitação (WHIPKEY e KIRKBY, 1979 *appud* GUIMARÃES, 2000).

O uso do solo também influencia na produção de vazão, pois dois fatores importantes para os processos hidrológicos e que atuam de maneiras divergentes estão relacionados a ele: presença de cobertura vegetal e impermeabilização da

bacia hidrográfica. A presença ou ausência de cobertura florestal determinara como os processos hidrológicos tais como interceptação, evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial se comportaram durante um evento de chuva e após o mesmo (LIMA, 2005 *appud* GUIMARÃES, 2000).

As águas subterrâneas estão em movimento, partindo das áreas de recarga natural ou artificial em direção a áreas de descargas, naturais ou artificiais. A contribuição da vazão subterrânea é influenciada pela infiltração na camada superior do solo, sua percolação e conseqüentemente aumentando o nível do aquífero (TUCCI, 2002). A interação entre o armazenamento de água no solo e o escoamento pode ser identificada após a representação da distribuição da vazão no tempo.

A maneira usualmente utilizada para analisar e representar o rendimento hídrico de uma Bacia Hidrográfica é o hidrograma de vazão que relaciona tempo e vazão. A forma de representação dos hidrogramas depende de um grande número de fatores, os mais importantes segundo Lima, (2008) são:

- Relevo (densidade de drenagem, declividade do rio ou bacia, capacidade de armazenamento e forma): uma bacia com boa drenagem e grande declividade apresenta um hidrograma íngreme com pouco escoamento de base. Normalmente as cabeceiras das bacias apresentam essas características. As bacias com grande área de inundação tendem a amortecer o escoamento e regularizar o fluxo.

- Forma da bacia: influencia o comportamento do hidrograma. Uma bacia do tipo radial concentra o escoamento, antecipando e aumentando o pico com relação a uma bacia alongada, que tem escoamento predominante no canal principal e percurso mais longo até a seção principal, amortecendo as vazões;

- Cobertura da bacia: a cobertura da bacia, como a vegetal, tende a retardar o escoamento e aumentar as perdas por evapotranspiração. Nas bacias urbanas, onde a cobertura é alterada, tomando-se mais impermeável, acrescida de uma rede de drenagem mais eficiente, o escoamento superficial e o pico aumentam. Este acréscimo de vazão implica o aumento do diâmetro dos condutos pluviais e dos custos;

- Modificações artificiais no rio: o homem produz modificações no rio para o uso mais racional da água. Um reservatório para regularização da vazão tende a reduzir o pico e distribuir o volume enquanto a canalização tende a aumentar o pico (bacia urbana);

- Distribuição, duração e intensidade da precipitação: a distribuição da precipitação e sua duração são fatores fundamentais no comportamento do hidrograma. Quando a precipitação se concentra na parte inferior da bacia, deslocando-se posteriormente para montante, o hidrograma pode ter até dois picos. Quando a precipitação é constante, a capacidade de armazenamento e o tempo de concentração da bacia são atingidos, estabilizando o valor do pico. Após o término da precipitação, o hidrograma entra em recessão.

- Solo: as condições iniciais de umidade do solo são fatores que podem influenciar significativamente o escoamento resultante de precipitações de pequeno volume, alta e média intensidade. Quando o estado de umidade da cobertura vegetal, das depressões, da camada superior do solo e do aquífero forem baixos, parcela ponderável da precipitação é retida e o hidrograma é reduzido.

## 2.6. ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA

Como já discutido anteriormente, o desempenho da função armazenamento depende das componentes de armazenagem que se encontram na bacia e de sua distribuição, da resistência inicial à armazenagem e das condições de umidade do solo (HEWLETT, 1982 *appud* BRAUN, 2007). A umidade do solo direciona a movimentação da água no meio poroso através de: infiltração, percolação, escoamento superficial e escoamento sub-superficial e, conseqüentemente, o comportamento hidrológico. Se a camada superficial do solo encontra-se saturada, ou próxima da saturação, um novo evento de precipitação faz com que o escoamento superficial torne-se o fluxo preferencial. Caso isto não ocorra, a água tenderá a infiltrar e percolar até que seja atingida uma condição onde o fluxo preferencial torna-se o sub-superficial (BRAUN, 2007).

A capacidade de armazenamento de água numa Bacia Hidrográfica, no conjunto dos seus componentes (armazenamento em depressões, em canais, no solo, no lençol freático), vai influenciar decisivamente o comportamento hidrológico dessa bacia num evento de chuva. Ou seja, os processos de movimentação da água na bacia (infiltração, percolação, escoamento superficial e sub-superficial, evapotranspiração, etc.) estarão condicionados às condições antecedentes de

armazenamento, principalmente na camada não-saturada do solo, acima do lençol freático (GUIMARÃES, 2000).

Segundo Collischonn (2001) a capacidade de armazenamento do solo influi diretamente sobre o balanço hídrico uma vez que o volume de água retido no solo permanece disponível para a evapotranspiração ao longo do tempo em que não é drenado como escoamento sub-superficial ou subterrâneo. Uma estimativa preliminar pode ser feita considerando variáveis como a porosidade, a profundidade e a textura do solo, bem como a profundidade das raízes uma vez que a capacidade de armazenamento depende da profundidade em que as raízes das plantas podem recuperar a água infiltrada. A capacidade de armazenamento do solo é freqüentemente definida como a diferença entre o conteúdo de água na capacidade de campo e no ponto de murcha. Considera-se, normalmente, que a capacidade de campo é o conteúdo de umidade retido no solo após a drenagem por gravidade. Já o ponto de murcha permanente é o conteúdo de umidade do solo abaixo do qual as plantas não mais se recuperam.

No modelo hidrológico, porém, a capacidade de armazenamento do solo é melhor entendida como a capacidade de absorver a água da chuva gerando pouco ou nenhum escoamento superficial. Em conseqüência disso, a melhor estimativa da capacidade de armazenamento para o modelo hidrológico é a diferença, para o mesmo tipo de solo, do conteúdo de umidade saturado e o conteúdo de umidade no ponto de murcha (COLLISCHONN, 2001). No contexto da disponibilidade de armazenamento de água no solo considerar-se a porosidade, a profundidade e a quantidade de água antecedente como fatores envolvidos (GUIMARÃES, 2000).

O conceito de infiltração no ciclo hidrológico foi introduzido por HORTON (1933), que definiu a capacidade de infiltração ( $f_c$ ) como sendo a taxa final com que um dado solo, em determinadas condições, pode absorver água. Quando a intensidade da chuva ( $P_p$ ) é maior que a capacidade de infiltração ( $I$ ), há a formação de escoamento superficial ( $E_s$ ) (LIMA, 2008). A capacidade de infiltração de água no solo vai diminuir com o tempo durante um evento chuvoso. Isto se deve a dois fatores principais: a) a saturação do solo causa uma redução do gradiente hidráulico próximo a superfície do solo. Isto ocorre em eventos de chuva longos, onde horizontes de baixa permeabilidade estão abaixo do horizonte superficial permeável. O escoamento sub-superficial também pode causar saturação e, b) mudanças na superfície do solo também influenciam a capacidade de infiltração, sendo que uma

das principais mudanças é o inchamento das partículas de argila, o que acaba diminuindo o tamanho dos poros, principalmente próximo a superfície (GUIMARÃES, 2000).

Após um evento chuvoso e finalizados os processos de escoamento superficial e sub-superficial, a umidade restante no solo tende a se redistribuir em uma encosta. A parte mais alta da encosta começa rapidamente a “desaturar“, ou seja, vai transmitindo umidade para as partes mais baixas da encosta, até atingir um estado de equilíbrio. Ao longo desse processo, as partes mais baixas vão recebendo umidade, atingindo um conteúdo de umidade estável próximo à saturação. Nas concavidades da base de uma encosta as condições são geralmente de saturação permanente ou próximo a isso, já que esses locais recebem mais umidade do que transmitem (KNAPP, 1979).

Uma cobertura vegetal densa geralmente garante uma elevada capacidade de infiltração. A camada superficial de matéria orgânica encontrada nestes solos garante uma boa retenção de água e o protege contra a compactação pelas gotas de chuva. Além disso, essa camada superficial é o habitat de animais (insetos, anelídeos, etc.) que formam pequenos túneis, e é onde há um maior desenvolvimento radicular das plantas, sendo que esses fatores contribuem para as boas taxas de infiltração nessas condições. A remoção da cobertura vegetal, seguida por chuvas fortes pode provocar a formação de uma camada superficial de baixa permeabilidade, devido ao encrostamento da superfície e o preenchimento dos vazios. Mesmo com a presença de cobertura vegetal, a compactação causada pelo homem, animais ou máquinas pode destruir a estrutura da camada superficial do solo, e fechar muitos vazios (GUIMARÃES, 2000).

De acordo com Tucci (2002) a ação humana sobre o uso do solo pode produzir alterações substanciais nos processos hidrológicos terrestres como: redução ou aumento da vazão média, máxima e mínima de uma bacia hidrográfica e; alteração da qualidade da água. A alteração da superfície da bacia tem impactos significativos sobre o escoamento. Esse impacto normalmente é caracterizado quanto ao efeito que provoca no comportamento das enchentes, nas vazões mínimas e na vazão média, além das condições ambientais locais e a jusante. As alterações sobre o uso e manejo do solo da bacia podem ser classificados quanto ao tipo de mudança, tipo uso da superfície e a forma de desmatamento. Na tabela 3 são apresentadas as principais classificações.

O desmatamento tende a aumentar a vazão média em função da diminuição da evapotranspiração, com aumento das vazões máximas e diminuição das mínimas (existem situações singulares diversas destas).

TABELA 3 – CLASSIFICAÇÃO SOBRE A MUDANÇA E USO DO SOLO

Classificação	Tipo
Mudança da superfície	- Desmatamento - Reflorestamento - Impermeabilização
O uso da superfície	- Urbanização - Reflorestamento para exploração sistemática - Desmatamento: extração de madeira, cultura de subsistência, anuais e permanentes
Método de alteração	- Queimada - Manual - Equipamentos

FONTE: TUCCI, 2002

Segundo o autor supracitado os principais impactos antrópicos na bacia hidrográfica são:

- O desmatamento para culturas anuais aumenta o escoamento médio de uma bacia pela redução da evapotranspiração. O impacto que isto tem sobre a vegetação e os sistemas hídricos dependem dos efeitos de escalas nas bacias de maior porte. Na literatura existe pouca comprovação sobre o efeito do uso do solo sobre o escoamento em grandes bacias;

- A maioria do conhecimento hidrológico tem sido observado em pequenas bacias, a nível internacional e no Brasil o conhecimento do comportamento ecohidrológico dos biomas nacionais é muito reduzido devido a falta de monitoramento;

- O impacto do desenvolvimento urbano também apresenta um dos efeitos significativos sobre o ambiente criando condições extremamente desfavoráveis sobre os rios na vizinhança dos centros urbanos, além das inundações geradas por projetos de drenagem totalmente inadequados em quase todas as cidades brasileiras.

Mudanças de uso do solo podem alterar, a longo prazo, a disponibilidade de cátions bivalentes no solo, afetando a estabilidade dos agregados, e também - quando o pH do solo diminui- diminuindo a atividade dos microorganismos

produtores de substâncias que ajudam a manter a estrutura do solo. Um pH baixo pode resultar na degradação da estrutura do solo e portanto uma menor taxa de infiltração. O processo de infiltração pode ser dividido espacialmente, em 3 partes: a) zona de transmissão, situada na parte superior do solo onde ocorre a infiltração. Esta zona, após atingir certo nível de umidade, funciona apenas como condutora de água da superfície do solo para as partes mais profundas; b) zona de umedecimento, abaixo da zona de transmissão. O gradiente de umidade nessa zona aumenta com a profundidade; c) frente de umedecimento, que se apresenta na forma de uma superfície irregular com um gradiente de potencial hidráulico muito alto. Observa-se que quando há aumento do índice de umidade no solo há uma diminuição na taxa de infiltração e, por outro lado, há um aumento da taxa de avanço da frente de umedecimento (GUIMARÃES, 2000).

De acordo com Guimarães (2002) os processos que regulam o movimento da água na zona de armazenamento sofrem importantes mudanças na transição de uma bacia de uma característica primitiva ou rural para uma condição urbana. O armazenamento de água de tal bacia será severamente afetado, e os reflexos geralmente são percebidos na forma de enchentes mais freqüentes, maiores e mais impactantes. Por isso é preciso conhecer a influência do armazenamento de água, principalmente no solo, sobre a produção de escoamento. O controle estrutural de enchentes, ou seja, a construção de aparatos tecnológicos que possam diminuir eficazmente o poder destrutivo de uma enchente é na maioria das vezes caro e pode não trazer melhorias efetivas, pois tem ação localizada (somente no leito dos rios ou nas adjacências), não contemplando a situação global da bacia no que se refere à impermeabilização, capacidade de infiltração e armazenamento de água, dentre outras. O controle ambiental, na forma de uma melhoria das condições de armazenamento de água em uma bacia, é uma das ações mais econômicas e duradouras para a minimização dos efeitos de enchentes. Deve-se enfatizar a análise das condições da região espacialmente variável da bacia, conhecida como área variável de contribuição (já descrita anteriormente), pois é esta porção que mais efetivamente atua como produtora de escoamento direto (escoamento total menos o escoamento subterrâneo).

As ações ambientais no sentido de tornar a Bacia Hidrográfica menos vulnerável aos efeitos de precipitações intensas e/ou muito longas tais como a revegetalização, aumento da capacidade de infiltração, devem se concentrar

fundamentalmente sobre esta porção da bacia que se expande. De modo que a água de escoamento proveniente das partes mais altas chega à mesma, ou se contrai, conforme a água armazenada nessa região é liberada primeiramente através de escoamento sub-superficial e superficial de saturação e posteriormente por percolação, evapotranspiração e outros processos (GUIMARÃES, 2000).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. INSERÇÃO GEOGRÁFICA DA ÁREA EM ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do rio Pequeno tem seus limites localizados integralmente no município de São José dos Pinhais, no quadrilátero formado pelas coordenadas 25°29' e 25°37' de latitude sul e os meridianos 48°48' e 49°11' de longitude oeste (Figura 4). Sua área total de drenagem é de 134km<sup>2</sup> (13400 ha), tem como limites: ao norte a bacia do rio Itaqui, ao sul a bacia do rio Miringuava, a leste o relevo montanhoso da Serra do Mar e a oeste o Rio Iguaçu.

#### 3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO AMBIENTAL DA ÁREA DE ESTUDO

##### 3.2.1. Caracterização morfológica da Bacia Hidrográfica

Conforme descrito por Jacobs (2002) a bacia do rio Pequeno trata-se de uma sub-bacia de quinta ordem, pois apresenta um segmento de quinta ordem. Apresenta uma amplitude altimétrica muito baixa, conforme tabela 4, o que demonstra que suas nascentes estão situadas muito próximas, em termos altimétricos do seu exutório.

No tocante ao número de segmentos fluviais, a sub-bacia do rio Pequeno não pode ser considerada uma sub-bacia estabilizada, pois apresenta uma pequena distorção, o que pode estar indicando que no futuro poderão ocorrer alterações da rede de drenagem (JACOBS, 2002).

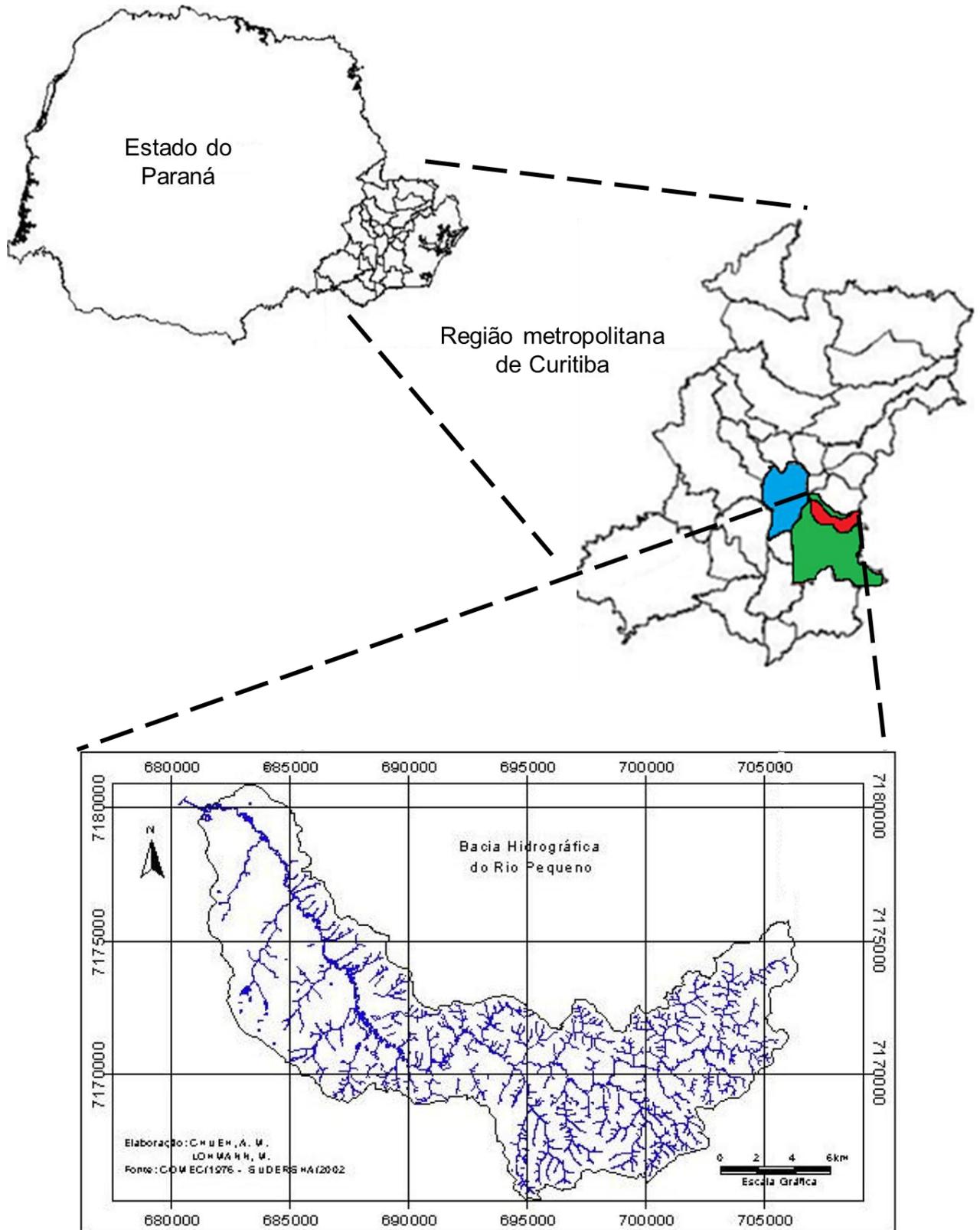


FIGURA 4 – LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO.  
FONTE: ADAPTADO DE SANTOS; KOBIYAMA, 2004.

TABELA 4 – PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DA BACIA DO RIO PEQUENO.

Parâmetro	Valor	Unidade de Medida
Área	134	Km <sup>2</sup>
Perímetro	80,22	Km
Comprimento do rio principal	55,22	Km
Altitude máxima	945	m (s.n.m.m)
Altitude mínima	880	m (s.n.m.m)
Amplitude máxima	65	m
Extensão do percurso superficial	203.66	
Fator de forma	0.17	
Coefficiente de compacidade	1.95	
Densidade de drenagem	2.46	
Densidade hidrográfica	6.09	
Coefficiente de manutenção	0.41	Km

FONTE: Adaptado de JACOBS, 2002.

### 3.2.2. Clima e Hidrografia

O clima da região em que se localiza a bacia do rio Pequeno na classificação de Köppen é do tipo Cfb, isto é, “o clima é temperado propriamente dito, com temperaturas médias do mês mais quente em torno de 22°C. Nos meses mais frios as temperaturas mantêm-se em torno de 18°C (mesotérmicos). Há Ocorrência de chuvas durante o ano inteiro, com precipitações mensais superiores aos 60 mm, mesmo nos meses mais secos. De maneira geral, a umidade aumenta com a proximidade da Serra do Mar (IAPAR,1994).

Já com relação à hidrografia (figura 5), o rio Pequeno é formado por seus afluentes menores os rios Purgatório e Charqueado, cujas nascentes aparecem junto à Serra do Mar e desenvolve-se em direção ao rio Iguaçu no sentido leste - oeste, sua maior parte está situada na Bacia Sedimentar de Curitiba, a qual é resultado de um represamento tectônico sofrido pelo rio Iguaçu durante o Pleistoceno (MAACK,1981).

### 3.2.3. Geologia e Geomorfologia

O sistema hidrográfico da micro-bacia do rio Pequeno está superposto geologicamente a duas entidades maiores: a Bacia de Curitiba e ao Complexo Granítico da Serra do Mar (ROCHA, 1996).

A bacia sedimentar de Curitiba é composta por rochas metamórficas e plutônicas formadas no pré-cambriano e recobertos com sedimentos do período Quaternário (CHUEH, 2004). O Complexo Granítico da Serra do Mar ou Complexo Gnáissico-Migmatito que ocorre nas porções central e nordeste da bacia, formado principalmente por migmatitos associados com xistos magnesianos e gnaisses, mica-xistos, anfíbolitos, quartzitos e rochas metabásicas (ROCHA, 1996 e CHUEH, 2004).

Conforme a classificação realizada por AGUASPARANA, de maneira simplificada foram apontados cinco grupos geológicos específicos na bacia do rio Pequeno: Aluviões atuais e Terraços aluvionares; Formação Guabirota; Complexo Gnáissico-Migmatitos e Complexo Granítico-Gnáissico, descritos a seguir (Tabela 5) e ilustrado na Figura 6. O mapa completo da geologia do Paraná carta de Curitiba 1:250.000 está apresentado no anexo1.

TABELA 5 – UNIDADES GEOLÓGICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO

UNIDADES GEOLOGICAS	EXTENSÃO DA COBERTURA	
	Área (km <sup>2</sup> )	Relativa(%)
Complexo Gnáissico-Migmatitos	78,48	60,16
Formação Guabirota	27,44	21,03
Aluviões atuais	20,22	15,5
Complexo Granítico-Gnáissico	2,18	1,67
Terraços Aluvionares	2,13	1,63
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>130,45</b>	<b>100,00</b>

FONTE: o autor (2012)

- Aluviões atuais: Os aluviões cobrem extensas áreas da Região Metropolitana de Curitiba, com destaque para as proximidades de Curitiba na bacia do Alto Iguaçu (Araucária, Fazenda Rio Grande, São José dos Pinhais e Pinhais), além da Lapa, Porto Amazonas e Contenda. São constituídos por sedimentos de deposição fluvial, predominando termos arenosos e leitos de cascalho. Os aluviões associam se a

depósitos de várzea e de talude. Os depósitos de várzea são sedimentos inconsolidados, de pequena espessura, aparecendo em áreas restritas ao longo de alguns rios, sendo constituídos por siltes e argilas, em parte turfosos e com areias de diversas granulações, localmente com leitos de cascalho onde predominam seixos de quartzo, bem selecionados e arredondados, indicando transporte efetivo. Também têm idade holocênica.

- Terraços Aluvionares: Podem ser definidos em dois agrupamentos distintos: aqueles esculpidos nos depósitos tidos como pleitocênicos, com aspecto genérico; e os que se acham encontram presentes nos sedimentos holocênicos, que podem ser considerados típicos, que na realidade são os baixos terraços fluviais dos afluentes da cabeceira do rio Iguaçu. Estes últimos compreendem os Terraços aluvionares, presentes no baixo curso da bacia do rio Pequeno, e que estão depositados sobre a formação Guabirotuba (BIGARELLA e SALAMUNI, 1962; CHUEH, 2004).

- Formação Guabirotuba: Sedimentos mais antigos da bacia de Curitiba e ocupam o baixo curso da bacia do rio Pequeno. Segundo BIGARELLA e SALAMUNI (1962), é constituída por um pacote de sedimentos inconsolidados do Plioceno e Pleistoceno, representados por camadas e lentes de argilas, arcósios, areias e cascalhos que repousam discordantemente sobre as rochas do embasamento cristalino. Sua espessura raramente ultrapassa os 60m, porém em algumas regiões variam de 70 a 80m de profundidade.

- Complexo Gnáissico-Migmatitos: Corresponde a maior parte da formação geologia da bacia do rio Pequeno. Os migmatitos apresentam aspecto granitóide, granulação grosseira a média com bandeamento irregular. Sua composição mineralógica é essencial é constituída de feldspato envolvidos por matriz de quartzo, feldspato, bioita, hornblenda e outros minerais de ferro-magnezianos (ROCHA, 1996).

- Complexo Granítico-Gnáissico: São encontrados nas partes altas da bacia do rio Pequeno, mais especificamente junto às nascentes do rio Purgatótio e apresentam um alto grau de intemperismo devido a ação climática. As rochas apresentam intercalações ferro-magnezianas e quartzo-feldspáticas com granulação variando de média a muito fina. Os afloramentos podem ser observados em poços cacimba com espessuras variando de 3 a 10m. (ROCHA, 1996).

Com relação à geomorfologia Tabela 6 e Figura 7, a Bacia Hidrográfica do rio Pequeno está inserida na parte oriental do Planalto de Curitiba, no Primeiro Planalto

Paranaense, em uma área de transição entre os domínios da Serra do Mar e aquele Planalto MAACK (1981).

TABELA 6 – UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO.

UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	EXTENSÃO DA COBERTURA	
	Área (km <sup>2</sup> )	Relativa(%)
Planalto de Curitiba	57,64	44,19
Planalto do Alto Iguaçu	39,96	30,63
Planícies Fluviais	25,86	19,82
Blocos Soerguidos da Serra do Mar	6,99	5,36
TOTAL GERAL	130,45	100,00

FONTE: o autor (2012)

- Blocos Soerguidos da Serra do Mar: Os Blocos soerguidos da Serra do Mar representam a menor porção da bacia do rio Pequeno e estão localizados a leste - nordeste da bacia, nas encostas oeste da Serra do Mar, onde estão as nascentes dos afluentes do rio Pequeno, os rios Charqueado e Purgatório. Apresentam vertentes retilíneas com vales em forma de V fechados, seus topos têm formato alongado e em cristas apresentando também uma dissecação muito alta.
- Planalto de Curitiba: Unidade geomorfológica que ocupa a porção leste - sudeste, nos limites com a Serra do Mar, as colinas são dissecadas e elevadas, com alta declividade e também vales em forma de 'V' (TONETTI, 1993). A parte central da bacia possui relevo mais suave, com amplas colinas arredondadas em forma de meia laranja e vertentes côncavo - convexas, com declividade mais branda e presença de depósitos aluvionares mais significativos (GUIMARÃES, 2000). Possuindo topos alongados e aplainados.
- Planalto do Alto Iguaçu: Nas porções centro-norte e centro-sul da bacia, ladeando os aluviões, as colinas são amplas com vertentes côncavo-convexas e topos amplos. A sudeste do médio curso da bacia, as colinas são bastante dissecadas com vertentes curtas e íngremes.
- Planícies Fluviais: No terço inferior, esta bacia é caracterizada a sudoeste pelas várzeas de inundação do rio Pequeno, por vertentes longas e de baixa declividade, a formação Guabirota aflora na forma de colinas suavemente arredondadas, e limita a planície de inundação do rio Pequeno com terraços fluviais

aplainados, amplos interflúvios e largos depósitos aluvionares influenciados pela confluência com o rio Iguaçu (ROCHA,1996), apresentando a menor densidade de drenagem em relação aos demais setores.

### 3.2.4. Solos

A bacia do rio Pequeno apresenta cinco classes distintas de solo, tabela 7, conforme descrição feita por (GUIMARÃES, 2000), ilustradas na figura 8, são elas:

TABELA 7 – CLASSES DE SOLO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO.

Classes de Solo	EXTENSÃO DA COBERTURA	
	Área (km <sup>2</sup> )	Relativa(%)
Argissolo	45,60	34,96
Gleissolo/Organossolo	30,64	23,49
Latossolo)	29,32	22,48
Cambissolo	22,90	17,55
Afloramento de Rocha/ Neossolo Litólico)	1,99	1,53
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>130,45</b>	<b>100,00</b>

FONTE: o autor (2012)

- **Cambissolo:** São encontrados em relevo suave ondulado, na parte central da bacia onde os solos são mais profundos e bem mais desenvolvidos do que o restante da bacia. Apresentam textura argilosa e a sua capacidade de retenção de água varia de pequena a média. São solos que drenam com facilidade.
- **Latossolo:** São encontrados nas áreas de rampas de colúvio. Apresentam textura argilosa e alta permeabilidade. São profundos e bem drenados, com alta porcentagem de argila, sendo assim tem uma boa porosidade.
- **Argissolo:** São encontrados nas áreas de relevo mais enérgico da bacia, são menos profundos que os Latossolos, mas o acúmulo de argila no horizonte B, produz uma diferença textural entre os horizontes A e B, que dificulta o fluxo de água no sentido vertical, já que o horizonte A é bem mais permeável que o horizonte B. As dificuldades advindas desta característica fazem com que este solo se sature com facilidade e seja mais suscetível ao escoamento superficial e sub-superficial.
- **Gleissolo/ Organossolo:** São encontrados em sua maioria no terço inferior da bacia, contudo acompanha as várzeas d inundaçãõ da bacia. São solos mal

drenados e saturados de água, devido a elevação do lençol freático. As características hidráulicas do seu principal componente (argilas) o tornam pouco permeável.

- Neossolo Litólico/ Afloramento Rochoso: foram agrupados segundo Chueh (2004), no mapa pedológico por apresentarem semelhante grau de erodibilidade. O Afloramento de Rocha é qualquer exposição natural de rochas na superfície. Já o Neossolo Litólico é o solo com horizonte A ou O hístico com menos de 40 cm de espessura, assentado diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr ou sobre material com 90% (por volume), ou mais de sua massa constituída por fragmentos de rochas em diâmetro maior que 2 mm (cascalhos, calhaus e matacões) e que apresenta um contato lítico dentro de 50 cm da superfície do solo. Admite um horizonte B, em início de formação, cuja espessura não satisfaz a qualquer tipo de horizonte B diagnóstico.

### 3.2.5. Cobertura Vegetal Original

A cobertura vegetal da bacia do rio Pequeno, conforme classificação feita pela SUDERHSA está descrita na Tabela 8 e ilustrada na figura 9.

TABELA 8 – UNIDADES FITOESTRATIGRÁFICAS DA BACIA DO RIO PEQUENO

Unidades Fitoestratigráficas	EXTENSÃO DA COBERTURA	
	Área (km <sup>2</sup> )	Relativa(%)
Estepe Gramíneo Lenhosa	45,60	34,96
Floresta Ombrofila Mista	29,32	22,48
Floresta Ombrofila Densa	22,90	17,55
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>130,45</b>	<b>100,00</b>

FONTE: o autor (2012)

- Estepe Gramíneo Lenhosa: Caracterizada de acordo com a distância dos canais principais, caracterizadas pela presença de espécies adaptadas as condições edáficas de especiais (solos freqüentemente ou permanentemente alagados de escoamento lento) . Nas áreas onde não ocorrem inundações, ou estas são raras ocorrem os campos naturais, geralmente expostos a pastagens.

- Floresta Ombrofila Mista: São regiões que apresentam composições distintas, de acordo com o estágio de desenvolvimento e das condições edáficas. Vão desde capões em formações com a predominância de Pinheiro brabo (*podocarpus lamberti*) até regiões com o relevo é suave ondulada onde apresentam-se exemplares de pinheiro do Paraná (*Araucaria angustifolia*). Nas regiões próximas a Serra do Mar a presença de agrupamentos densos do pinheiro do Paraná, semelhante a mata com Araucária a sua composição interior é mais complexa.
- Floresta Ombrofila Densa: É uma região de transição, na encosta da Serra do Mar onde ocorre uma transição entre a Floresta Ombrofila Mista e a Mata Atlântica. Apresenta na porção noroeste da bacia uma miscigenação de espécies das duas formações, com regiões ainda bem preservadas.

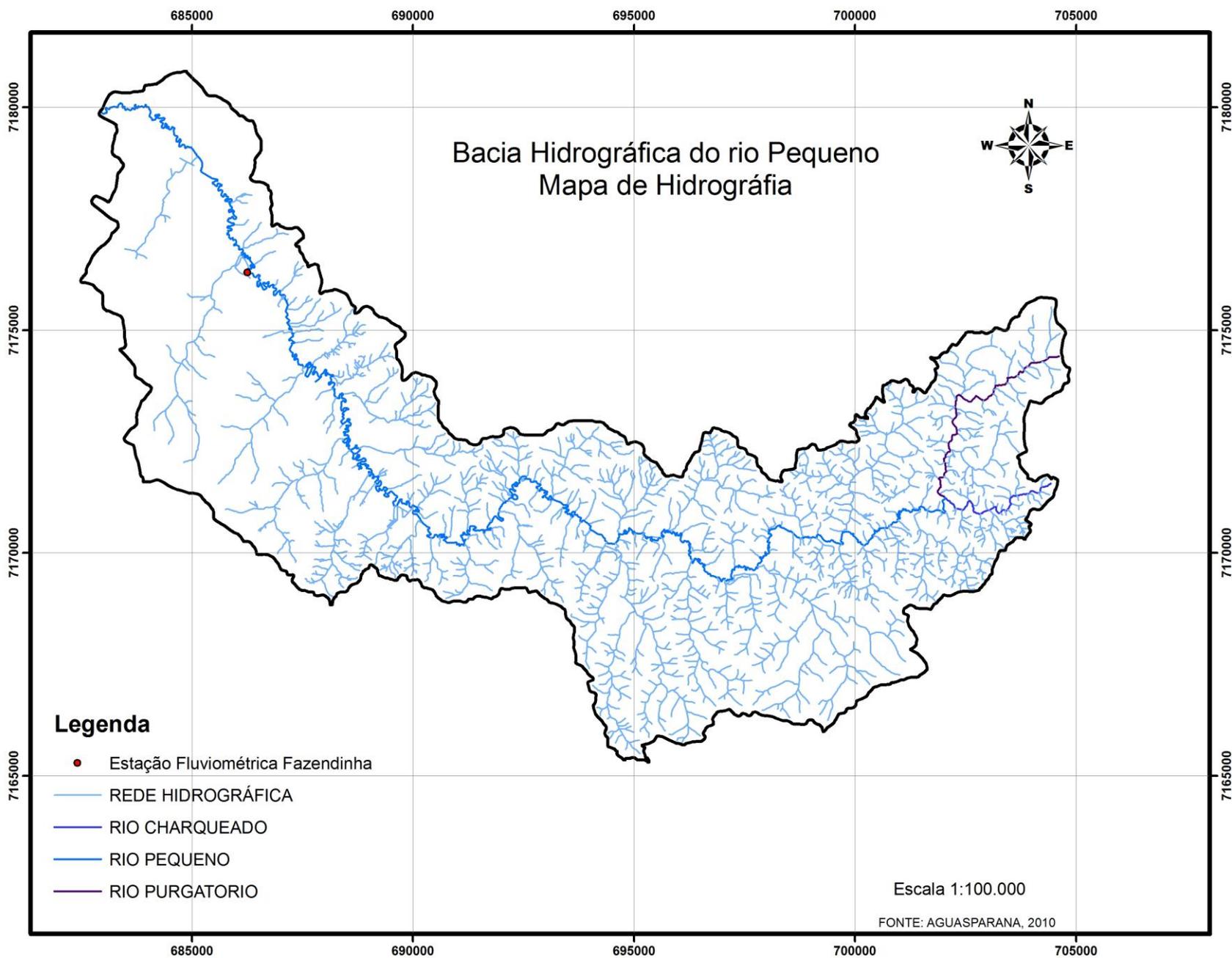


FIGURA 5 – MAPA DE HIDROGRAFIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO

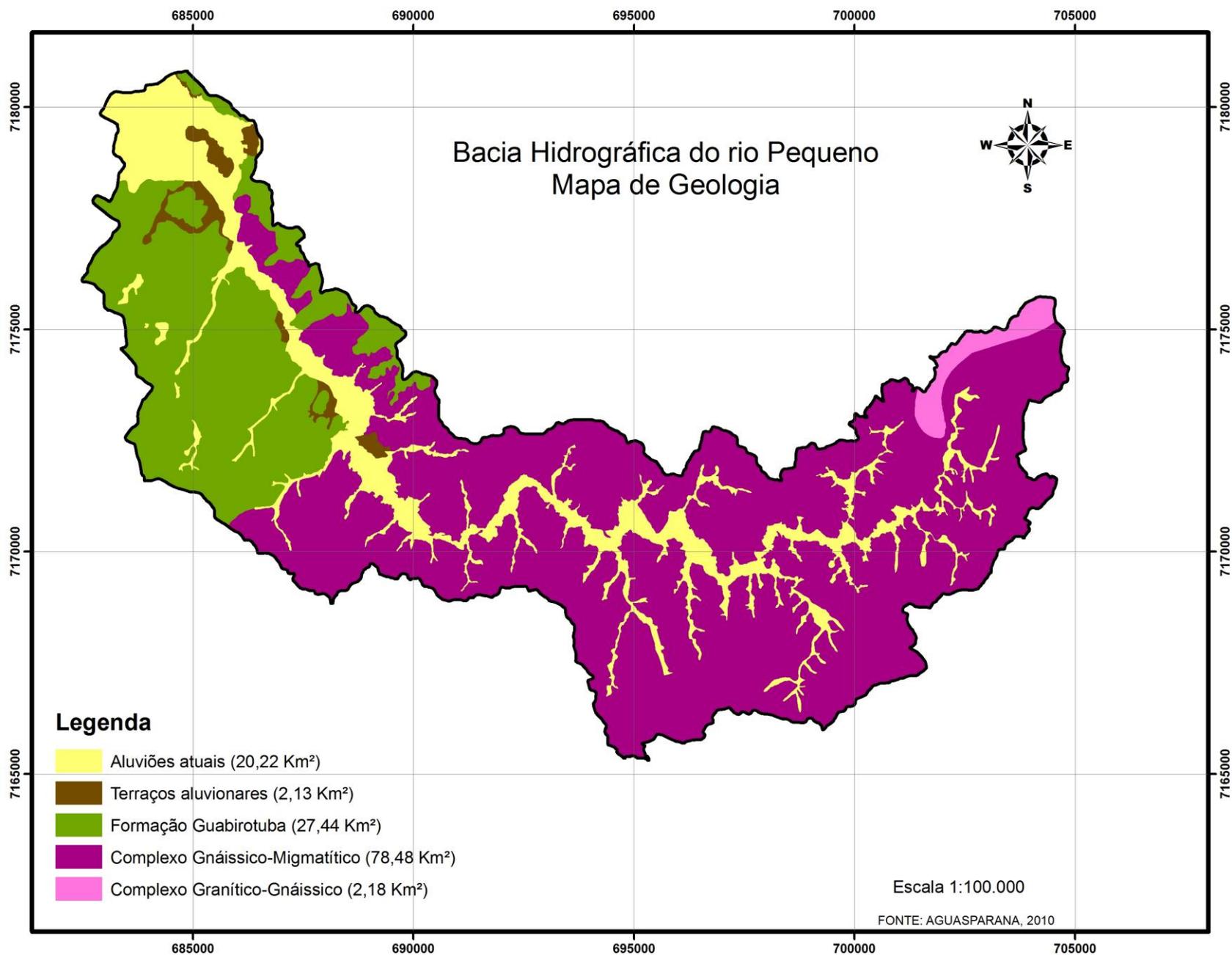


FIGURA 6 – MAPA DE GEOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO.

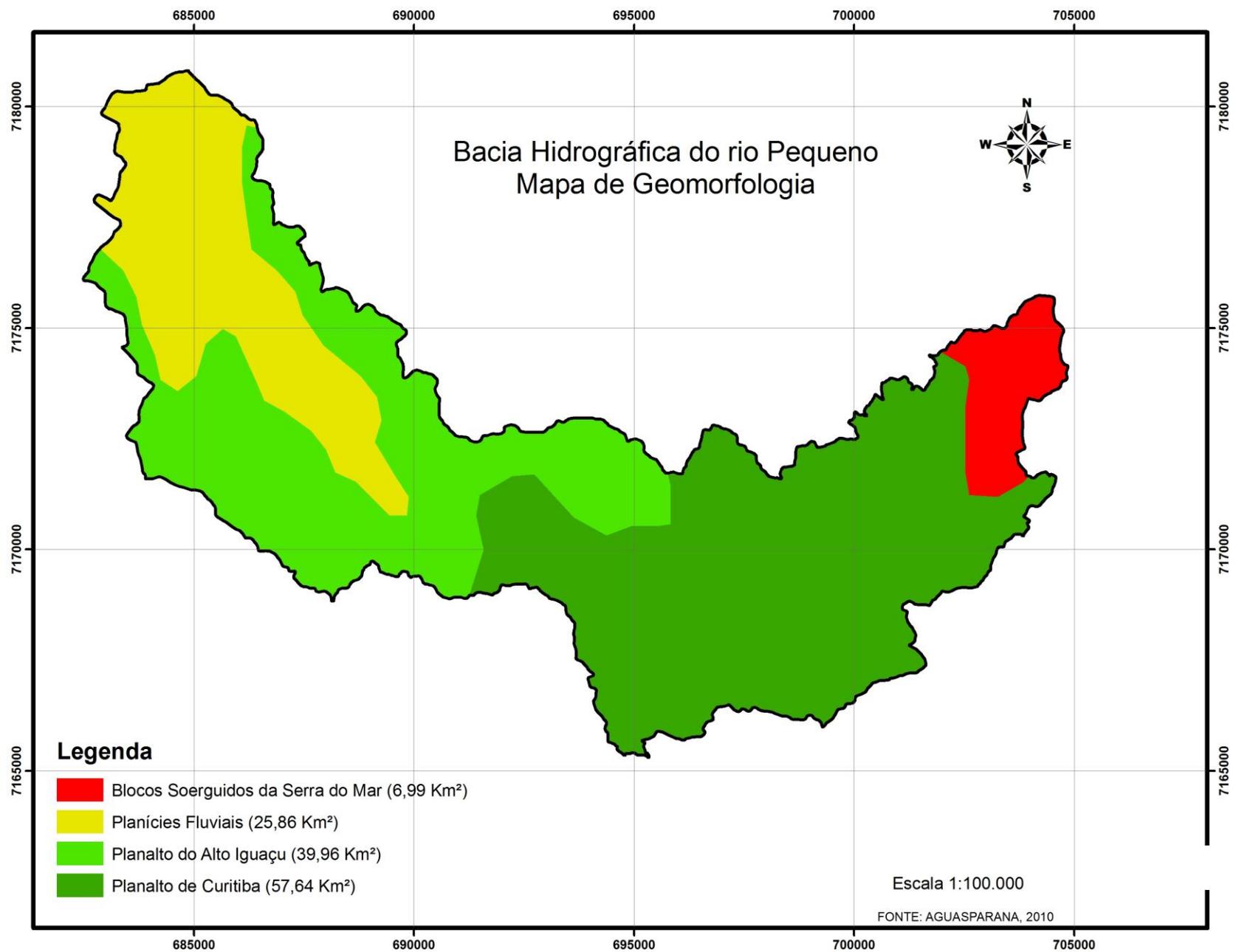


FIGURA 7 - MAPA DE GEOMORFOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO.

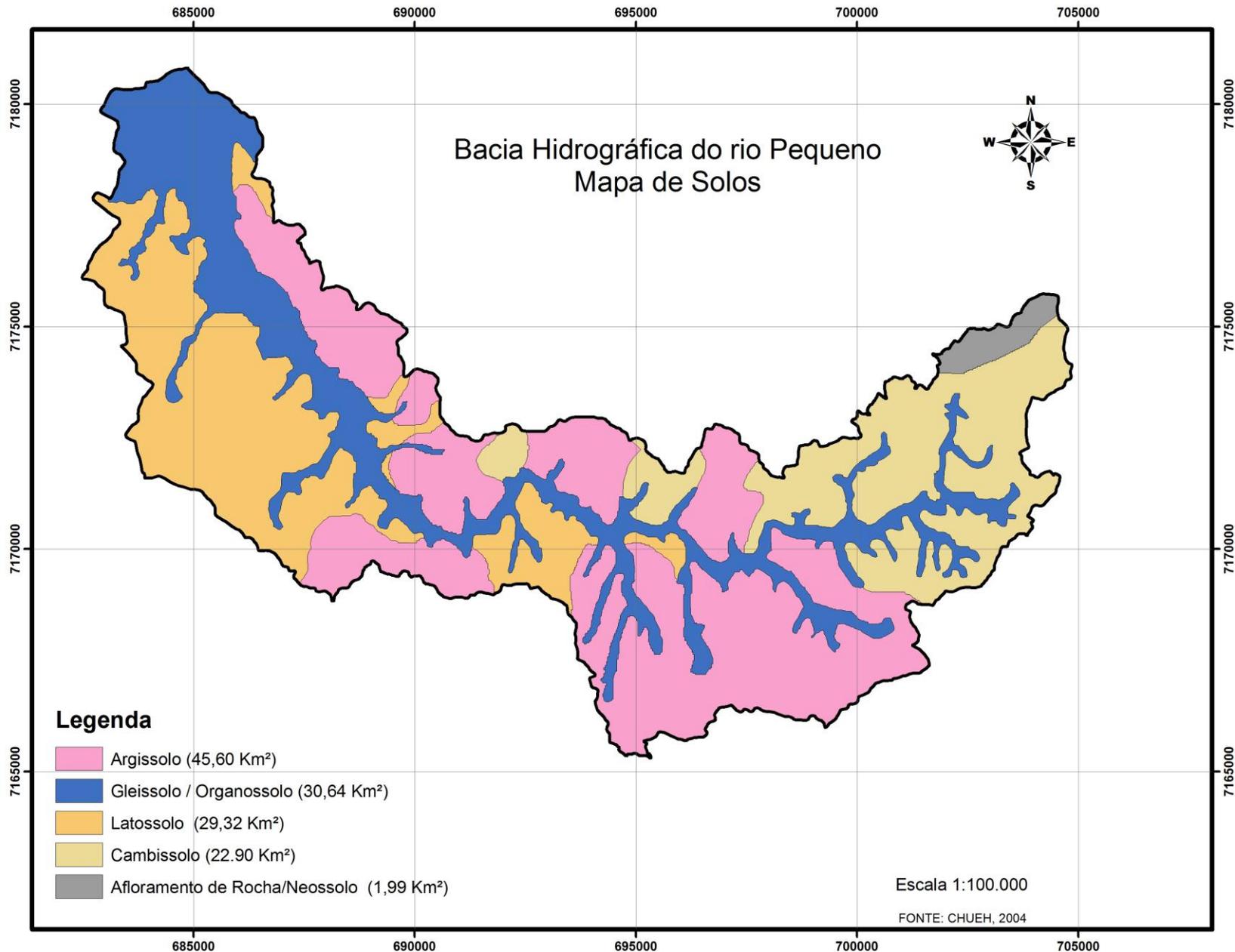


FIGURA 8 – MAPA DE SOLOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO

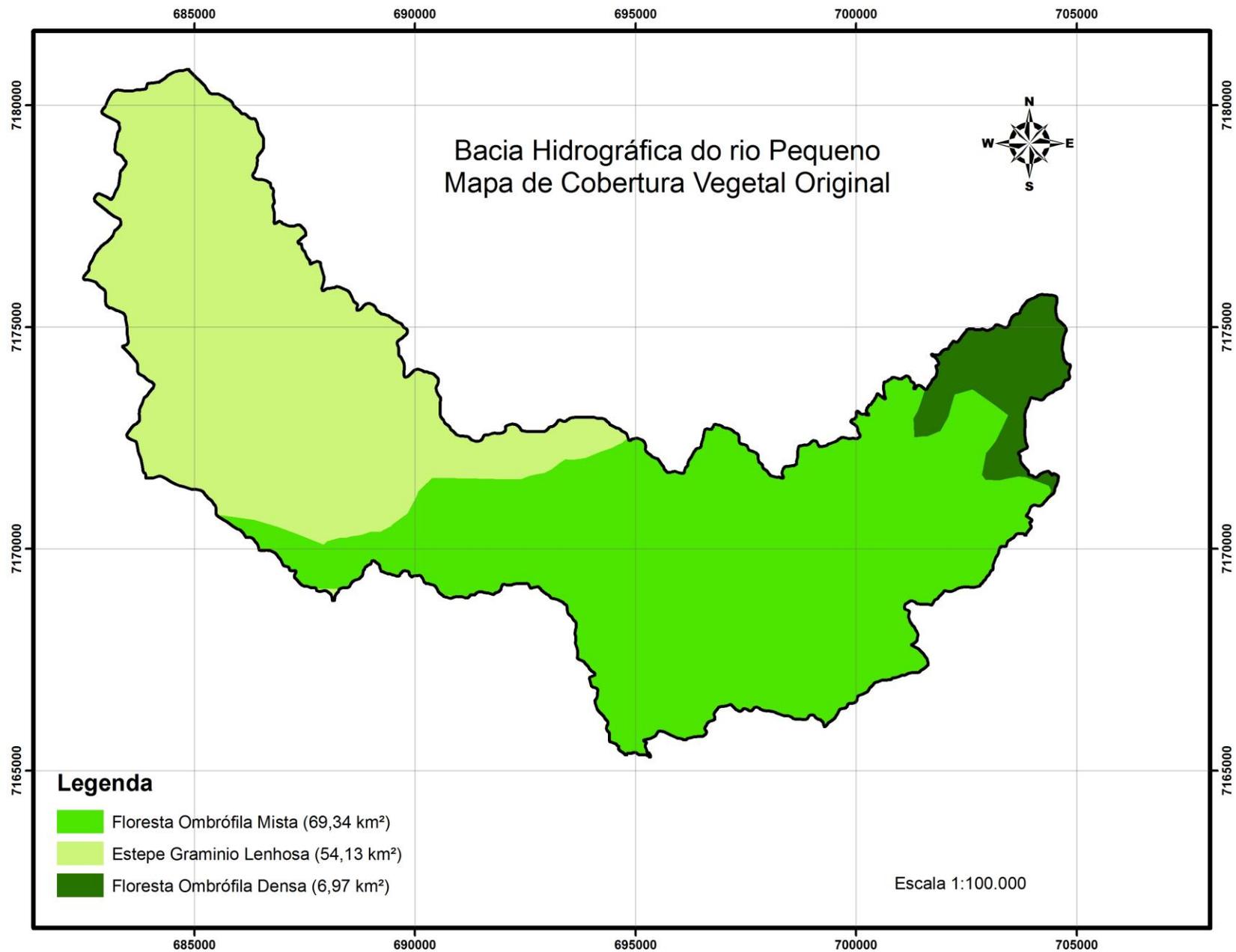


FIGURA 9 – MAPA DE UNIDADES FITOESTRATIGRÁFICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PEQUENO.

### 3.3. MODELO DE ANÁLISE DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO

O sistema Bacia Hidrográfica apresenta, quatro camadas (subsistemas), conforme descrito por Chiaranda (2002) e utilizado por Braun (2007), definidos como Camada Aérea, Superfície, Subsuperfície e Condições de Profundidade. Cada subsistema apresenta um conjunto de elementos que podem influenciar no objetivo do presente trabalho.

O subsistema Camada Aérea tem como principais elementos de interesse a Precipitação e a Camada Vegetal, o subsistema Superfície tem como principais elementos de interesse: (i) Geomorfologia e (ii) Solos. Já o subsistema Sub Superfície, tem como principais elementos de interesse o Solo e a Geologia.

Outra etapa qualitativa importante consiste em identificar e quantificar os processos relevantes (variáveis) a cada um dos elementos, a fim de que se possam realizar mensurações e obtenção de dados (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Para o sistema sub-Bacia Hidrográfica do rio Pequeno, as variáveis consideradas são as seguintes: **(a)** para o elemento Precipitação: altura de precipitação anual; **(b)** para o elemento Camada Vegetal: grau de proteção da cobertura vegetal original e grau de proteção dos usos do solo; **(c)** para o elemento Geologia: a permeabilidade das rochas; **(d)** para o elemento Geomorfologia: fluxo preferencial em profundidade e declividade; **(e)** para o elemento Solos: potencial de infiltração de águas nos solos e potencial da profundidade para armazenamento de água. A escolha das variáveis pautou-se nos conceitos hidrológicos, que por sua vez permitem estabelecer as relações intrínsecas entre as variáveis e para o conjunto delas (Figura 10).

É através da metodologia que se explicam às categorias e conceitos utilizados, definem-se os procedimentos e delimita-se o objeto de investigação. Sob a ótica desta teoria, os processos, resultam dos principais agentes internos e externos que atuam na Bacia Hidrográfica e os sistemas associam os elementos e processos que atuam conjuntamente, ambos sob o enfoque das relações temporais de trocas de matéria e energia (MORAES, 1994).

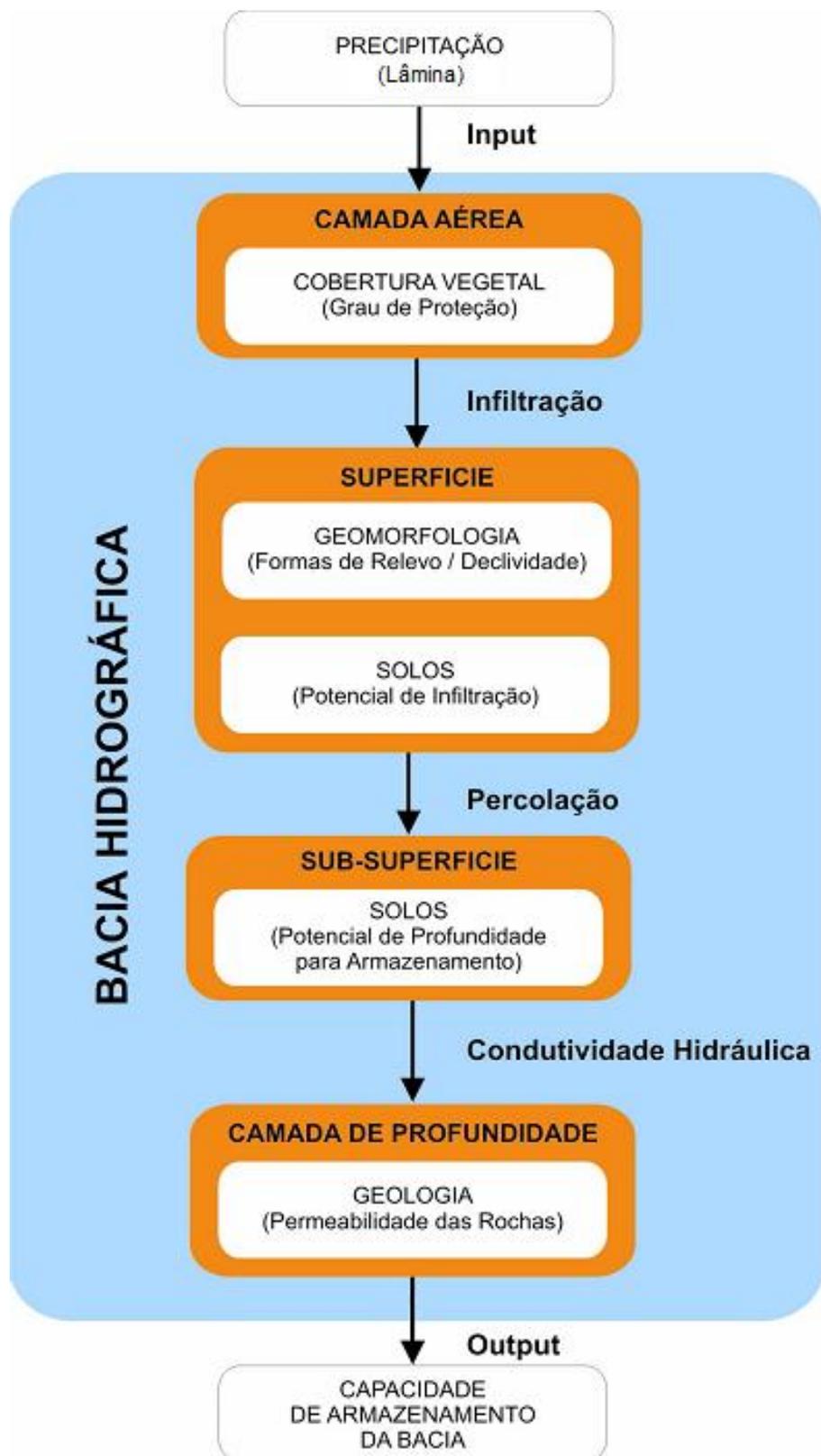


FIGURA 10 – MODELO DE ANÁLISE DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DA BACIA.  
 FONTE: ADAPTADO DE BRAUN, 2007.

A abordagem sistêmica contribui para definir os limites do sistema, identificar os elementos importantes e os tipos de interações que ocorrem entre eles, sem

perder de vista os objetivos a serem alcançados. Para este trabalho, variáveis externas são todas as variáveis que não se encontram dentro da definição do sistema, mas que controlam o fluxo de massa e energia, podendo em alguns casos, determinar de forma conclusiva, a sua orientação, o que significa dizer que a resposta é o resultado das interações entre diversas forças em um controle multivariado.

Os aspectos técnicos operacionais dizem respeito aos instrumentais e as técnicas que são utilizadas a fim de atingir os objetivos deste trabalho, e são uma extensão e complementação dos princípios metodológicos.

O presente estudo é de caráter físico integrativo e envolve diversas variáveis, por isso, faz-se necessário o uso de diferentes técnicas e procedimentos referentes à caracterização da função armazenagem.

Para um melhor entendimento das fases da metodologia foi elaborado o fluxograma apresentado na figura 11.

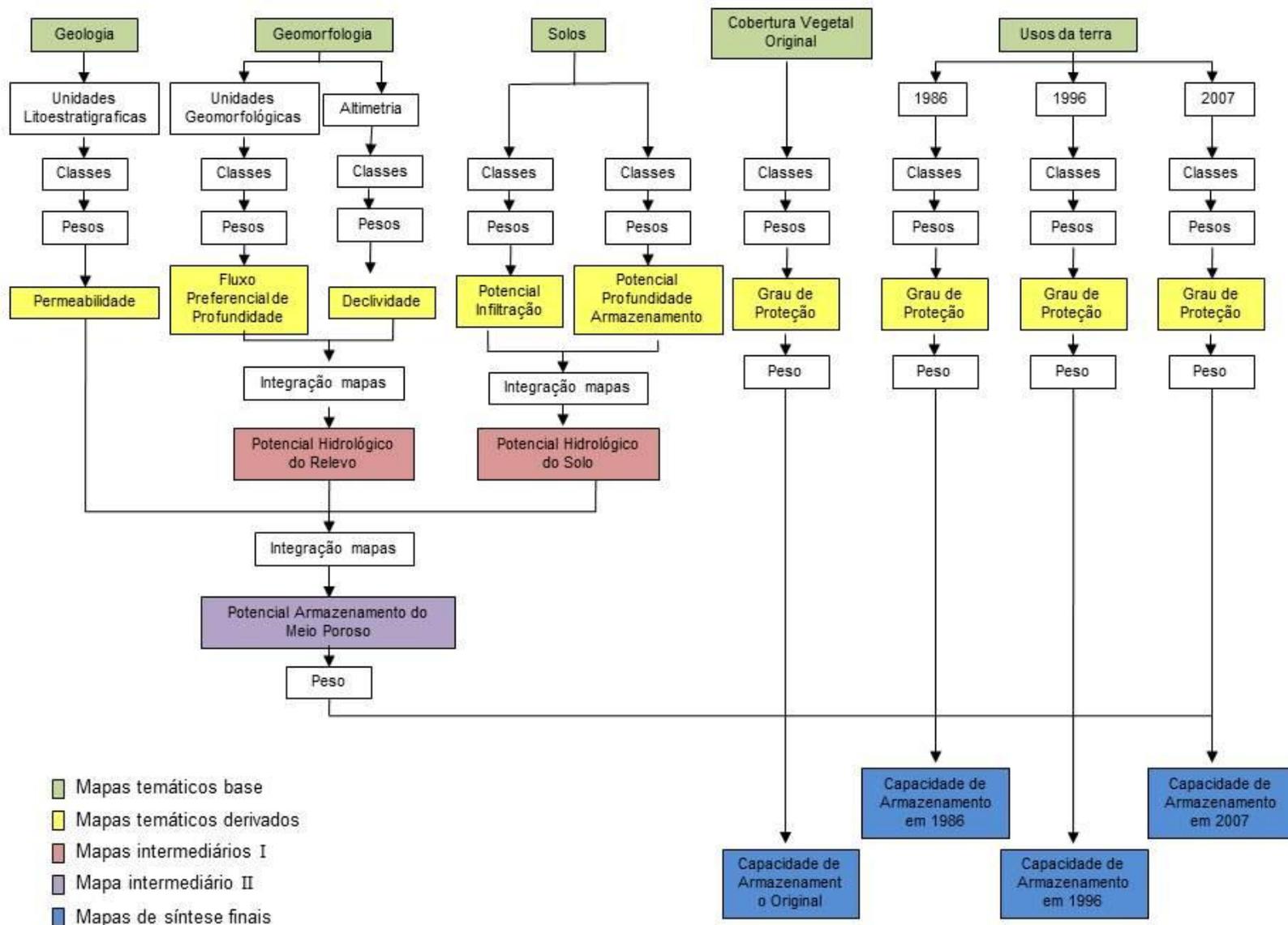


FIGURA 11 – FLUXOGRAMA METODOLÓGICO  
 FONTE: Adaptado de CHIARANDA (2002)

### 3.3.1. Capacidade atual de armazenamento

De forma geral, pode-se dizer que o presente trabalho abrange as seguintes etapas:

1 - Análise de Mapas Temáticos da Bacia do rio Pequeno, que representam os elementos (geologia, geomorfologia, relevo, cobertura vegetal) e as variáveis (permeabilidade e porosidade das rochas, fluxo preferencial em profundidade, potencial de infiltração e potencial de profundidade para armazenagem do solo, declividade, grau de proteção da superfície e tipos de uso do solo, qualidade da cobertura vegetal, zoneamento ecológico, entre outras) relevantes para a capacidade de armazenamento da bacia;

2 - Aplicação de um modelo adaptado do modelo de Análise em Sistema Geográfico de Informações (CHIARANDA, 2002).

3 - Descrição das Unidades dos elementos em classes de acordo com o grau de significância (influência) para a capacidade de armazenamento de águas subterrâneas;

4 - Ponderação dos elementos temáticos;

5 - Confecção de mapas: mapas temáticos base, mapas temáticos derivados, mapas intermediários e mapas finais.

Baseado na metodologia, de caráter genérico, denominada “Os Quatro Níveis da Pesquisa Geográfica” (LIBAULT, 1971 appud CHIARANDA, 2002), elaborou-se e desenvolveu-se o Modelo de Análise em Ambiente de Sistema Geográfico, para elaboração das cartas de síntese, devido à necessidade de tratamento quantificado das informações (CHIARANDA, 2002). A metodologia denominada “Os Quatro Níveis da Pesquisa Geográfica”, divide o desenvolvimento de uma pesquisa em quatro partes:

- Nível Compilatório: composto pela obtenção de informações fornecidas por mapas temáticos, observações em campo (quando necessário) sobre a estrutura da paisagem e pela seleção dos dados que tem valor para a pesquisa.

- Nível Correlativo: referente à correlação dos dados e informações, constituindo-se em um momento de melhoramento da interpretação e do estudo da natureza dos dados.

- **Nível Semântico:** interpretativo, chegando a resultados conclusivos a partir dos dados selecionados e correlacionados nas etapas anteriores, estabelecendo as generalizações possíveis, onde os dados puros deixam de ser informações factuais ou numéricas para assumirem caráter significativo em nível de interpretação.

- **Nível Normativo:** fase de elaboração do modelo, representado através de cartogramas síntese ou de gráficos que traduzem de forma mais simples e visual os resultados da pesquisa.

O modelo de análise de dados espaciais, a ser utilizado, é do tipo empírico, baseado no conhecimento. Sua aplicação deverá ser efetuada com o uso de técnicas de concorrência ponderada, através do qual cada unidade homogênea das componentes, bem como cada componente, será avaliada de acordo com critérios ponderados que resultam em uma escala ponderada de potencialidade. A potencialidade será calculada pela ponderação e combinação de evidências de várias fontes. A avaliação do peso a ser atribuído a cada um dos mapas depende da análise da importância ou do julgamento subjetivo de especialistas. A ponderação e a combinação das evidências das componentes serão efetuadas com o auxílio de dois instrumentos: a hierarquização das componentes e o processo analítico hierárquico. O ponto de partida, a ser utilizado, para a hierarquização é a de que o armazenamento de água na Bacia Hidrográfica depende, no âmbito da função hidrológica de armazenagem, dos processos hidrológicos que ocorrem na superfície.

Será considerado, também, o fato de que o todo é maior que a soma das partes, o que traduz a interatividade das componentes de armazenagem da bacia com os fluxos hidrológicos ordenados e os processos, assim como a propriedade única que advém desta interação. Procura-se demonstrar desta forma, que a Bacia Hidrográfica não é uma simples somatória de variáveis com respostas unidirecionais de causa e efeito, mas sim uma estrutura “viva” e complexa.

Para o ordenamento das componentes da Bacia Hidrográfica serão considerados quatro níveis verticalmente articulados (Figura 12):

Nível L – que é o nível principal, onde ocorrem os processos hidrológicos na superfície e sub superfície do solo, tais como: infiltração, escoamento superficial e sub superficial.

Nível L+1 - que é um nível secundário, onde ocorre o processo hidrológico de interceptação nas várias componentes de armazenagem e atenuação inicial dos fluxos de precipitação.

Nível L-1 e Nível L-2: são níveis secundários, onde ocorrem os processos de armazenagem no solo e percolação (Nível L-1) e armazenagem no lençol freático e escoamento base (Nível L-2).

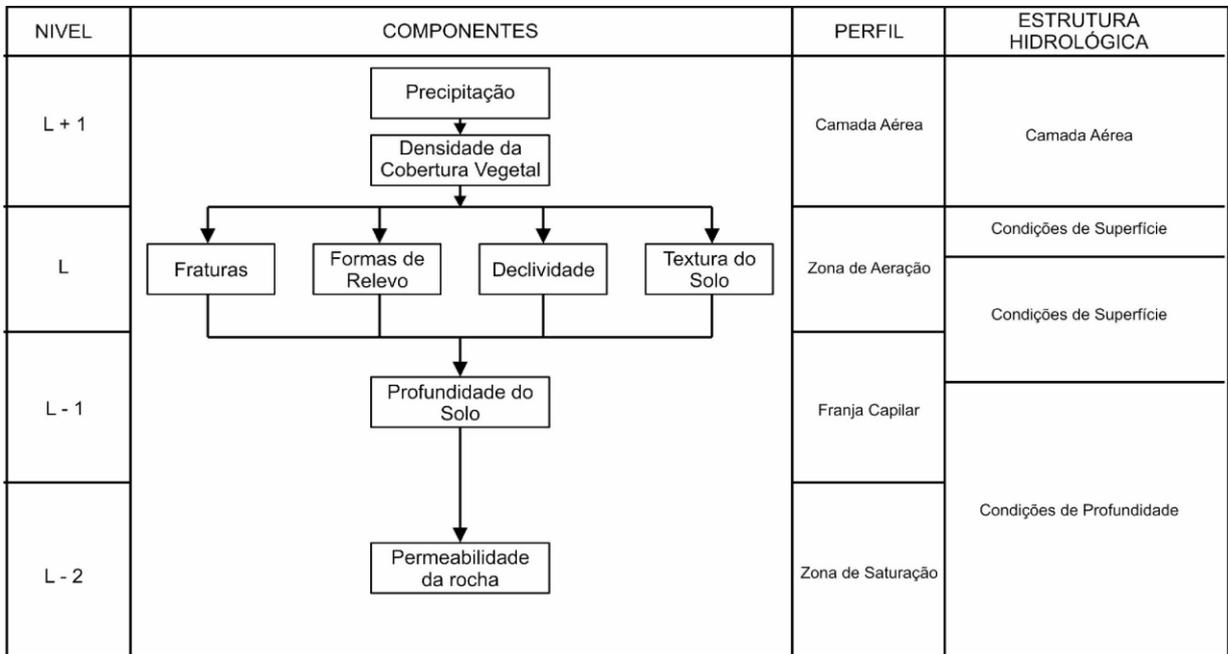


FIGURA 12 – ORGANIZAÇÃO HIERÁRQUICA DOS COMPONENTES (VARIÁVEIS).  
 FONTE: ADAPTADO DE CHIARANDA (2002).

Processo Analítico Hierárquico (*Analytical Hierarchical Process*), segundo Chiaranda (2002) consiste na elaboração de uma matriz de comparação entre os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão. Nesse processo, os fatores são comparados dois a dois e um critério de importância relativa derivada de uma escala continua de 09 pontos é atribuída ao relacionamento entre os mesmos, conforme a Tabela 9.

Uma taxa de consistência é calculada quando da comparação dos fatores no âmbito da matriz, e deve apresentar como resultado valor inferior a 0,1. Quando o valor resultante é superior a 0,1 a matriz deve ser reorganizada, alterando os valores de comparação entre os fatores. A taxa de consistência indica a probabilidade de que os valores de comparação entre os fatores tenham sido gerados aleatoriamente (SAATY, 1997 *appud* CHIARANDA, 2002).

TABELA 9 – ESCALA DE VALORES DO PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO PARA COMPARAÇÃO PAREADA.

Intensidade de Importância	Denominação	Definição	Explicação
1	Igual	Importância Igual	Os dois fatores contribuem para o objetivo
2	Um pouco melhor	Importância intermediária	Possibilidade de compromissos adicionais
3	Algo melhor	Importância moderada que outro	Um fator é ligeiramente mais importante
4	Moderadamente melhor	Importância moderada	Possibilidade de compromissos adicionais
5	Melhor	Importância essencial	Um fator é claramente mais importante
6	Bem melhor	Importância intermediária	Possibilidade de compromissos adicionais
7	Muito melhor	Importância demonstrada	Um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
8	Criticamente melhor	Importância intermediária	Possibilidade de compromissos adicionais
9	Absolutamente melhor	Importância extrema	A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível

FONTE: CAMARA et al., 1996 *appud* CHIARANDA, 2002.

Uma taxa de consistência é calculada quando da comparação dos fatores no âmbito da matriz, e deve apresentar como resultado valor inferior a 0,1. Quando o valor resultante é superior a 0,1 a matriz deve ser reorganizada, alterando os valores de comparação entre os fatores. A taxa de consistência indica a probabilidade de que os valores de comparação entre os fatores tenham sido gerados aleatoriamente (SAATY, 1997 *appud* CHIARANDA, 2002).

No ambiente do Sistema de Informações Geográficas, o manuseio dos dados adquire a forma de um conjunto de operações algébricas que resultam em mapas numéricos que configuram a estrutura da estatística espacial e da modelagem cartográfica, permitindo a análise simultânea de várias camadas ou *layers* (HISCOCK et al., 1995).

### 3.3.2. Fase I – Constituição de Banco de Dados

Como procedimentos técnicos foram efetuados consulta documental e tratamento e processamento dos dados, conforme descrito a seguir.

Foram realizadas consultas documentais para a caracterização da Bacia Hidrográfica e para a obtenção de dados referentes à evolução da substituição da cobertura vegetal original.

O conjunto de mapas temáticos base foi composto pelos mapas referentes aos temas geologia, geomorfologia, solos, altimetria, rede de drenagem, cobertura vegetal original, e usos do solo nos anos de 1986, 1996 e 2007.

A delimitação das bacias hidrográficas foi feita pelo setor de geoprocessamento (ATIG) da SUDERHSA em 2007, utilizando-se as cartas do IBGE, na escala 1:50.000 e 1:100.000, escaneizadas e georeferenciadas no datum SAD-69. Os Mapas temáticos de Geologia, Geomorfologia, Declividade, Uso do Solo, Fitogeográfico e Hidrografia na escala de 1:2.000.000, disponibilizados através do site do Instituto de Terras, Cartografia e Geociências – ITCG

Imagens Multiespectral TM-Landsat 5, órbita ponto 220/78 dos anos de 1986, 1996 e 2007, que recobrem a área de estudo, obtidas através do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

#### 3.3.2.1. Processamento e Análises das Imagens

O objetivo das análises das imagens de satélites é a identificação e localização espacial das diferentes tipologias de uso do solo que ocorrem na sub-bacia do rio Pequeno em cada época observada. As tipologias adotadas foram baseadas nas recomendações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE para a classificação da vegetação brasileira descritas na tabela 10.

Para o processamento das imagens de satélite foi utilizado o software ENVI 4.5 - *Environment for Visualizing Images*. Primeiramente as imagens foram georreferenciadas foi utilizado o método de correção geométrica que consiste em: selecionar pontos de controle no terreno, ou seja pontos facilmente identificáveis

tanto na base cartográfica quanto na imagem de satélite. Estes pontos são localizados na imagem espectral e através de coesões polinomiais as distorções e deslocamentos da imagens são sensivelmente diminuídos.

TABELA 10 – CLASSES DE USO DO SOLO PARA OS ANOS DE 1986, 1996, 2007

Classes de Uso	Descrição
Floresta	Floresta Ombrofila Mista e Floresta Ombrofila Densa em fase avançada de sucessão secundária
Caporeira	Floresta Ombrofila Mista e Floresta Ombrofila Densa em fase intermediária de sucessão secundária
Varzea	Floresta Ombrofila Mista e Densa Aluvial e Formações Pioneiras de influencia Aluvial
Reflorestamento	Reflorestamento com Espécies Exóticas
Campos	Campos naturais (estepes) e antrópicos (pastagens)
Urbano	Áreas urbanas residencial, comercial e industrial
Agricultura	Cultivos agrícolas e pecuária

FONTE: o autor (2012)

Posteriormente foi realizada uma classificação supervisionada da imagem utilizando o mesmo software, que consiste em selecionar amostras de treinamento, amostras estas que são representativas de cada atributo ou característica do terreno (neste caso, tipologias de uso do solo) e representam o comportamento médio das classes que deverão ser mapeadas automaticamente. A ferramenta de classificação do software, baseia-se nessas amostras para identificar em qual classe de uso cada pixel da imagem mais se assemelha estatisticamente.

Os critérios de definição de classes se basearam principalmente nas características comportamentais das formas de uso do solo em relação ao ciclo hidrológico. Por isso as tipologias florestais Floresta Ombrófila Mista e Floresta Ombrofila Densa e certos estágios de sucessão vegetal, diferenciáveis facilmente em campo, mas com certa dificuldade em imagens multiespectrais foram agrupadas na mesma classe, devido aos processos hidrológicos serem similares.

O algoritmo de classificação utilizado foi o de Máxima Verossimilhança (JENSEN, 2009), que assume a condição de que os pixels contidos nas amostras de treinamento de cada classe, se encontram numa distribuição normal. Este algoritmo

compara o vetor de intensidade de brilho de cada pixel com o vetor médio das amostras de treinamento de cada classe.

Após a classificação da imagem de satélite, precedeu-se com a homogeneização do resultado da classificação, através da ferramenta filtragem. Em visita a campo foram realizadas observações, para conferência da classificação das imagens de satélite referentes nas áreas de várzea, floresta, campo e reflorestamento, como pode ser visto nas figuras 13,14,15.



FIGURA 13 – ÁREA COM VÁRZEA NA BACIA DO RIO PEQUENO  
FONTE: o autor (2012)



FIGURA 14 – ÁREA COM CAMPO E FLORESTA NA BACIA DO RIO PEQUENO  
FONTE: o autor (2012)



FIGURA 15 – ÁREA COM REFLORESTAMENTO NA BACIA DO RIO PEQUENO  
FONTE: o autor (2012)

### 3.3.3. Fase II – Processamento dos Dados

Nesta fase, os dados armazenados junto ao banco de dados foram processados com a finalidade de se efetuar a representação das expressões das componentes estruturais da Bacia Hidrográfica. Os produtos cartográficos gerados nesta fase foram denominados de Mapas Temáticos Derivados.

Os mapas temáticos derivados são os mapas que contém as unidades (tipológicas) organizadas em classes de importância relativas ao potencial de recarga dos aquíferos. Os mapas temáticos derivados utilizados neste trabalho são a representação da expressão hidrológica das componentes geologia, geomorfologia, solos, cobertura vegetal original, usos da terra. Foram desenvolvidos os seguintes temas derivados:

- Geologia: Permeabilidade das Rochas.
- Geomorfologia: Fluxo Preferencial em Profundidade e Declividade.
- Solos: Potencial de Infiltração e Volume Potencial de Armazenamento.
- Cobertura Vegetal Original e Usos da Terra: Grau de Proteção.

Para a geração dos respectivos mapas temáticos, adotaram-se os seguintes procedimentos: identificação e seccionamento das unidades homogêneas de cada tema, identificação, procedida da caracterização por coloração e quantificação.

#### a) Permeabilidade das Rochas

Refere-se à propriedade que esse meio poroso apresenta para transmitir água sob determinada temperatura e viscosidade. Essa propriedade é dependente da viscosidade do fluido e da porosidade do meio rochoso com termos de volume total e particionamento por tamanho. Também ocorrem dependências em relação à forma, a compactação e a distribuição do tamanho das partículas (CAIECEDO, 2002). A forma das partículas afeta na maneira como as mesmas se arranjam entre si com as formas irregulares resultando em porosidades maiores que as formas arredondadas. Materiais granulares com distribuição uniforme de grãos têm porosidade maior que os materiais com distribuição irregular. O grau de cimentação ou de compactação influi diretamente no valor porosidade, de maneira que quanto mais cimentada estiver uma formação, menor será o valor da porosidade. Na Bacia Hidrográfica, as rochas encontram-se diretamente relacionadas com a função hidrológica de armazenagem, através da armazenagem no lençol freático e com o escoamento base dos sistemas de fluxo hidrológico. Condicionam, em parte, a capacidade de armazenamento de água dos solos e o escoamento superficial (CAIECEDO, 2002).

A classificação das rochas que ocorrem na bacia (tabela 5 e figura 6) quanto à permeabilidade baseou-se na caracterização realizada pela SUDERHSA (2002). Tendo sua classificação em classes de permeabilidade e valoração apresentados na tabela 11.

TABELA 11 – CLASSIFICAÇÃO E VALORAÇÃO DAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS QUANTO À PERMEABILIDADE.

Unidades Homogêneas Base	Rocha	Classe	Peso
Aluviões e Terraços	arenito/ siltito/ argilito	Alta	0,8
Formação Guabirota	argilitos/arcósios	Média	0,6
Complexo Gnáissico-Migmatítico Complexo Granítico-Gnáissico	migmatitos / gnaisses gnaisses	Baixa	0,4

FONTE: o autor (2012)

#### b) Fluxo preferencial em profundidade

É uma expressão hidrológica das formas de relevo. Indica qual é a rota preferencial do fluxo que tenderá a predominar nas diversas formas de relevo que ocorrem na Bacia Hidrográfica, encontrando-se, dessa maneira, relacionados ao

tempo de permanência da água. Como consequência da rota preferencial, pode-se acelerar ou retardar a saída da água da Bacia Hidrográfica.

A aceleração ocorreria pela predominância de fluxos rápidos, como o escoamento superficial, e o retardamento pela predominância de fluxos lentos, como a percolação e o escoamento base e pelo armazenamento nos solos e nas rochas. O fundamento hidrológico utilizado é o da função de armazenagem. Superfícies tabulares tendem a favorecer a infiltração, a percolação e o escoamento base, enquanto que, os de topo aguçados, pela sua configuração, e os de acumulação, pelo seu posicionamento no terreno, tendem a favorecer o escoamento superficial e os subsuperficiais (CABRAL et al., 2003, *appud* BRAUN, 2007).

A classificação e valoração das formas de relevo (tabela 6 e figura 7) são apresentadas na tabela 12.

TABELA 12 – CLASSIFICAÇÃO E VALORAÇÃO DAS FORMAS DE RELEVO QUANTO AO FLUXO PREFERENCIAL EM PROFUNDIDADE.

Unidades Homogêneas Base	Unidade Morfoescultural	Classe	Peso
Planalto de Curitiba	primeiro planalto paranaense	Alta	0,8
Blocos Soerguidos da Serra do Mar	serra do mar	Média	0,6
Planalto do Alto Iguaçu Planícies Fluviais	primeiro planalto paranaense planícies	Baixa	0,4

FONTE: o autor (2012)

### c) Declividade

Refere-se à inclinação que os terrenos da bacia apresentam e constitui-se também em uma expressão hidrológica ao representar as diferentes quantidades de energia que podem interferir na velocidade de escoamento dos fluxos da água pela transformação de energia potencial em cinética (JORGE e UEHARA, 1979, *appud* BRAUN, 2007). Quanto menor for o valor da declividade maior é a possibilidade de a água se infiltrar pelo meio poroso tornando-se fluxo lento. Por outro lado, os terrenos com maior declividade tendem a apresentar fluxos com maior velocidade e com tempo menor de permanência na bacia. As classes de declividade e seus respectivos valores são apresentados na tabela 13.

TABELA 13 – CLASSIFICAÇÃO E VALORAÇÃO DA DECLIVIDADE DOS TERRENOS DA BACIA

Quantitativo (Graus)	Intervalo de Classes		Peso	Energia Disponível
	Classes	Qualitativo		
0 - 3	Planos	Muito Baixa	1,0	Muito Pouca
3 - 8	Suave Ondulado	Baixa	0,8	Pouca
8 - 20	Ondulado a Forte	Média	0,6	Média
20 - 45	Ondulado Montanhoso	Alta	0,4	Grande
> 45	Escarpado	Muito Alta	0,2	Muito Grande

FONTE: Adaptado de EMBRAPA, 1995, modificado por Fushita, 2006.

#### d) Potencial de infiltração do solo

É uma expressão hidrológica do solo referente à penetração de água no seu perfil, que dentre outros fatores, é dependente da textura. Solos com textura arenosa apresentam potencial de infiltração muito alta devido ao seu espaço poroso ser composto predominantemente por macro-poros, o que os torna bem a excessivamente drenados, e permitem que apresentem como reta preferencial de fluxo a percolação ao invés do escoamento superficial. Os de textura argilosa, por outro lado, devido à predominância de microporos, tendem a ser mal a moderadamente drenados, o que permite que apresentem como rota preferencial de fluxo o escoamento superficial.

Outros fatores afetam o potencial de infiltração, como as características da chuva, as condições de cobertura do solo, a estrutura e umidade antecedente do solo e a camada biogênica na camada superficial (CABRAL et al., 2003).

Conforme as características dos grupos de solos que ocorrem na bacia (tabela 7 e figura 8) foram determinadas três classes de potencial de infiltração, que são apresentadas na tabela 14.

TABELA 14 – CLASSES DE POTENCIAL DE INFILTRAÇÃO DOS SOLOS.

Tipo de Solo	Potencial de Infiltração	Peso
Latossolo	Alto	0,8
Argissolo Cambissolo	Médio	0,6
Afloramento de Rocha/Neossolo Litólico Gleissolo / Organossolo	Baixo	0,4

FONTE: o autor (2012)

#### e) Potencial de profundidade para armazenamento

A profundidade, outra característica do elemento solos, será tratada como expressão hidrológica, no sentido de que quanto maior ela for, maior será o espaço disponível para o caminhamento e armazenagem de água, permitindo que a rota preferencial de fluxo seja composta pela percolação, o que tende a aumentar a atenuação dos eventos de precipitação. À semelhança do potencial de infiltração, diversos fatores afetam essa variável, como as condições de umidade do solo, camadas de impedimento, porosidade, sistema radicular, etc. (JORGE e UEHARO, 1979).

Foram determinadas quatro classes de potencial da profundidade para armazenamento (tabela 15) conforme as características dos grupos de solo apresentados na tabela 7 e figura 8.

TABELA 15 – POTENCIAL DA PROFUNDIDADE PARA ARMAZENAMENTO

Tipo de Solo	Potencial da Profundidade	Peso
Latossolo Cambissolo	Alta	1,0
Argissolo	Média	0,75
Gleissolo / Organossolo	Baixa	0,5
Afloramento de Rocha/Neossolo Litólico	Muito Baixa	0,25

FONTE: o autor (2012)

#### f) Grau de proteção

O grau de proteção refere-se aos estágios sucessivos de uma progressão de efeitos de defesa ou proteção que os diferentes tipos de cobertura proporcionam ao solo contra a ação direta dos ventos, da radiação solar e dos eventos de precipitação.

No âmbito da função hidrológica de armazenagem da Bacia Hidrográfica, a proteção advém da retenção temporária dos eventos de precipitação e da diminuição da quantidade de água que chega ao solo devido à evaporação. Nesse processo, os diferentes estratos da vegetação agem como barreira ao livre caminhamento da precipitação, diminuindo sua energia cinética. Papel semelhante é efetuado pela manta orgânica. Esta última, conjuntamente com o sistema radicular e a fauna melhoram as condições superficiais de infiltração. Neste contexto, a rota

preferencial de fluxo tende a ser a da infiltração, percolação e a do armazenamento, com os eventos de escoamento superficial ocorrendo ocasionalmente em função da maior intensidade da precipitação, de forma que o processo erosivo tende às taxas naturais dentro da faixa de amplitude de estabilidade do sistema (ODUM, 1988).

Cabe ressaltar que a relação não é de causa e efeito, mas sim de interação entre as variáveis, e que o efeito é de sinergia entre solo – vegetação – clima. Os usos da terra, ao substituírem a cobertura vegetal original, modificam o sinergismo entre vegetação e clima. Conjuntamente com a substituição da cobertura vegetal original são introduzidos circuitos de trabalho auxiliares (ODUM, 1988), de forma que a proteção proporcionada pela nova cobertura tende a diminuir.

Foram determinadas três classes (tabela 16) de grau de proteção da cobertura vegetal original conforme as unidades fitoestratigráfica (tabela 8 e figura 9) que ocorrem na bacia. Para o grau de proteção da cobertura vegetal foram determinadas sete classes (tabela 17) em função dos usos do solo descritos na tabela 10.

TABELA 16 – CLASSES DE GRAU DE PROTEÇÃO DA COBERTURA VEGETAL ORIGINAL

Unidades Fisiográficas	Grau de Proteção	Peso
Floresta Ombrofila Densa	Alto	0,8
Floresta Ombrofila Mista	Médio	0,6
Estepe Gramíneo Lenhosa	Baixo	0,4

FONTE: O AUTOR

TABELA 17– CLASSES DE GRAU DE PROTEÇÃO DOS USOS DO SOLO

Classes	Grau de Proteção	Peso
Floresta	Muito Alto	1,0
Reflorestamento	Alto	0,8
Capoeira	Alto	0,8
Campo	Médio	0,6
Varzea	Baixo	0,4
Agricultura	Baixo	0,4
Urbano	Muito Baixo	0,2

FONTE: o autor (2012)

### 3.3.4. Fase III – Modelagem para Integração

Os mapas temáticos derivados constituem o fluxo de entrada da terceira fase do modelo que após integração (soma) resultam no produto denominado mapas intermediários I – Potencial Hidrológico do Relevo e do Solo; mapas intermediários II – Potencial de Armazenamento do Meio Poroso; e mapas de síntese finais – Indicador da Capacidade Original e Atual da Bacia.

#### a) Potencial Hidrológico do Relevo e do Solo

Conceitualmente, o potencial hidrológico do relevo foi considerado como sendo a expressão hidrológica integrada que caracteriza no espaço, a componente física geomorfologia, e é o produto da integração das expressões hidrológicas Fluxo Preferencial em Profundidade e Declividade (Figura 11). O mesmo foi feito para o potencial hidrológico do solo, considerando as duas expressões hidrológica, Potencial de Infiltração e Potencial da Profundidade para Armazenamento. Através dessas integrações buscou-se a essência da expressão hidrológica de cada uma dessas componentes do meio físico. Os valores de ponderação para a integração foram determinados por Chiaranda (2002) e estão apresentados na tabela 18 e os valores numéricos utilizados para o fatiamento das classes são apresentados na tabela 19.

TABELA 18 – PESOS CONSISTIDOS ATRIBUÍDOS AOS TEMAS SÍNTESES DERIVADOS

Componente	Tema Derivado	Peso	Tema síntese Intermediário
Geomorfologia	Fluxo Preferencial em Profundidade	0,333	Potencial hidrológico do Relevo
	Declividade	0,667	
Solos	Potencial de Infiltração	0,333	Potencial Hidrológico do Solo
	Potencial de Profundidade para Armazenamento	0,667	

FONTE: CHIARANDA, 2002

TABELA 19 – INTERVALOS DE CLASSES DE FATIAMENTO PARA POTENCIAL HIDROLÓGICO DO SOLO E PARA O POTENCIAL HIDROLÓGICO DO RELEVO NA BACIA DO RIO PEQUENO

Intervalo	Classes
1,0 - 0,8	Muito Alto
0,8 - 0,6	Alto
0,6 - 0,4	Médio
0,4 - 0,2	Baixo
0,2 - 0,0	Muito Baixo

FONTE: CHIARANDA, 2002

## b) Potencial de Armazenamento do Meio Poroso

Foi considerado como sendo a expressão hidrológica que representa as possíveis quantidades potenciais de água que o volume poroso existente no meio (rochas e solo) pode armazenar. Ele foi elaborado pela integração (soma) das variáveis, permeabilidade das rochas e dos temas derivados Potencial Hidrológico do Relevo e Potencial Hidrológico do solo (Figura 11). Tal integração, segundo Chiaranda (2002), se faz necessária devido ao fato que, no caso do relevo, tanto a declividade quanto o fluxo preferencial em profundidade serem produtos de processos de forças que atuam dentro do sistema, de fora para dentro através da atmosfera e de dentro para fora através da litosfera e da energia interior da terra. A dinâmica imposta pela declividade ao fluxo hídrico do terreno, através dos quais podem ser acelerados ou não em função da quantidade de energia disponível, assim como a erosão que as formas de relevo sofrem devido aos fluxos. Desta forma foram atribuídos pesos a cada um dos temas e a integração foi executada com a ajuda de um operador de lógica ponderada. Os pesos atribuídos aos temas foram determinados por Chiaranda (2002) têm como base o processo analítico hierárquico, e são apresentados na tabela 20.

TABELA 20 – PESOS CONSISTIDOS ATRIBUÍDOS AOS TEMAS DERIVADOS

Tema Derivado	Peso
Permeabilidade das Rochas	0,297
Potencial hidrológico do Relevo	0,163
Potencial Hidrológico do Solo	0,540

FONTE: CHIARANDA, 2002

A integração dos temas foi efetuada utilizando a ferramenta *Union* do sistema de Informações Geográficas ArcGis 9.3. Sendo o produto resultante da integração

transformado em classes de importância e o produto final o Mapa de Potencial de Armazenamento do Meio Poroso. A tabela 21 demonstra as classes de importância.

TABELA 21 – INTERVALOS DE CLASSES DE FATIAMENTO PARA POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO DO MEIO POROSO NA BACIA DO RIO PEQUENO

Intervalo	Classes
1,0 - 0,8	Muito Alto
0,8 - 0,6	Alto
0,6 - 0,4	Médio
0,4 - 0,2	Baixo
0,2 - 0,0	Muito Baixo

FONTE: CHIARANDA, 2002

### c) Capacidade Potencial de Armazenamento da Bacia

Para a determinação da capacidade potencial de armazenamento de água da bacia foram elaborados quatro mapas de capacidade de armazenamento de água. O primeiro mapa considerou o cenário da bacia hidrográfica como sistema natural levando em conta apenas a cobertura vegetal original (tabela 16) desconsiderando o uso do solo com atividades econômicas ou sociais, ou seja, constitui o retrato da sua capacidade de armazenamento natural. Já os demais mapas representam cenários da bacia nos anos de 1986, 1996 e 2007 estes consideram as atividades sócio-econômicas presentes na área em cada período analisado (tabela 17).

Para a elaboração dos mapas foi efetuada pela integração do potencial de armazenamento do meio poroso da bacia com o grau de proteção proporcionado pela cobertura vegetal original e pelos usos da terra nos anos de 1986, 1996 e 2007. Foi atribuído, conforme determinado por Chiaranda (2002), peso de 0,667 para o potencial de armazenamento do meio poroso e 0,333 para o grau de proteção do cenário considerado.

### 3.3.5. Análise de Precipitação

Para análise das séries históricas de precipitação foi construído um yetograma utilizando dados anuais do período de 1976 a 2006. Estes dados foram fornecidos pela SANEPAR e coletados pela estação da Fazendinha instalada em 04

de junho 1964 a 25° 31' 09" de Latitude Sul e 49° 08' 48" de Longitude Oeste com altitude de 910m.

### 3.3.6. Análise de Vazão

A análise das séries históricas de vazão foi realizada através da construção de um hidrograma baseado nas séries históricas de vazão media mensal dos anos de 1976 a 2006. Além da análise da curva permanência a qual se baseou nos dados de vazão média mensal dos anos de 1985, 1986, 1995, 1996, 2005 e 2006. Foram escolhidos estes anos por serem os anos que antecedem a data da imagem de satélites. Estes dados foram fornecidos pela SANEPAR e coletados pela estação da Fazendinha, instalada em 28 de janeiro de 1955 a 25° 31' 09" de Latitude Sul e 49° 08' 48" de Longitude Oeste a 910m de altitude e área de drenagem de 116,86 Km<sup>2</sup> da bacia do rio Pequeno.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. ANÁLISE DAS EXPRESSÕES HIDROLÓGICAS DOS COMPONENTES

Nesta seção será apresentada a expressão hidrológica das componentes do meio de armazenagem da bacia do rio Pequeno (tabela 22), as quais foram descritas na fase II (item 3.3.3), processamento dos dados.

TABELA 22 – QUANTIFICAÇÃO DA EXPRESSÃO HIDROLÓGICA DAS COMPONENTES

Expressão Hidrológica	Classe	Pesos	Área (Km <sup>2</sup> )	%	Unidades Homogêneas Base
Permeabilidade	Alta	0,8	22,34	17,13	Aluviões e Terraços
	Média	0,6	27,44	21,03	Formação Guabirotuba
	Baixa	0,4	80,67	61,84	Complexo Gnáissico-Migmatítico Complexo Granítico-Gnáissico
Fluxo Preferencial em Profundidade	Alta	0,8	57,64	44,20	Planalto de Curitiba
	Média	0,6	6,99	5,36	Blocos Soerguidos da Serra do Mar
	Baixa	0,4	65,82	50,48	Planalto do Alto Iguaçu Planícies Fluviais
Declividade	Muito Alta	0,2	0,09	0,07	Escarpado
	Alta	0,4	8,92	6,84	Montanhoso
	Média	0,6	36,89	28,28	Ondulado a Forte Ondulado
	Baixa	0,8	22,41	17,18	Suave Ondulado
	Muito Baixa	1	62,14	47,64	Plano
Potencial de Infiltração do Solo	Alta	0,8	29,32	22,47	Latossolo
	Média	0,6	68,53	52,52	Argissolo Cambissolo
	Baixa	0,4	32,63	25	Afloramento de Rocha/Neossolo Litólico Gleissolo / Organossolo
Potencial da Profundidade para Armazenamento	Alta	1	52,23	40,04	Latossolo Cambissolo
	Média	0,75	45,62	34,97	Argissolo
	Baixa	0,5	30,64	23,49	Gleissolo / Organossolo
	Muito Baixa	0,25	1,99	1,52	Afloramento de Rocha/Neossolo Litólico
Grau de Proteção da Cobertura Vegetal Original	Alta	0,8	6,97	5,36	Floresta Ombrófila Densa
	Média	0,6	69,34	53,16	Floresta Ombrófila Mista
	Baixa	0,4	54,13	41,49	Estepe Gramíneo Lenhosa
Grau de Proteção dos Usos do Solo	Muito Alto	1			Floresta
	Alto	0,8			Reflorestamento
	Alto	0,8			Capoeira
	Médio	0,6			Campo
	Baixo	0,4			Varzea
	Baixo	0,4			Agricultura
	Muito Baixo	0,2			Urbano

FONTE: o autor (2012)

#### 4.1.1. Permeabilidade

Para valorar as componentes geológicas utilizou-se uma escala comparativa de valores representada na tabela 11 (item 3.3.3). Atribuindo o menor valor a classe de menor permeabilidade. Na tabela 22 são discriminados os componentes e suas áreas correspondentes como ilustrado na Figura 16.

A classe de baixa permeabilidade das rochas é a com maior predominância na bacia, correspondendo a 61,84% da área total e composta por formações do Complexo Gnaíssico-Migmatítico e Complexo Granítico-Gnaíssico. A classe de média permeabilidade corresponde a 21,03% da área da bacia sendo definida pela Formação Guabirota. Já a classe de maior permeabilidade das rochas é a que representa a menor porção da bacia (17,13% de sua área), composta por Aluviões Atuais e por Terraços Aluvionares.

#### 4.1.2. Fluxo preferencial em profundidade

A classificação e valoração das formas de relevo (unidades geomorfológicas) quanto ao fluxo preferencial em profundidade é a apresentada na tabela 22 e ilustrado na figura 17. E para tal classificação utilizou-se uma escala comparativa de valores representada na tabela 12 (item 3.3.3).

O fluxo preferencial em profundidade está dividido quase que igualmente entre as classes de alto e baixo. Sendo que 50,48% da área da bacia correspondente ao Planalto Iguaçu e as Planícies Fluviais que representam a classe de baixo fluxo preferencial em profundidade. Em contrapartida, a classe de alto fluxo preferencial em profundidade representa 44,20% da área da bacia sendo formada pelo Planalto de Curitiba. A classe de médio fluxo preferencial representa 5,36% da área da bacia e é composta pelos Blocos Soerguidos da Serra do Mar.

#### 4.1.3. Declividade

A classificação e valoração declividade é a apresentada na tabela 22 e ilustrado na figura 18. Sendo que para tal classificação utilizou-se uma escala comparativa de valores representada na tabela 13 (item 3.3.3).

Os terrenos com declividades muito baixa e baixa predominam na bacia (64,82% de sua área total). Estas áreas são constituídas por Planícies aluviais, que possuem menor quantidade de energia para aumentar a velocidade dos fluxos de água, permitindo que a maior parte destes fluxos seja composta por elementos de fluxo lento, aumentando o tempo de permanência de água na bacia hidrográfica (CHIARANDA, 2002).

A área de média declividade corresponde a regiões localizadas ao entorno das encostas e compreendem uma porção menor da bacia, 28,28% de sua área. Porém, a menor porção da bacia correspondem às classes com declividades muito alta e alta as quais representam 6,91% de sua área e estão localizadas a sudoeste na divisa com a bacia Litorânea, já nas encostas da Serra do Mar.

#### 4.1.4. Potencial de infiltração do solo

O mapa de potencial de infiltração do solo é um dos dois temas derivados da componente solo o qual leva em consideração a penetração de água no perfil de solo referente à sua textura e suas classes de importância foram descritas na tabela 14 (item 3.3.3). As classes de importância são descritas na tabela 22 e ilustradas na figura 19.

A classe de baixo potencial de infiltração do solo corresponde a 25% da área da bacia e é composta por afloramentos rochosos e Neossolos Litólicos e por Organossolos e Gleissolos. Em contrapartida, a classe média é a que apresenta maior representatividade em relação à penetração de água no solo, correspondendo a 52,52% da área da bacia. O grupo de solos que a compõe são os Argissolos com textura de argila média. A área restante da bacia (22,47%) corresponde a classe de alto potencial de infiltração do solo. Esta é composta por Cambissolos e Latossolos com texturas variando de argila média a grossa.

Chiaranda (2002) considera que as classes de alto e médio potencial de infiltração, indicam uma tendência de boas condições para a penetração da água através da superfície e conseqüentemente caminhamento no perfil, favorecendo a produção de fluxos lentos.

#### 4.1.5 Potencial da profundidade para armazenamento

O mapa de potencial da profundidade para armazenamento é um dos dois temas derivados da componente solo o qual leva em consideração a penetração de água no perfil de solo referente à sua profundidade e suas classes de importância foram descritas na tabela 15 (item 3.3.3). As classes de importância são descritas na tabela 22 e ilustradas na figura 20.

A classe de alto potencial da profundidade de armazenamento abrange 40,04% da área da bacia e engloba Latossolos e os Cambissolos, com profundidade maior que 200 cm e entre 100 e 200 cm, respectivamente. 34,97% da bacia correspondem à classe de médio potencial composta pelos Argissolos com profundidade de até 100 cm. Na classe de baixo potencial para armazenamento foram agrupados os Gleissolos e os Organossolos, com pouca profundidade, representando 23,49% da bacia. A classe de muito baixo potencial corresponde a 1,52% da sua totalidade e é composta por Afloramentos de rocha e Neossolos Lítólicos com pouca ou nenhuma profundidade.

#### 4.1.6. Grau de proteção da cobertura vegetal

O mapa de grau de proteção da cobertura vegetal é a variável onde a vegetação impõe um determinado nível de proteção ao solo. Conforme a tabela 16 foram atribuídas classes para cada grau de proteção. As classes de importância são descritas na tabela 22 e estão ilustradas na figura 21.

O grau de proteção da cobertura vegetal original está relacionado com as composições vegetacionais que recobriam originalmente os terrenos da bacia. Foram enquadradas três classes de uso natural sendo a classe com grau de

proteção alta correspondente a 5,36% da área da bacia, tendo como formação original a Floresta Ombrofila Densa. A classe de médio grau de proteção abrange 53,16% da área total da bacia, composta pela floresta Ombrofila Mista. A classe considerada com baixo grau de proteção original corresponde a 41,49% da totalidade da área da bacia, sendo recoberta por campos naturais.

Como descrito por Chiaranda (2002) a cobertura interage no ciclo hidrológico por meio da sua densidade e estratos, onde a interceptação pelas copas, pelo piso e evaporação das superfícies líquidas diminuem a quantidade de chuvas que atingem o solo.

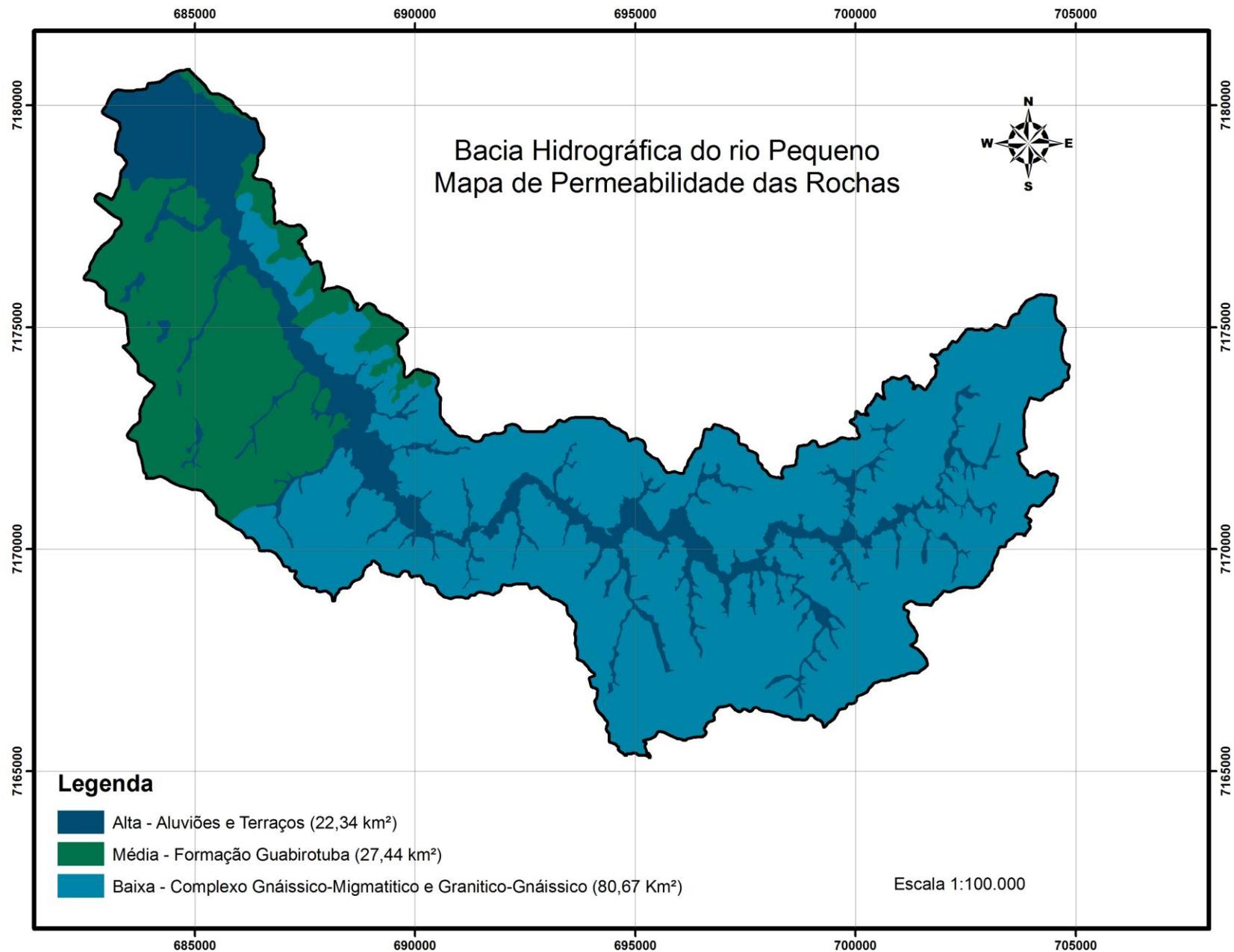


FIGURA 16 – MAPA DE PERMEABILIDADE DAS ROCHAS

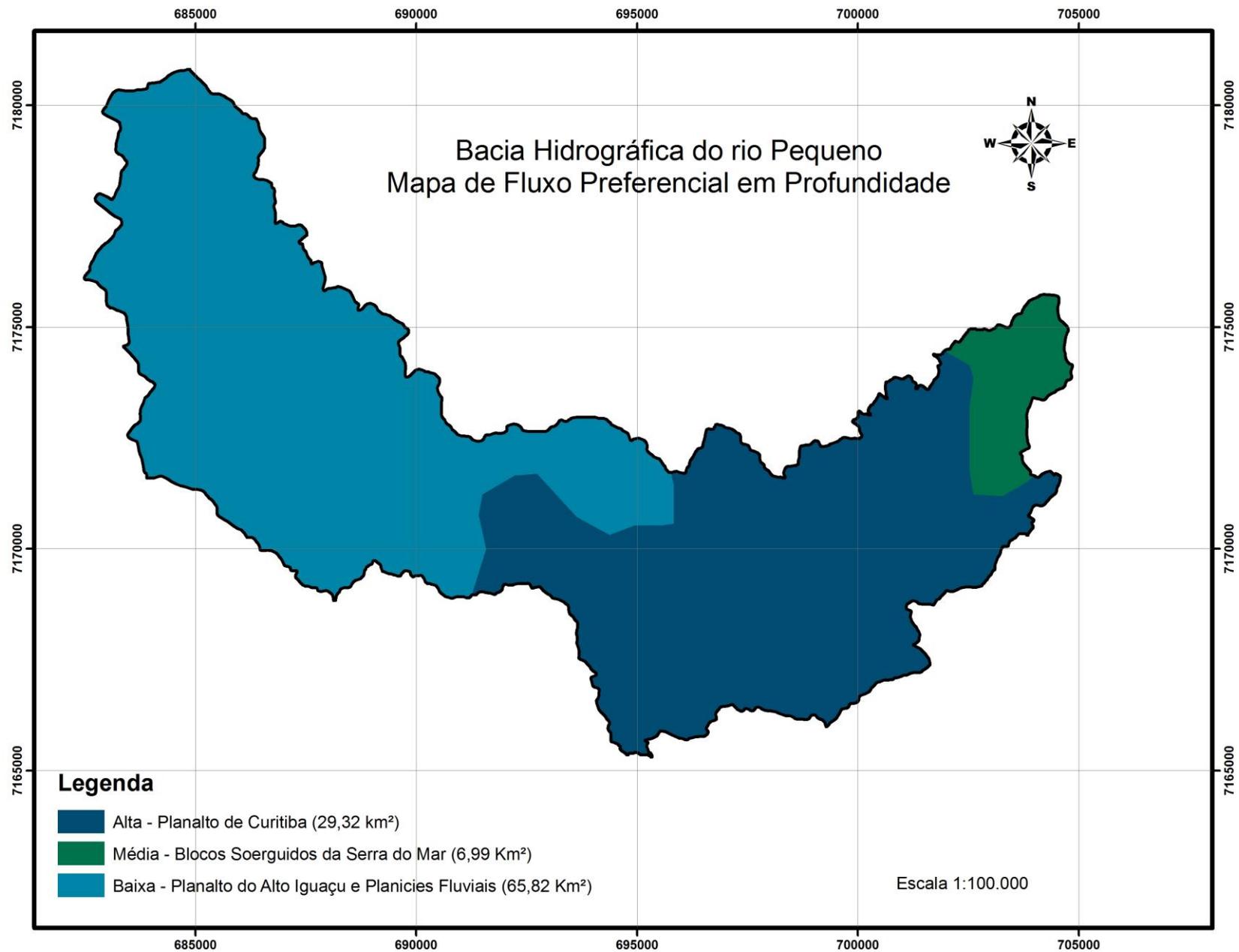


FIGURA 17 – MAPA DE FLUXO PREFERENCIAL EM PROFUNDIDADE

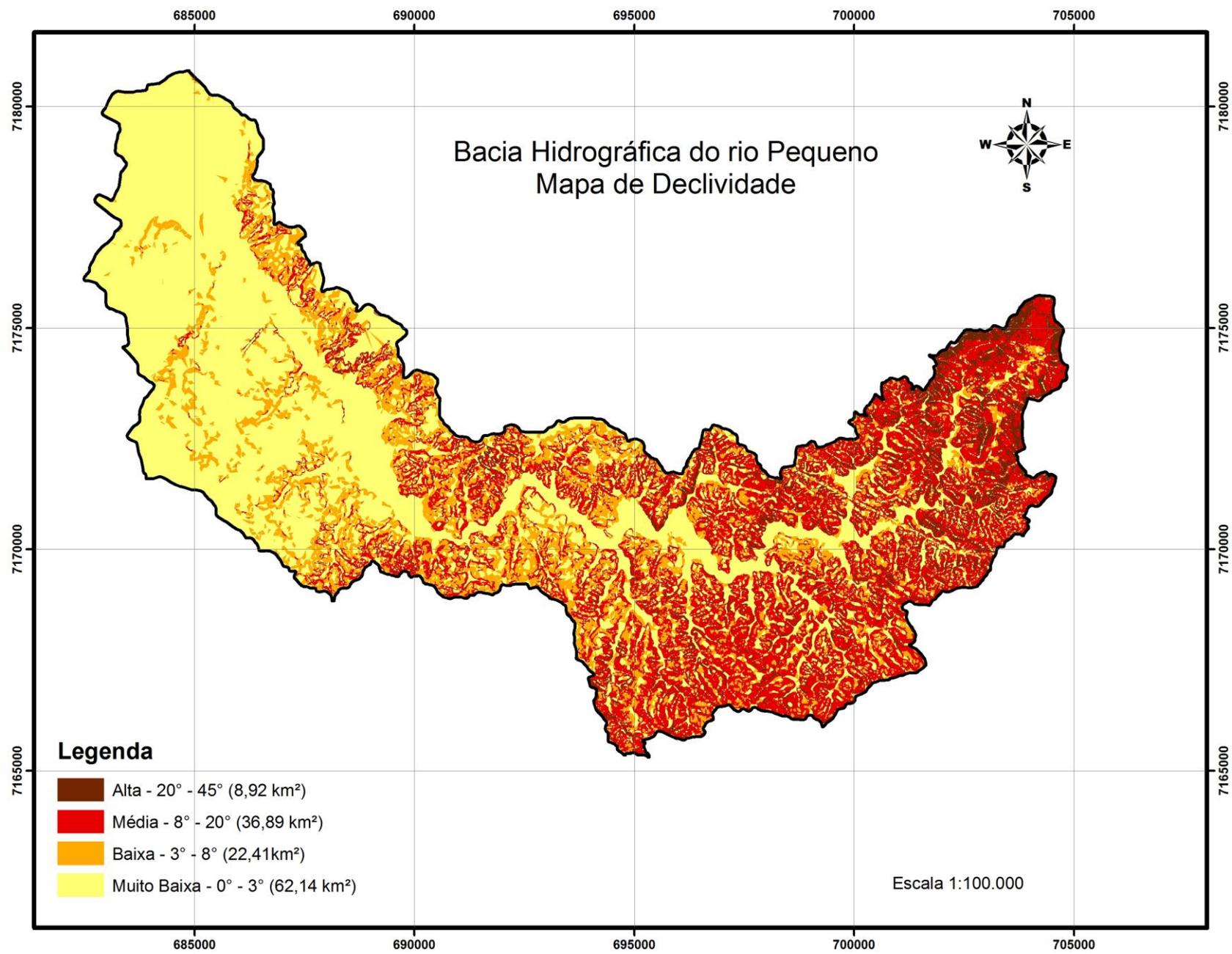


FIGURA 18 – MAPA DE DECLIVIDADE

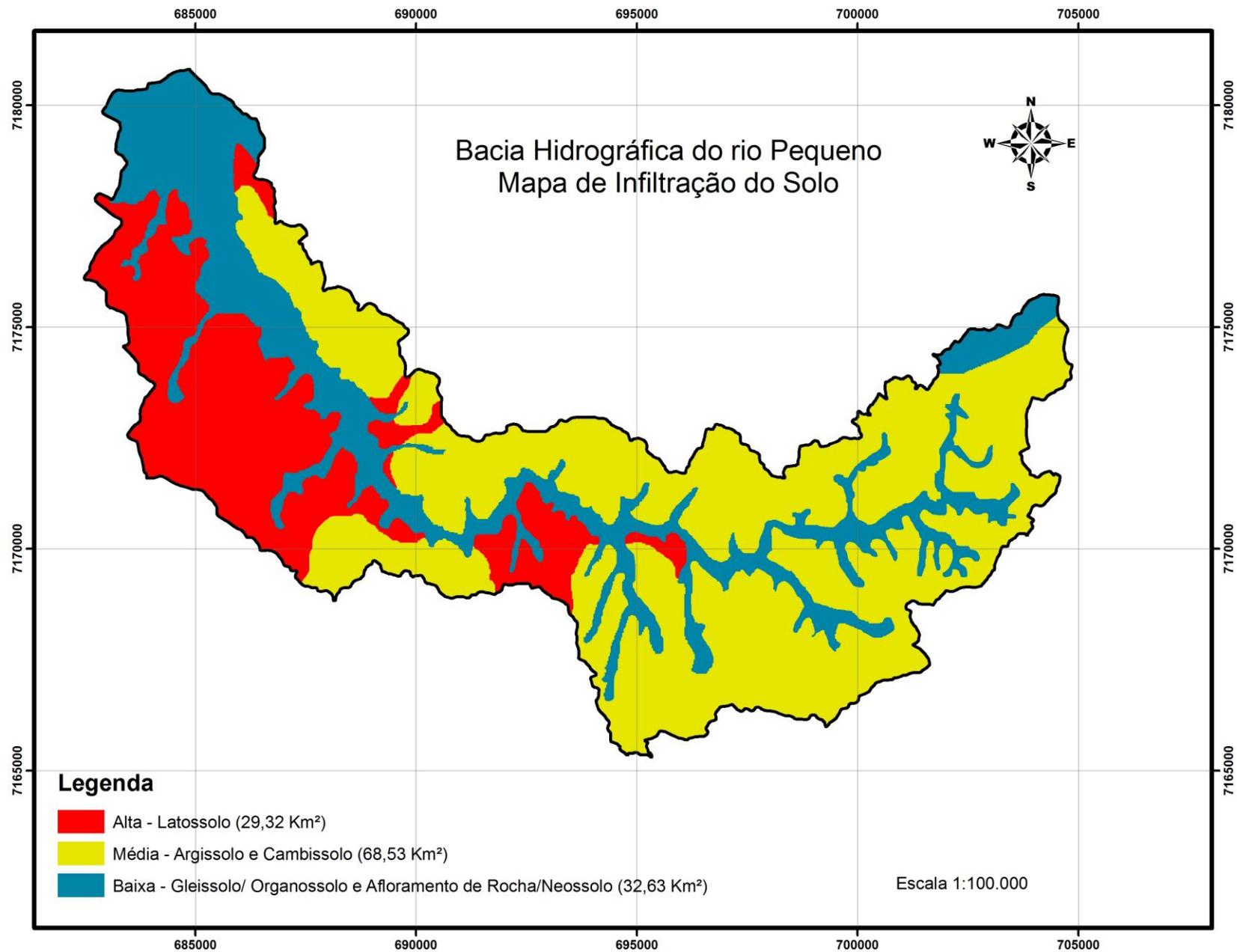


FIGURA 19 – MAPA DE POTENCIAL DE INFILTRAÇÃO DOS SOLOS

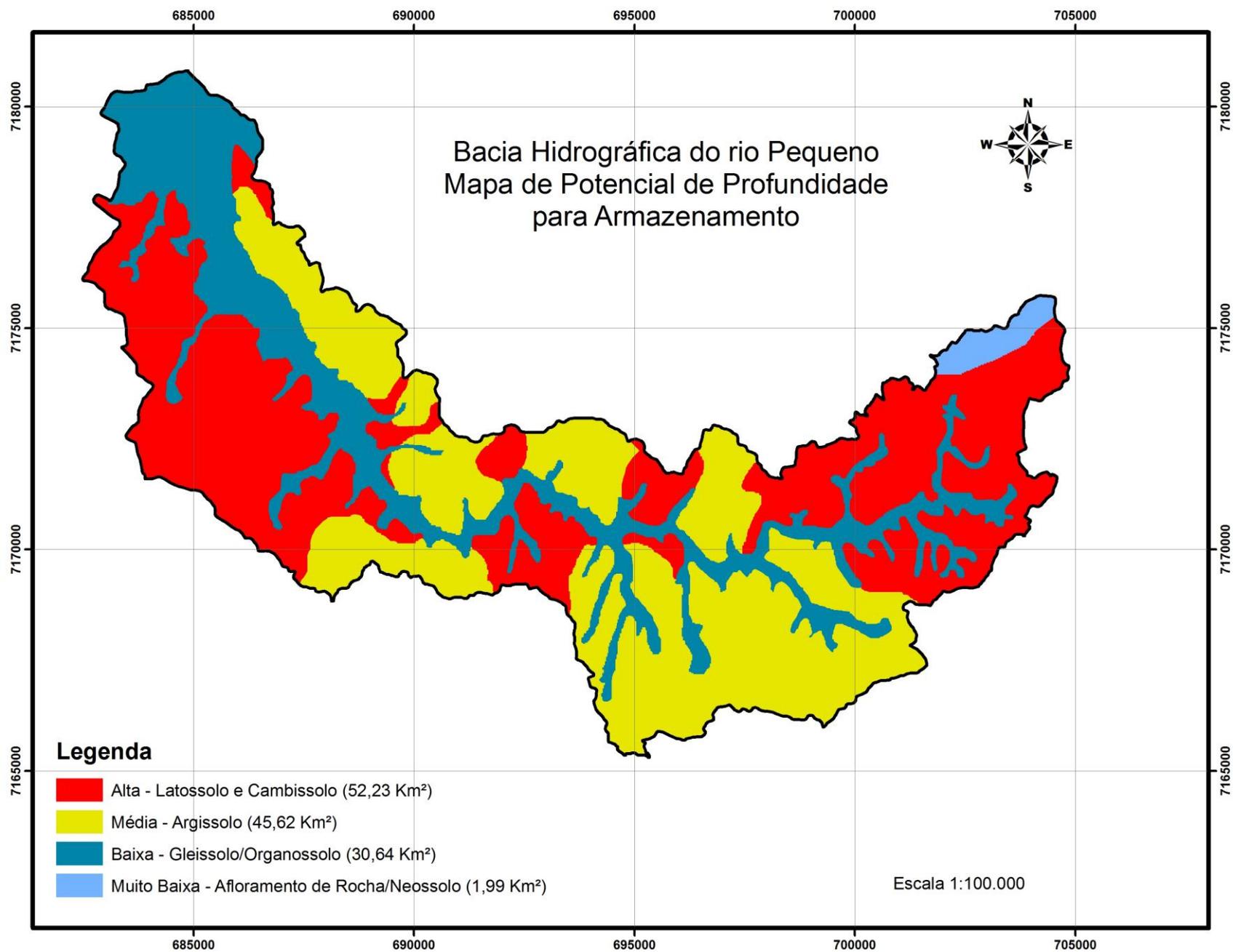


FIGURA 20 – MAPA DE POTENCIAL DA PROFUNDIDADE PARA ARMAZENAMENTO

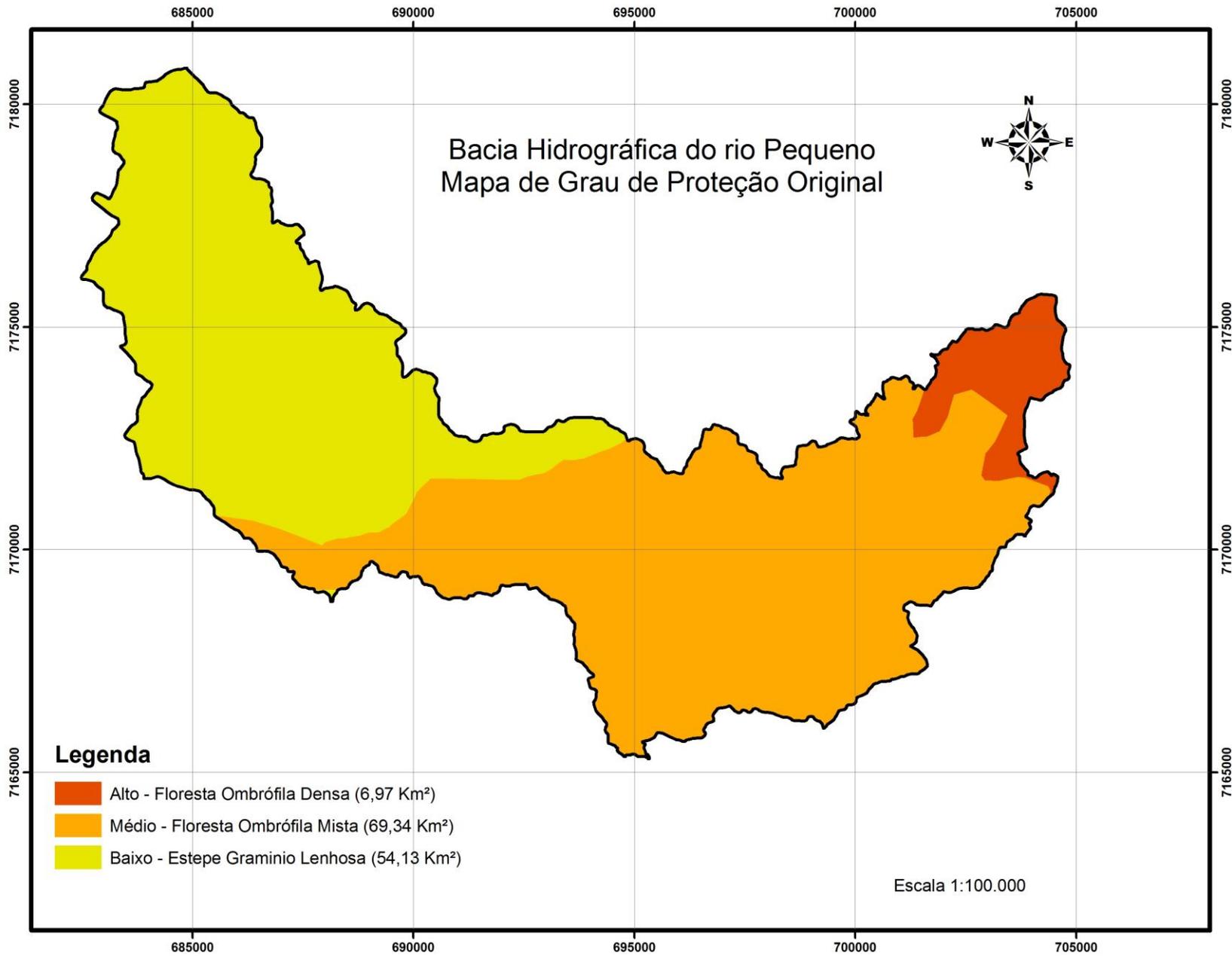


FIGURA 21 – MAPA DO GRAU DE PROTEÇÃO DA COBERTURA VEGETAL ORIGINAL

#### 4.2. CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DO MEIO POROSO

Neste item serão discutidos os resultados das operações realizadas na fase III (item 3.3.4), onde foram realizadas as integrações, em separado, das expressões hidrológicas das componentes geomorfologia e solos (tabelas 18 e 19). E também o resultado da integração dos temas derivados apresentados da tabela 20 e 21.

Em termos de potencial hidrológico do relevo, verifica-se através da tabela 23 e da figura 22 que a classe de potencial hidrológico muito alta para fluxos de água lentos é o que predomina na bacia, correspondendo a 55% de sua área. Corresponde à área do Planalto de Curitiba dentro do Primeiro Planalto Paranaense com terrenos com declividade baixa, variando de 0 a 3 graus. Devido à baixa quantidade de energia disponível para acelerar os fluxos de água e a predominância do fluxo preferencial da classe muito alta, esta classe de potencial hidrológico do relevo é a que proporciona maior atenuação dos eventos de precipitação. A classe de potencial hidrológico do relevo alta corresponde a 42,74% da bacia e também corresponde ao Planalto de Curitiba dentro do Primeiro Planalto Paranaense, contudo apresenta uma declividade variando de 3 a 20 graus. Esta classe de fluxo preferencial alto caracteriza o potencial hidrológico do relevo, o qual sofre uma atenuação proporcionalmente menor da disponibilidade de energia do que a classe muito alta. As classes de potencial hidrológico do relevo médio, baixo e muito baixo, correspondem a apenas 15,96% da área da bacia, com área onde as classes de declividade superam os 20 graus, apresentando maior disponibilidade de energia gerando fluxos de água mais acentuados.

Para os solos, que são representados através da textura em termos de potencial para infiltração, e da profundidade no que diz respeito ao seu potencial para armazenagem, a integração segundo Chiaranda (2002) também se faz necessário. Verifica-se na tabela 23 e na figura 23 que as classes potencial hidrológico do solo alta e muito alta representam 40,04% da área da bacia e correspondem a solos com textura argilosa. São áreas compostas por Cambissolos e Latossolos, profundos que apresentam alto potencial para armazenamento e infiltração. A classe de potencial hidrológico do solo médio representa 58,44% da área da bacia, é composta por Argissolos, Gleissolos e Organossolos, com textura

argila média e variando de rasos a pouco profundo, apresentam potencial de infiltração e armazenamento médio. A classe de potencial baixo abrange uma parte pequena da bacia, representa apenas 1,52% e é composta por Afloramentos rochosos e Neossolos Litólicos, que possuem um potencial de infiltração e armazenamento quase nulos.

TABELA 23 – QUANTIFICAÇÃO DAS CLASSES DE POTENCIAL HIDROLÓGICO DO RELEVO E DOS SOLOS

Classes	Intervalo de Classe	Componentes Integrados			
		Potencial hidrológico do Relevo		Potencial Hidrológico do Solo	
		Área (Km <sup>2</sup> )	%	Área (Km <sup>2</sup> )	%
Muito Alta	1,0 – 0,8	71,74	55,00	29,32	22,48
Alta	0,8 – 0,6	42,74	32,76	22,91	17,56
Média	0,6 – 0,4	15,87	12,17	76,23	58,44
Baixa	0,4 – 0,2	0,09	0,07	1,99	1,52
Muito Baixa	0,2 – 0,0	0	0,00	0	0,00
Total		130,45	100	130,45	100

FONTE: o autor (2012)

O Potencial de Armazenamento do meio poroso, elaborado pela integração dos temas permeabilidade das rochas, potencial hidrológico do relevo e potencial hidrológico do solo é apresentado na tabela 24 e na figura 24.

TABELA 24 – QUANTIFICAÇÃO DAS CLASSES DE POTENCIAL ARMAZENAMENTO DO MEIO POROSO

Classes	Área (Km <sup>2</sup> )	%	Intervalo de Classe
Muito Alta	1,68	1,29	1,0 - 0,8
Alta	83,42	63,95	0,8 - 0,6
Média	43,50	33,35	0,6 - 0,4
Baixa	1,84	1,41	0,4 - 0,2
Total	130,45	100	

FONTE: o autor (2012)

Como pode ser observada na tabela 24, a classe de potencial muito alta representa uma percentual pequeno da bacia, apenas 1,29%, contudo predominam nessas áreas os fluxos lentos de infiltração, percolação e escoamento base, devido às características físicas das rochas, dos solos e do relevo. Nessas áreas classificadas como muito alta para potencial de armazenamento para meio poroso

predominam as classes de potencial hidrológico do solo muito alta e potencial hidrológico do relevo variando de muito alta a alta. Encontra-se distribuída no Planalto do Alto Iguaçu e nas Planícies Fluviais.

A classe alta para potencial representa a maior porção da bacia, correspondendo a 63,95%. Corresponde a integração das classes de potencial hidrológico do relevo e do solo que variam predominantemente entre as classes média a alta, correspondendo ao Planalto de Curitiba e a Planície Fluvial. As classes de permeabilidade das rochas variam de baixa a alta correspondendo aos Aluviões Atuais, a Formação Guabirotuba e ao Complexo-Gnaíssico Migmatítico. As classes de baixa permeabilidade correspondem ao Complexo-Gnaíssico Migmatítico, contudo apresentam solos profundo o que fez fazer parte desta classe de alto potencial de armazenamento do meio poroso. Essas características apresentam fluxos lentos de infiltração, percolação e escoamento base, devido às características físicas das rochas, dos solos e do relevo com intensidade relativamente menor que aquela que ocorre na classe de potencial muito alto.

A classe de potencial médio corresponde a 33,35% da área da bacia e é resultante da integração das classes de alta, média e baixa permeabilidade, com as classes de médio e baixo potencial hidrológico do solo e das classes de muito alto, alto e médio potencial hidrológico do relevo.

Essas são áreas onde ocorre a presença de declividades mais acentuadas e solos mais rasos, conferindo a esta classe de potencial de armazenamento do meio poroso, condições onde as componentes de fluxo são lentas enquanto não ocorre a saturação em períodos chuvosos e de fluxos mais rápidos após a saturação dos poros.

A Classe de baixo potencial corresponde a 1,41% da área da bacia e é resultado da integração das classes de baixa permeabilidade com as classes de médio e baixo potencial hidrológico do relevo e do solo. Estas áreas estão localizadas em sua maior sobre os Blocos Soerguidos da Serra do Mar, com solos rasos e declividades acentuas o que confere a essas regiões um altos fluxos de água.

Segundo Chiaranda (2002) são essas características de comportamento diferenciado dos terrenos, configurados pelas componentes do meio abiótico, que explicam o comportamento perene dos rios e córregos.

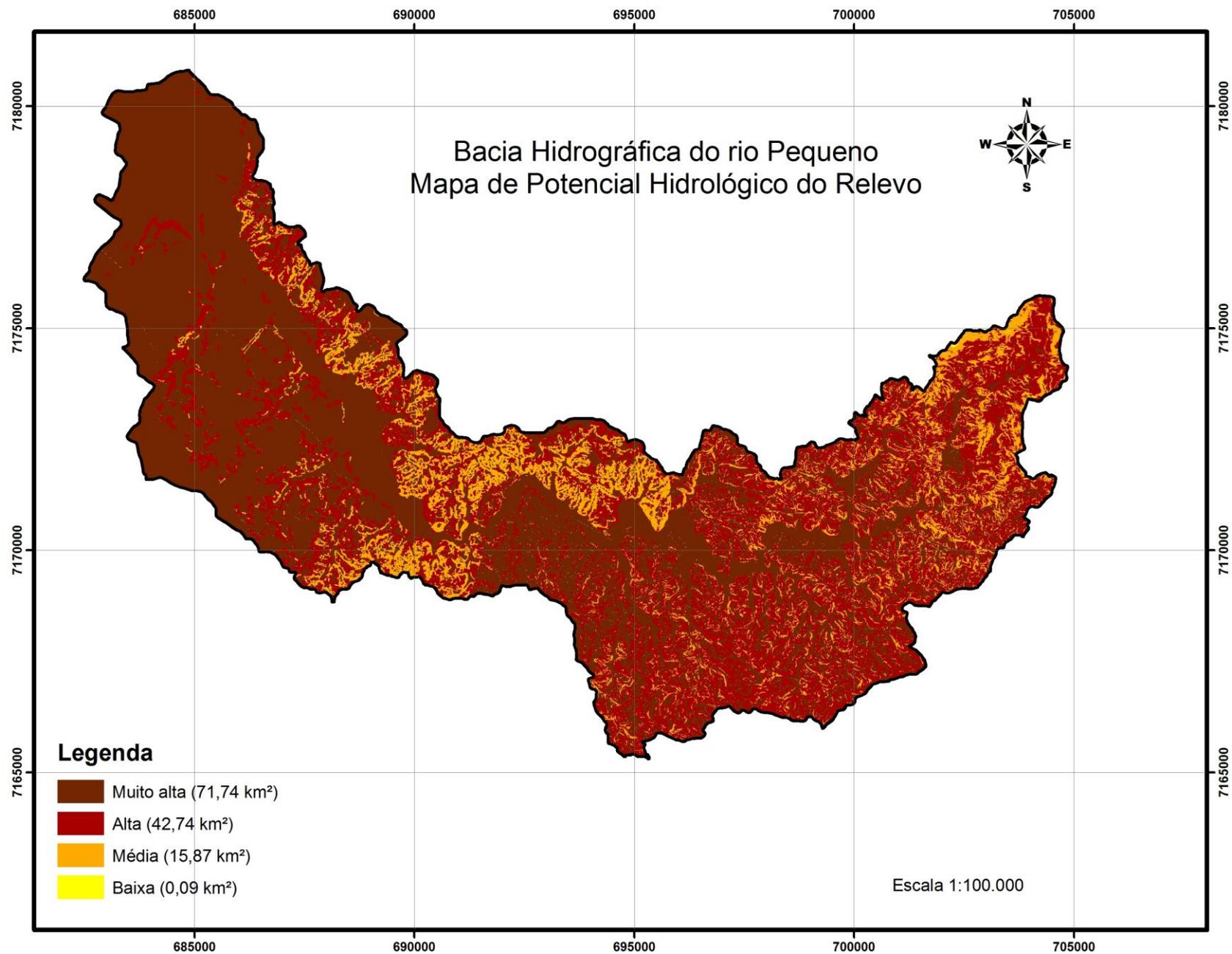


FIGURA 22 – MAPA DE POTENCIAL HIDROLÓGICO DO RELEVO

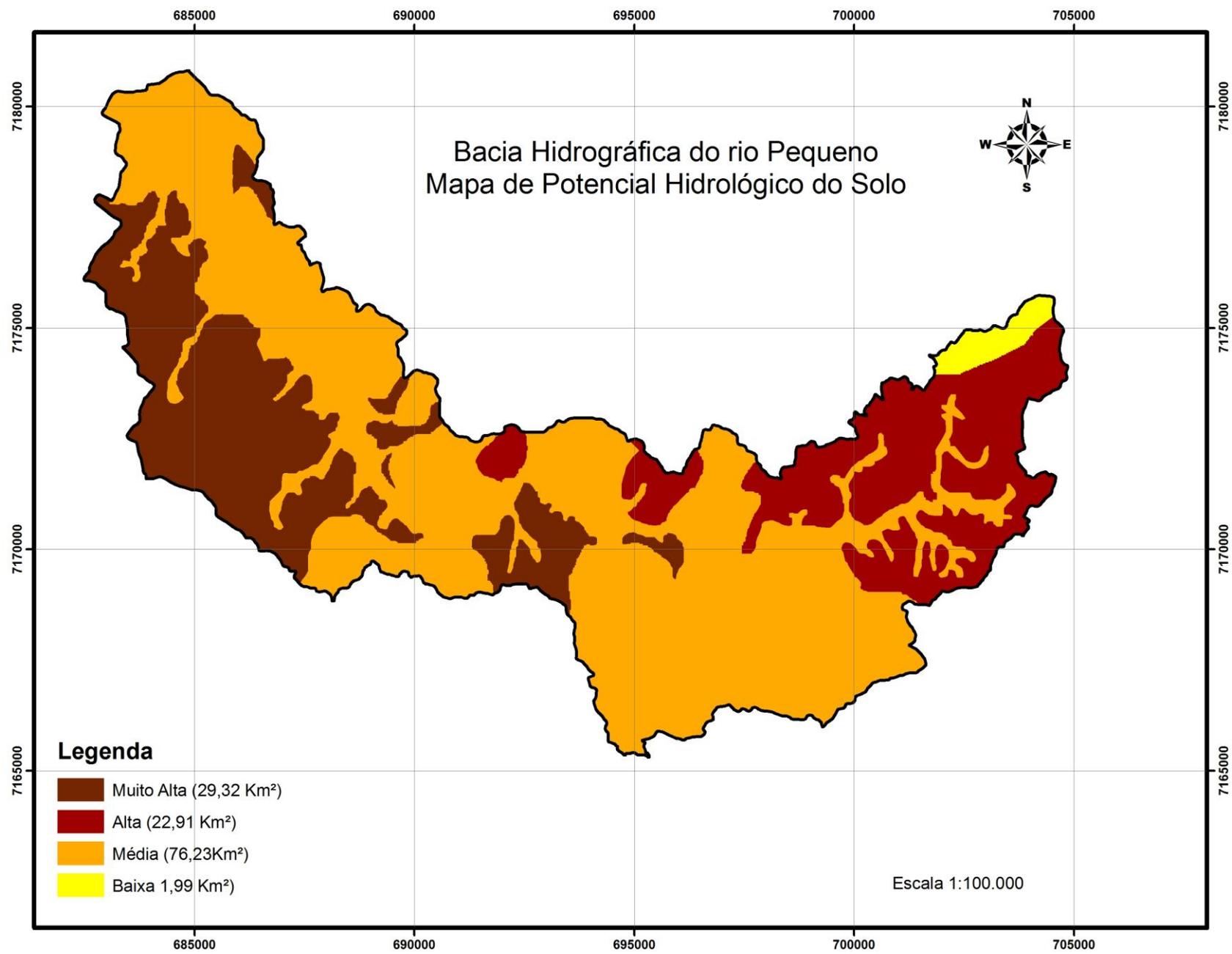


FIGURA 23 – MAPA DE POTENCIAL HIDROLÓGICO DO SOLO

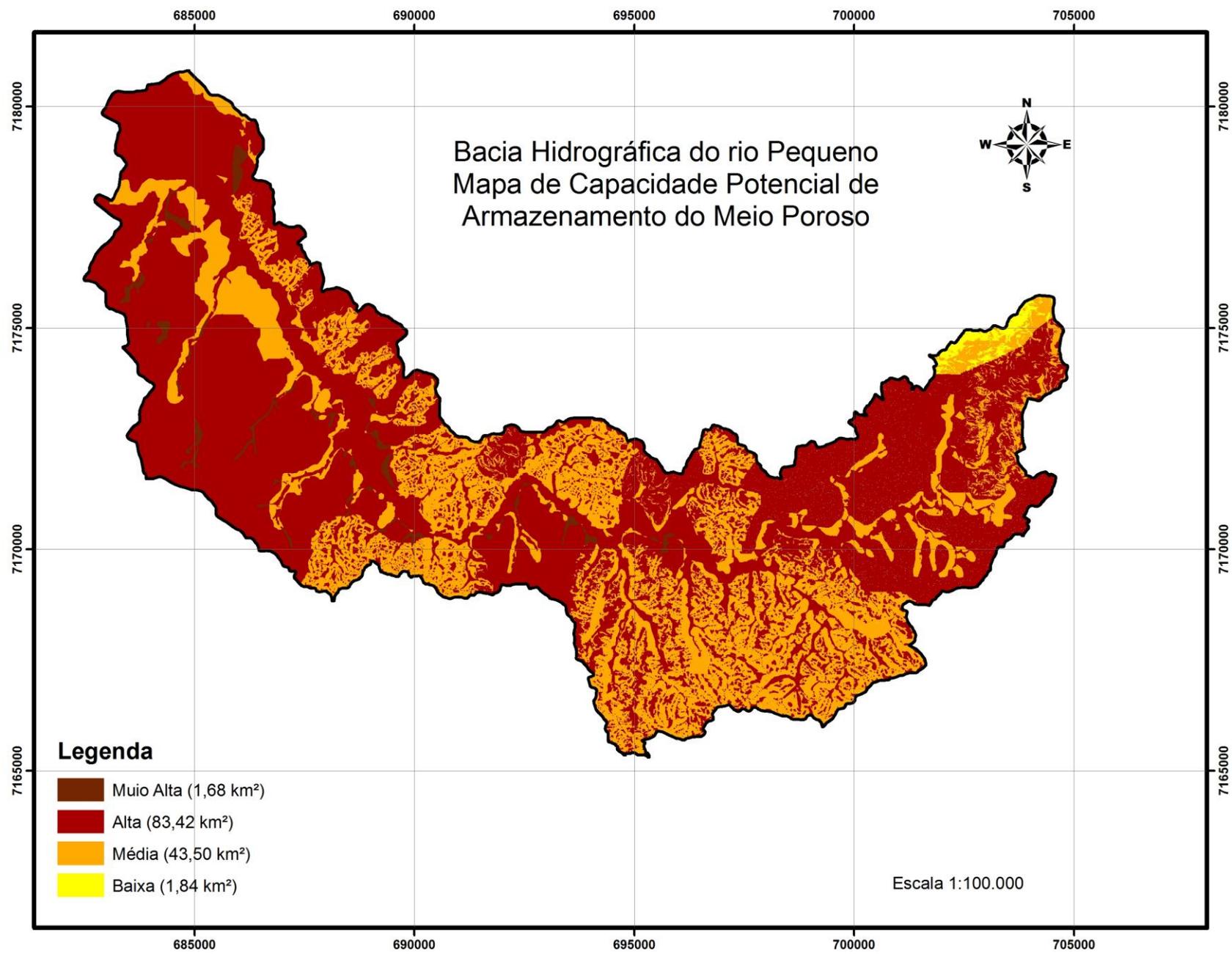


FIGURA 24 – MAPA DE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO DO MEIO POROSO

#### 4.3. CAPACIDADE POTENCIAL ORIGINAL DE ARMAZENAMENTO DA BACIA

A capacidade potencial original de armazenamento da bacia do rio Pequeno foi elaborada a partir da integração das expressões potencial de armazenamento do meio poroso e grau de proteção da cobertura vegetal original, sendo considerada conforme Chiaranda (2002) uma expressão da função de armazenagem da bacia, sendo representado pela tabela 25 e ilustrado pela figura 25.

TABELA 25 – CAPACIDADE POTENCIAL ORIGINAL DE ARMAZENAMENTO

Classes	Área (Km <sup>2</sup> )	%	Intervalo de Classe
Alta	46,25	35,46	0,8 - 0,6
Média	83,20	63,78	0,6 - 0,4
Baixa	0,52	0,40	0,4 - 0,2
Muito Baixa	0,48	0,37	0,2 - 0,0
Total	130,45	100	

FONTE: o autor (2012)

A bacia apresenta 35,46 % de sua área com uma capacidade potencial original de armazenamento alta devido a integração das classes de potencial muito alta e alta de armazenamento do meio poroso e das classes alta e média de grau de proteção original que são conferidas pela Floresta Ombrófila Densa e Mista respectivamente. Sendo esta área da bacia responsável por propiciar a produção de fluxos lentos e de maior atenuação dos eventos de precipitação devido a capacidade de armazenamento.

A classe que mais representa a capacidade potencial original de armazenamento é a média, correspondendo a 63,78 da área da bacia. Esta classe é resultante da integração das classes alta e média do potencial de armazenamento do meio poroso com as classes média e baixa do grau de proteção original que são conferidas pela Floresta Ombrófila Mista e pelos Campos Naturais. Representando a produção de fluxos de maneira mais lenta e menor atenuação da precipitação que a anterior.

As classes baixa e muito baixa somadas representam menos de 1% da área da bacia. Sendo resultado da integração das classes muito baixa e baixa do potencial de armazenamento do meio poroso com as classes média e baixa do grau de proteção original que são conferidas pela Floresta Ombrófila Mista e pelos

Campos Naturais. A área abrangida por essas duas classes é a que apresenta fluxos de água mais rápidos e a menos atenuação dos eventos de precipitação.

Os valores de classes de capacidade potencial de armazenamento da bacia podem vir a serem alterados, tanto no tempo como no espaço em virtude do crescimento populacional e da expansão territorial que vem ocorrendo nas últimas décadas.

#### 4.4. DINÂMICA DO USO DO SOLO

Os usos da terra na bacia hidrográfica do rio Pequeno foram obtidos através da classificação de imagens de satélites conforme descritos na seção 3.3.1 e suas classes definidas conforme a tabela 7. Foi estabelecida a evolução dos usos da terra dos seguintes anos de 1986, 1996, 2007.

A distribuição espacial dos valores de uso do solo são apresentados na tabela 26, no gráfico da figura 26 e ilustrado nas figuras 28, 29, 30.

Os municípios mais atingidos por esse crescimento foram Piraquara, Campo Largo, Araucária e São José dos Pinhais, sendo este último, onde se encontra a bacia hidrográfica do rio Pequeno (AMARAL, 2002). Sendo que o grande fenômeno da concentração populacional ao redor dos centros urbanos caracterizou, sobretudo a partir da década de 1980, o fenômeno da metropolização no Brasil (TREMARIN, 2001 apud AMARAL, 2002).

O grande crescimento da RMC se deu, em grande parte, pelo intensivo *marketing* da administração. Onde Curitiba foi promovida em nível nacional como uma cidade com boa qualidade de vida. Sendo considerada como uma Capital de Primeiro Mundo e também chamada de Capital Social. Contudo, com a grande demanda populacional e os elevados preços dos Imóveis do município de Curitiba, ocorreu a expansão populacional para a Região Metropolitana (TREMARIN, 2001 *apud* AMARAL, 2002). As regiões que mais cresceram neste período em São José dos Pinhais, foram do bairro Afonso Pena e a região norte, próxima da BR 277, por onde passa o rio Pequeno.

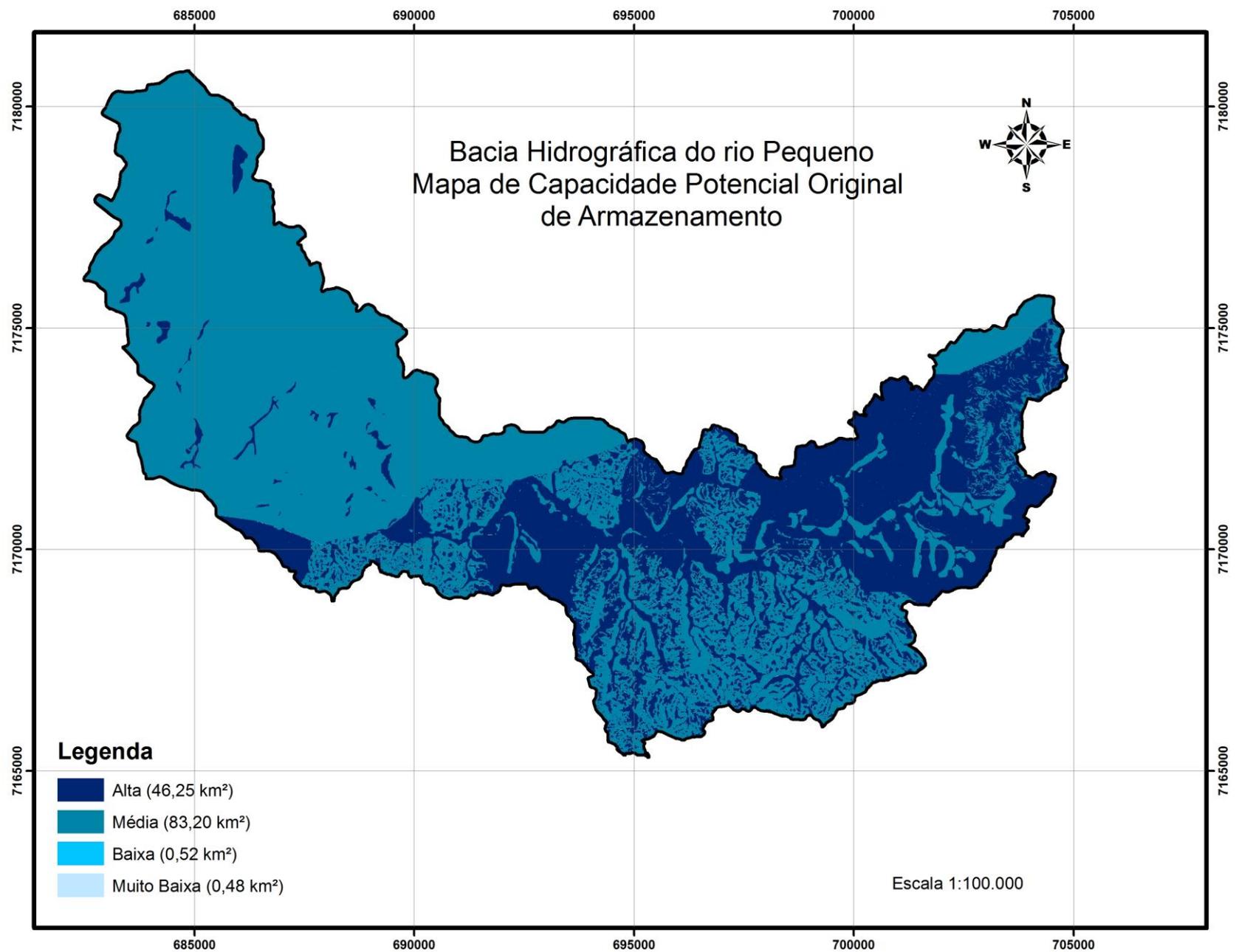


FIGURA 25 – MAPA DE CAPACIDADE POTENCIAL ORIGINAL DE ARMAZENAMENTO

Como podemos observar na tabela 26 e a figura 28 as classes de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Pequeno no ano de 1986, mais da metade de sua área era representada por Floresta, Campos e Capoeira, sendo 27,90, 4,45 e 44,07% respectivamente. As áreas de Várzea recobriam 16,08% de sua área, sendo representada por áreas alagadas e solos muito úmidos, a agricultura perfazia apenas 2,29% da área, as áreas de reflorestamentos eram demasiadamente pequenas, representando apenas 0,16% da área. E por fim a classe de uso definida como Urbano ocupando um total de 6,69%.

TABELA 26 – USOS DA TERRA NOS ANOS DE 1986, 1996, 2007, EXPANSÃO E RETRAÇÃO DAS CLASSES ENTRE 1986 E 2007.

Classes	ANO							
	1986		1996		2007		1986-2007	
	Área (Km <sup>2</sup> )	%						
Floresta	36,40	27,90	51,07	39,15	40,5	31,05	4,10	3,15
Reflorestamento	0,21	0,16	0,37	0,29	0,78	0,60	0,57	0,44
Capoeira	5,80	4,45	17,34	13,29	7,19	5,51	1,39	1,07
Campo	57,49	44,07	27,24	20,88	41,84	32,07	-15,65	-12,00
Agricultura	2,99	2,29	8,80	6,75	4,9	3,76	1,91	1,46
Varzea	20,97	16,08	8,31	6,37	2,58	1,98	-18,39	-14,10
Urbano	6,59	5,05	17,32	13,28	32,66	25,04	26,07	19,98
Total	130,45	100,00	130,45	100,00	130,45	100,00		

FONTE: o autor (2012)

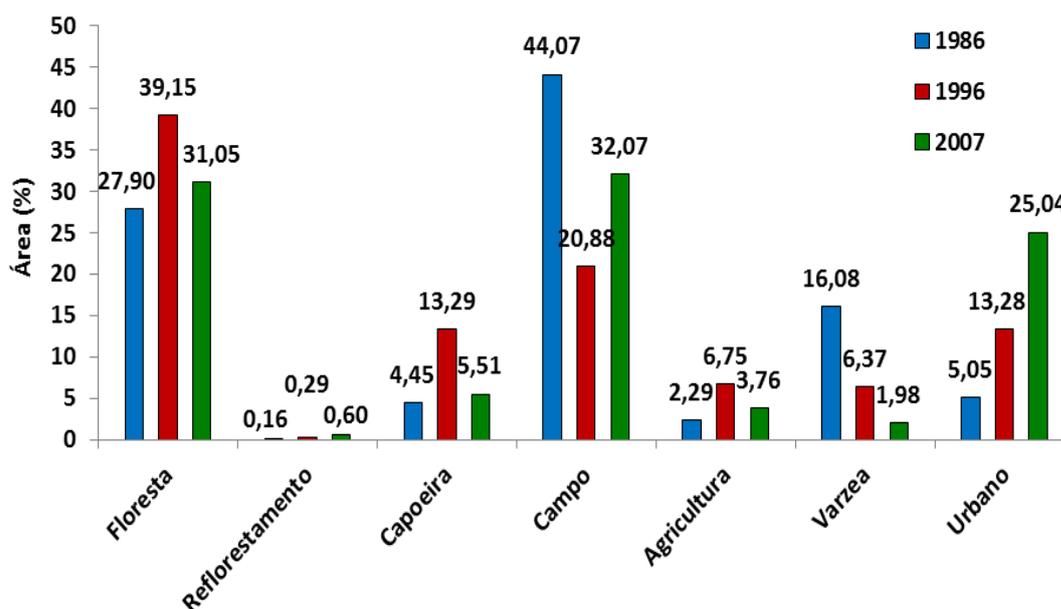


FIGURA 26 – USOS DA TERRA NOS ANOS DE 1986, 1996, 2007

FONTE: o autor (2012)

No decorrer da década de 1990 o município de São José dos Pinhais passou por grande crescimento industrial devido a instalação da fábrica da Renault do Brasil, localizada nos limites da bacia hidrográfica do rio Pequeno. Neste mesmo período foram concluídas as obras que conferiram ao Aeroporto Afonso Pena, o *status* de aeroporto internacional.

Como podemos observar na tabela 26 e na figura 23, decorridos dez anos, em 1996, as classes de uso do solo ocupam 39,15% de Floresta, 20,88% de Campo, 13,29% Capoeira, 13,28% Urbano, 6,75% Agricultura, 6,37% Varzea e 0,29% Reflorestamentos. Segundo Lima (2001), em São José dos Pinhais, nos anos 90, o número de ocupações em mananciais cresceu 34,93% em apenas cinco anos.

Na década de 1990 surgiu uma preocupação com as ocupações irregulares, devido à expansão da malha urbana sem planejamento e a para área sem infraestrutura, configurando um processo de periferização (RAMINA, 2000 *appud* AMARAL, 2002). Preocupações essas devido ao fato de que a expansão urbana ocorreu em sua maioria, sobre os mananciais de abastecimento público.

Na década de 2000 ocorreu o crescimento do município devido principalmente a instalação do pólo industrial da montadora Audi/Woslkswagem e de suas fornecedoras de complementos. A qual se instalou em áreas de mananciais ocasionando uma preocupação com relação à disponibilidade e qualidade de água na RMC. Já a agricultura do município é caracterizada pela agricultura familiar, sendo que os produtos agrícolas que se destacam são as hortaliças, uva (vinho), suínos, peixes e pecuária (AMARAL, 2002).

No ano de 2007 a bacia do rio Pequeno é ocupada por 31,05% de Floresta, 32,07% de Campo, 25,04% de Urbano, 5,51% de Capoeira, 3,76% de agricultura, 1,98% de várzea e 0,60% de reflorestamentos (tabela 26). Na bacia do rio Pequeno ocorre uma espacialização desordenada da área urbana, apresentando manchas espalhadas por toda a bacia, como pode ser observado na figura 24.

Quando avaliada a diferença do percentual de áreas em cada classe de solo nos anos de 1986 e 2007 conforme descrito na tabela 26 e ilustrado na figura 27, nota-se que a classe urbano foi a que apresentou maior diferença de crescimento com 19,98% o que corresponde a um aumento de 26,07 Km<sup>2</sup> da área. Seguida pelas classes de floresta, agricultura e capoeira com aumentos de área de 4,10 Km<sup>2</sup> (3,15%); 1,91 Km<sup>2</sup> (1,46%) e 1,39 Km<sup>2</sup> (1,07%), respectivamente. A classe de

várzea foi a que apresentou maior retração com redução em sua área de 18,39 Km<sup>2</sup> (14,10%), seguida pela classe de campo com uma redução de área de 15,65 Km<sup>2</sup> (12%).

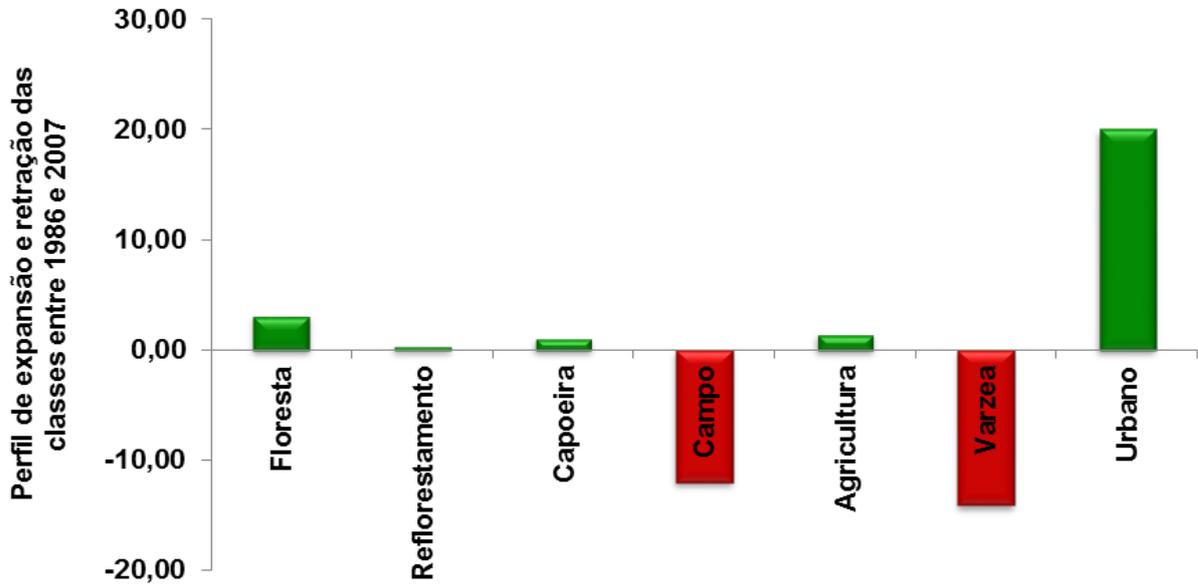


FIGURA 27 – EXPANSÃO E RETRAÇÃO DAS CLASSES DE USO DO SOLO ENTRE 1986 E 2007.  
 FONTE: o autor (2012)

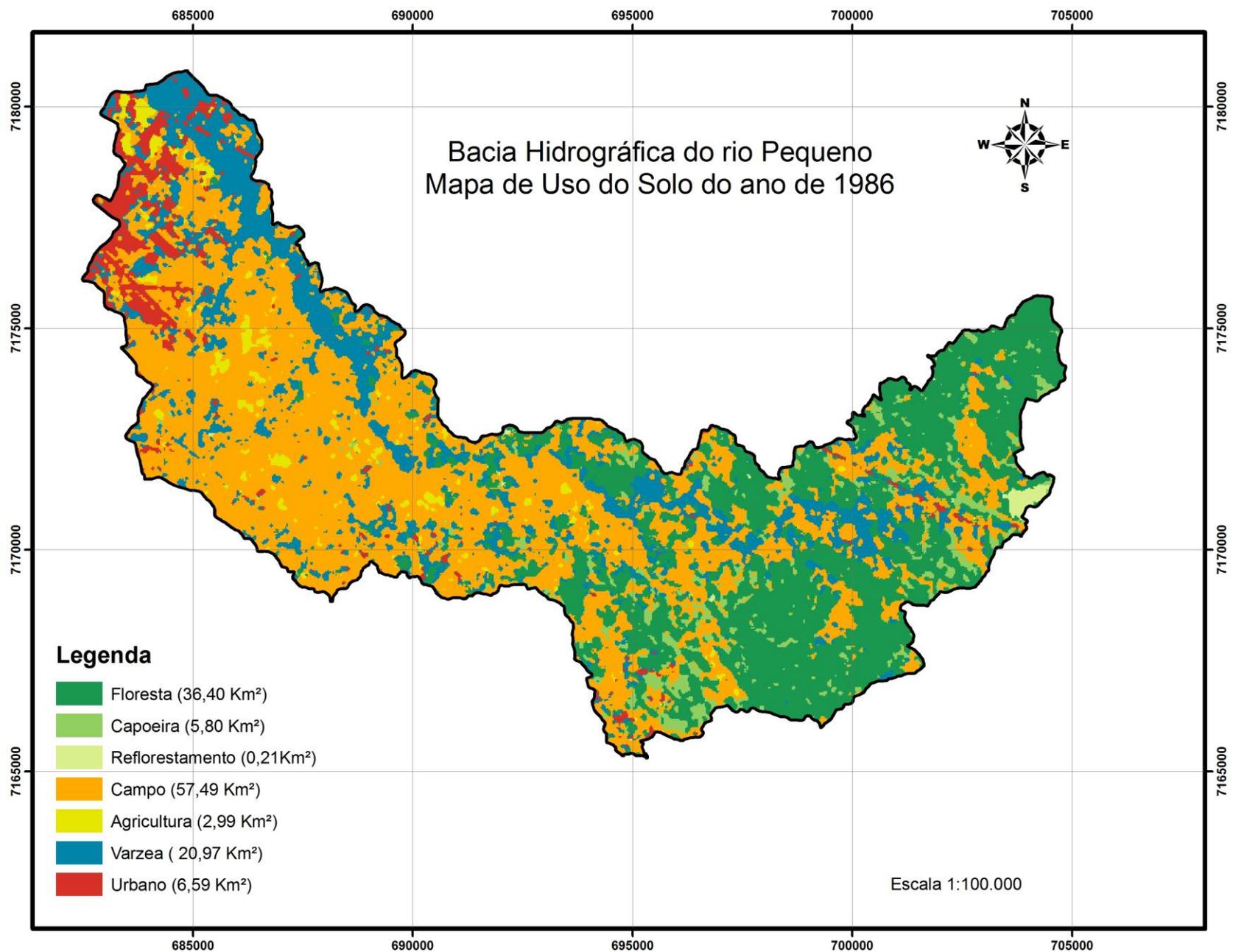


FIGURA 28 – MAPA DE USO DO SOLO PARA O ANO DE 1986.

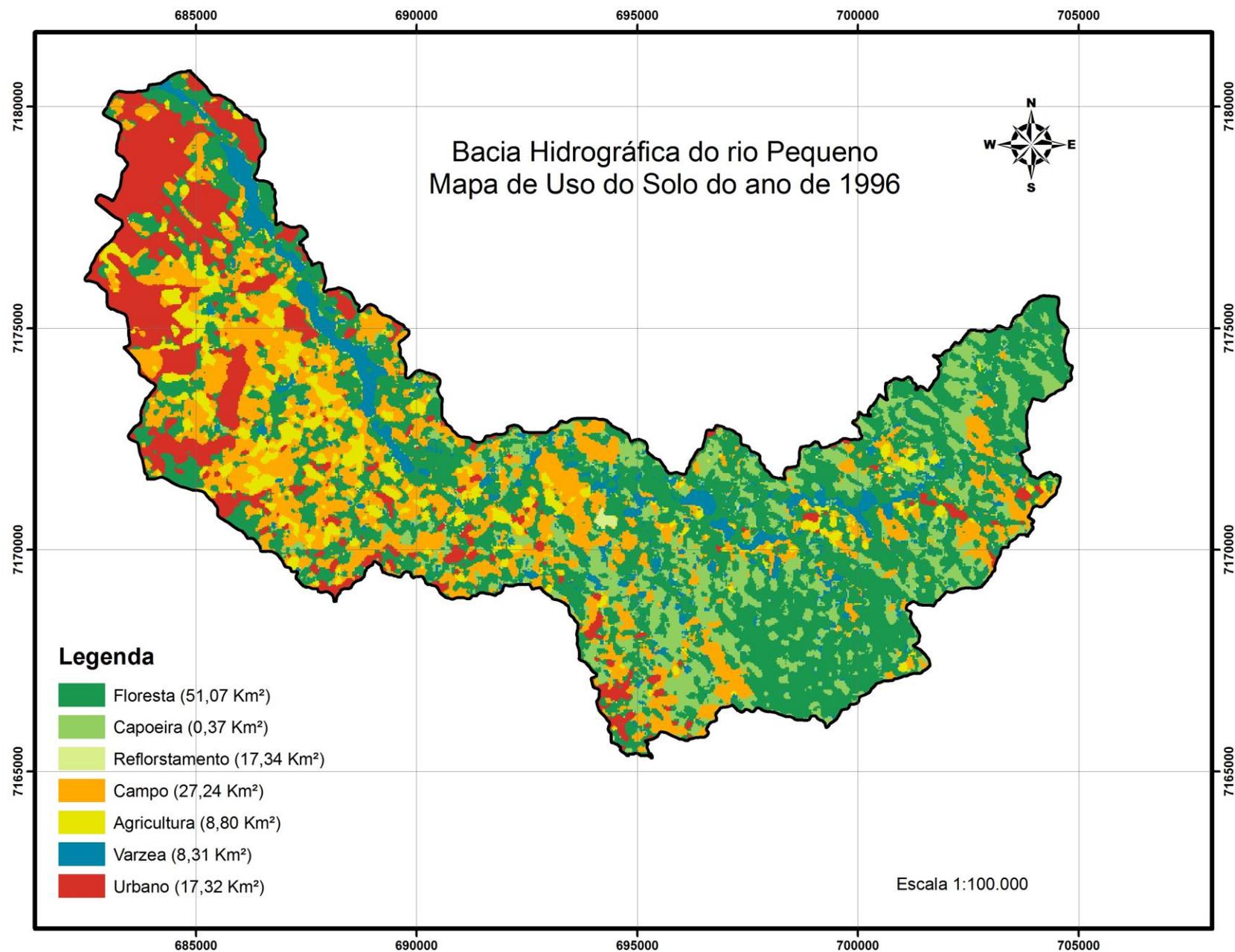


FIGURA 29 – MAPA DE USO DO SOLO PARA O ANO DE 1996.

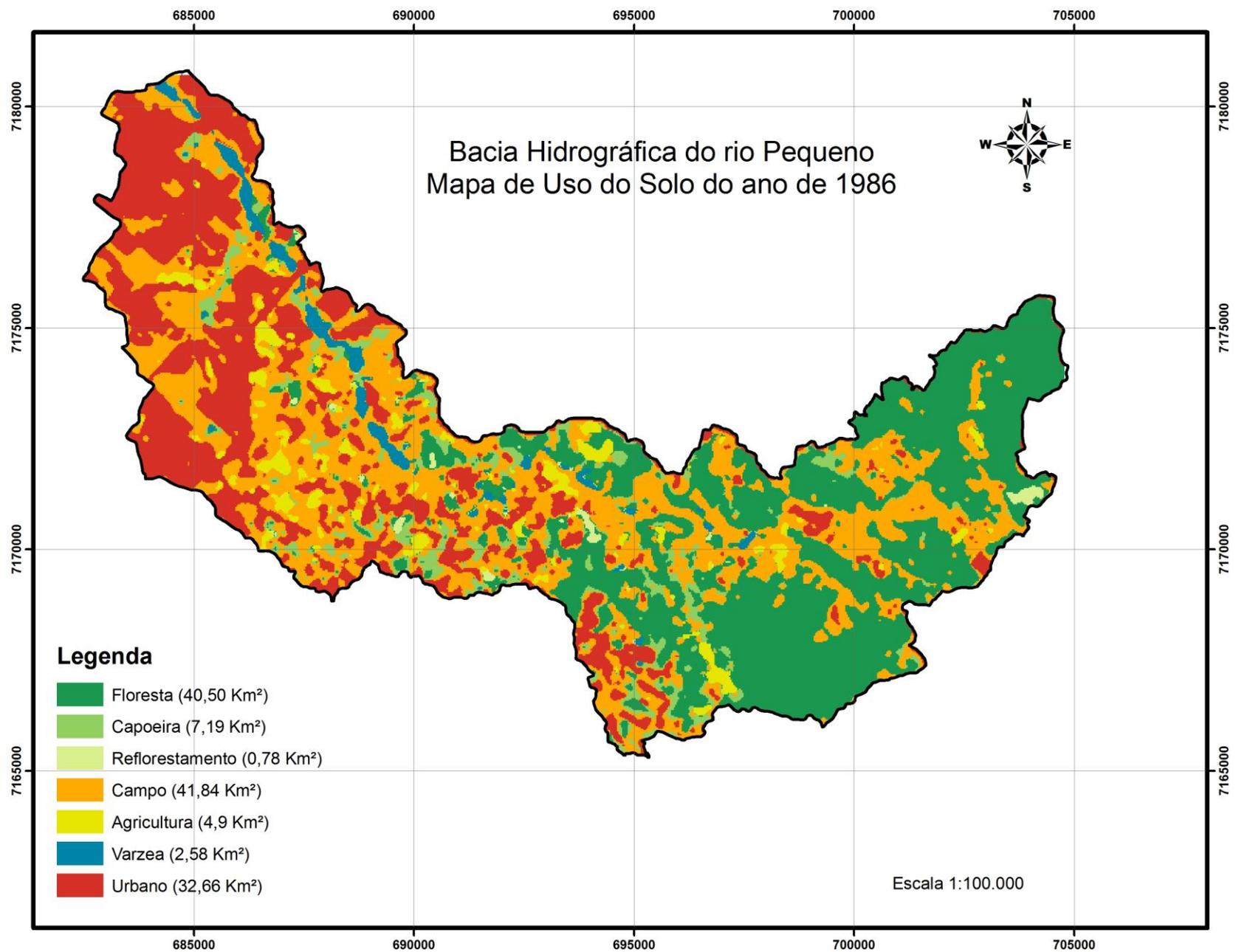


FIGURA 30 – MAPA DE USO DO SOLO PARA O ANO DE 2007.

#### 4.5. ANÁLISE DA CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO

Para realizar a análise da capacidade potencial de armazenamento de água da bacia hidrográfica do rio Pequeno nos anos de 1986, 1996 e 2007, foi feita a expressões dos usos do solo (tabela,10) em termos de grau de proteção (tabela 17). Tendo seus resultados apresentados na tabela 27 e figura 31 e também ilustrados nas figuras 32, 33, 34.

TABELA 27 – GRAU DE PROTEÇÃO DOS USOS DA TERRA NOS ANOS DE 1986, 1996, 2007.

Classes	ANO					
	1986		1996		2007	
	Área (Km <sup>2</sup> )	%	Área (Km <sup>2</sup> )	%	Área (Km <sup>2</sup> )	%
Muito Alta	36,40	27,90	51,07	39,15	40,50	31,05
Alta	6,01	4,61	17,71	13,58	7,97	6,11
Média	57,49	44,07	27,24	20,88	41,84	32,07
Baixa	23,96	18,37	17,11	13,12	7,48	5,73
Muito Baixa	6,59	5,05	17,32	13,28	32,66	25,04
Total	130,45	100,00	130,45	100,00	130,45	100,00

FONTE: o autor (2012)

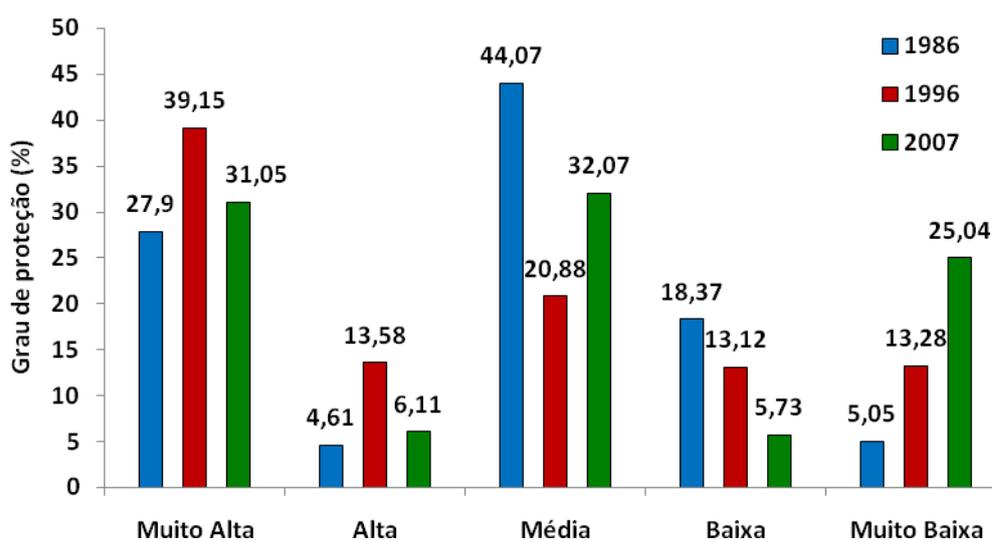


FIGURA 31 – GRAU DE PROTEÇÃO DOS USOS DA TERRA NOS ANOS DE 1986, 1996, 2007.

FONTE: o autor (2012)

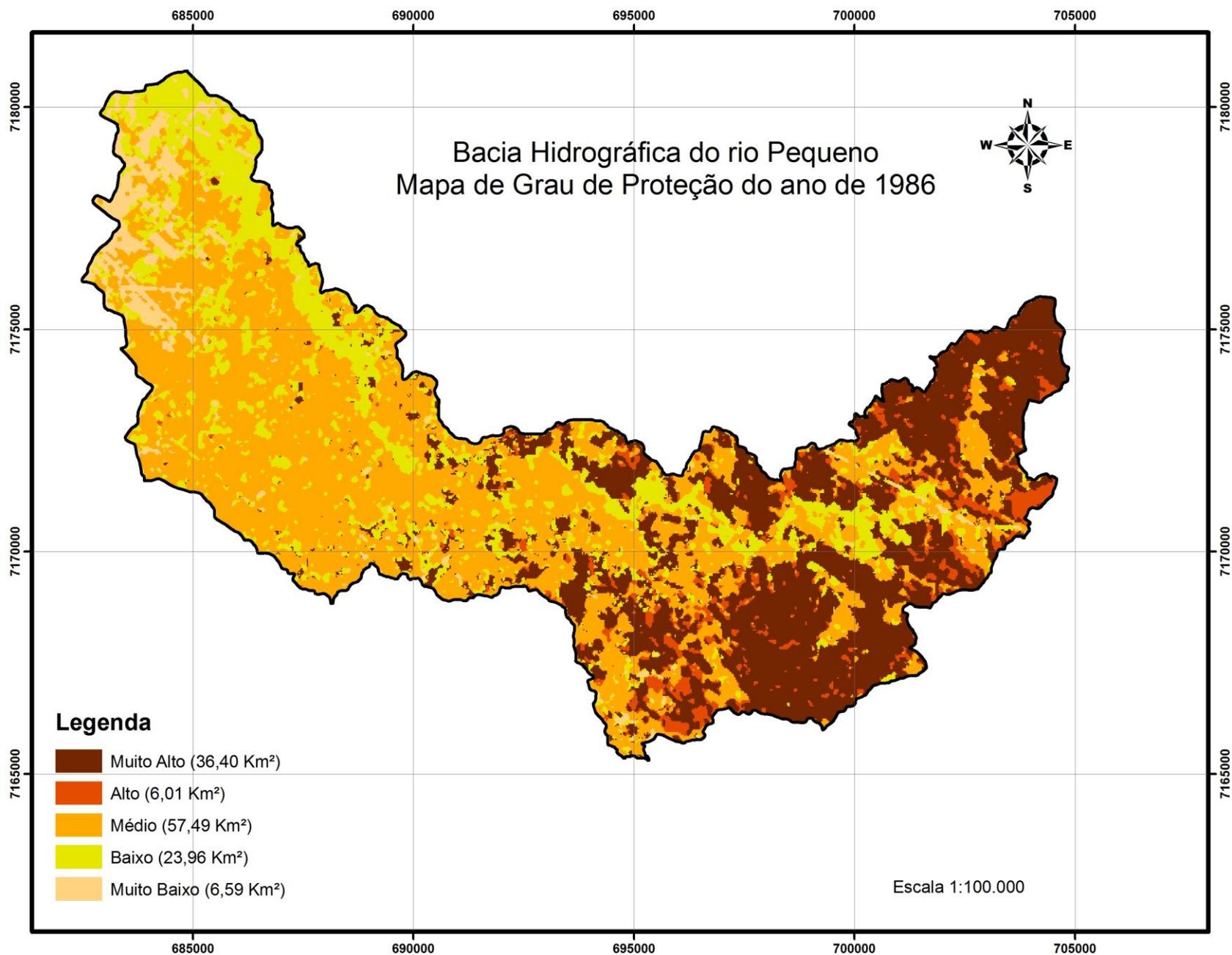


FIGURA 32 – MAPA DO GRAU DE PROTEÇÃO NO ANO DE 1986

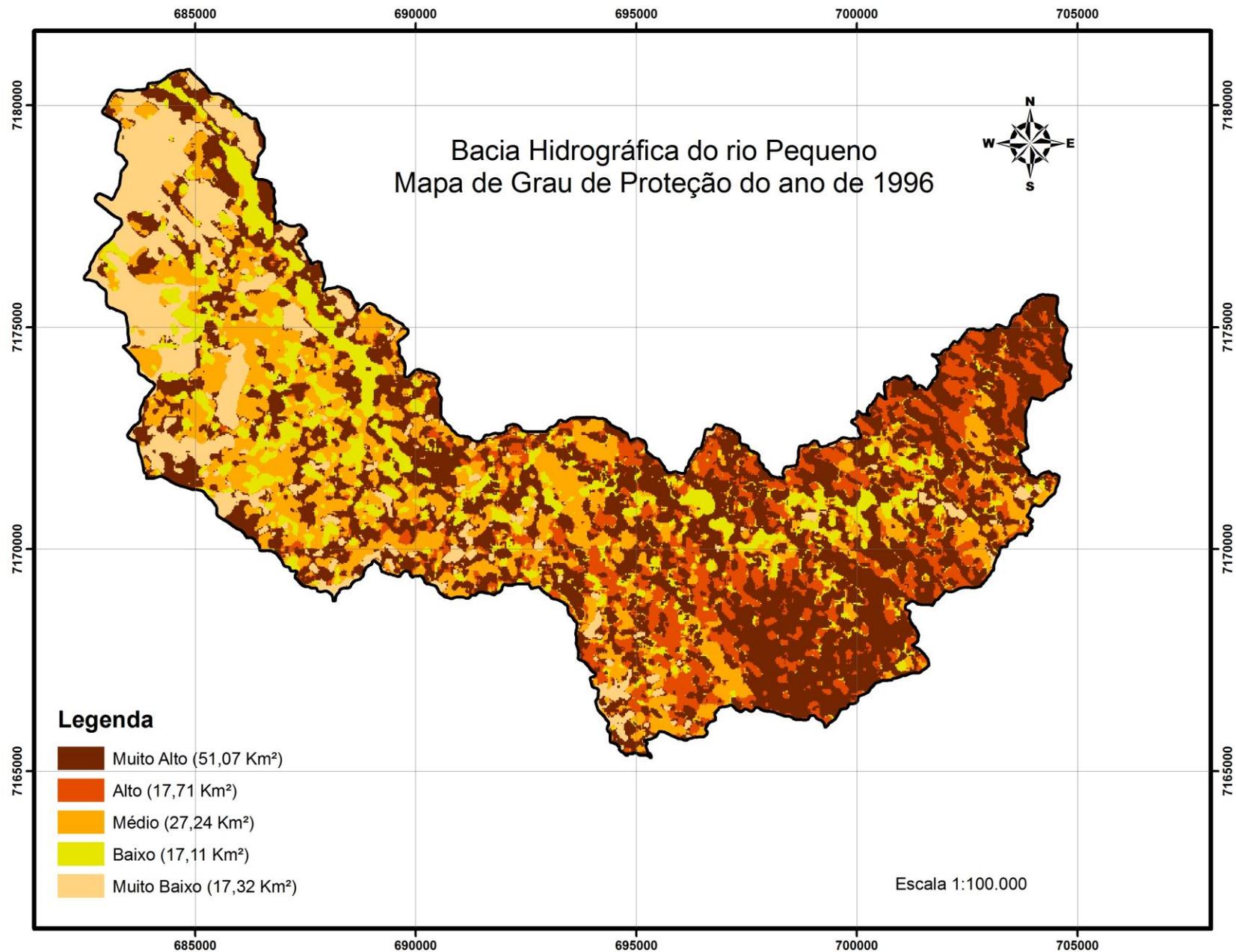


FIGURA 33 – MAPA DO GRAU DE PROTEÇÃO NO ANO DE 1996

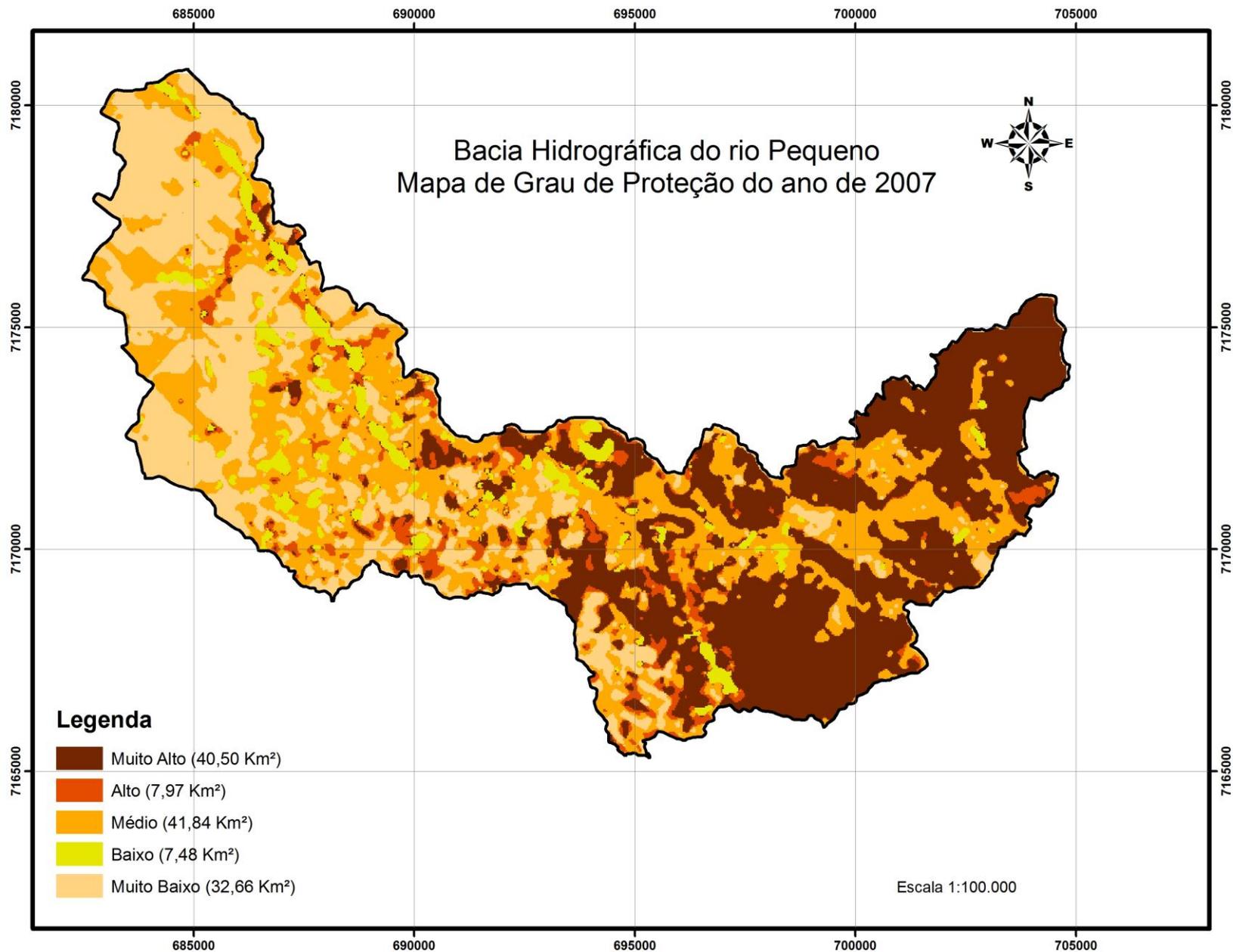


FIGURA 34 – MAPA DO GRAU DE PROTEÇÃO NO ANO DE 2007

Observando a tabela 27 verifica-se que a única classe que mantém um padrão de expansão é a classe de proteção do solo muito baixa. Em termos de uso do solo (tabela 17) é representada pela classe Urbano. Reflete o crescimento urbano do município, que passou de 5,05% para 25,04% no decorrer de 21 anos, sobre o grau de proteção. Já foram as únicas a manter um padrão, contudo de retração, foi a classe baixa, que representa em termos de uso do solo (tabela 17) as classes de várzea e agricultura, apresentando uma retração de 18,23% no mesmo período de 21 anos, reflexo também do desenvolvimento urbano da região metropolitana de Curitiba.

A classe de grau de proteção média apresentou uma descontinuidade de retração e expansão, sendo que no nos primeiros 10 anos analisados está sofre uma retração de 23,19%, e nos próximos 11 anos sofre uma expansão de 11,19%. Está classe em termos do uso do solo (tabela17) é representada pela classe de campo. A classe de grau de proteção alta expressa em termos de uso do solo (tabela 17) as classes de capoeira e reflorestamento que também nos primeiros 10 anos do estudo sofreram uma expansão e nos 11 anos subseqüentes uma retração de 8,97 % e 7,11% respectivamente. A classe de grau de proteção muito alta reflete a expressão do uso do solo (tabela 17) da floresta, apresentando uma expansão de 11,25% de sua área no decorrer dos 10 primeiro anos e uma retração de 8,1% nos últimos 11 anos do estudo. Esta retração pode, em alguns casos, ser reflexos dos loteamentos que estão sendo feitos nas áreas de cabeceira da bacia, as chamadas “chacrinhas” que foram observadas em visitas ao campo e estão ilustradas na figura 35.



FIGURA 35 – CHACRINHAS NAS CABECEIRAS DA BACIA DO RIO PEQUENO  
FONTE: o autor (2012)

Para o estudo da análise da capacidade potencial de armazenamento foram realizadas as integrações do mapa de potencial de armazenamento poroso, conforme tabela 20 e com o grau de proteção nos anos de 1986, 1996 e 2007, cujos resultados são apresentados na tabela 28 e na figura 36 e nas figuras 38, 39 e 40.

TABELA 28 – CLASSE DE CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO

Classes	ANO							
	Original		1986		1996		2007	
	Área (Km <sup>2</sup> )	%						
Alta	46,25	35,45	79,39	60,86	79,89	61,24	74,10	56,80
Média	83,2	63,78	49,38	37,86	45,97	35,24	47,73	36,59
Baixa	0,52	0,40	1,68	1,29	4,59	3,52	8,62	6,61
Muito Baixa	0,48	0,40	0	0	0	0	0	0
Total	130,45	100,00	130,45	100,00	130,45	100,00	130,45	100,00

FONTE: o autor (2012)

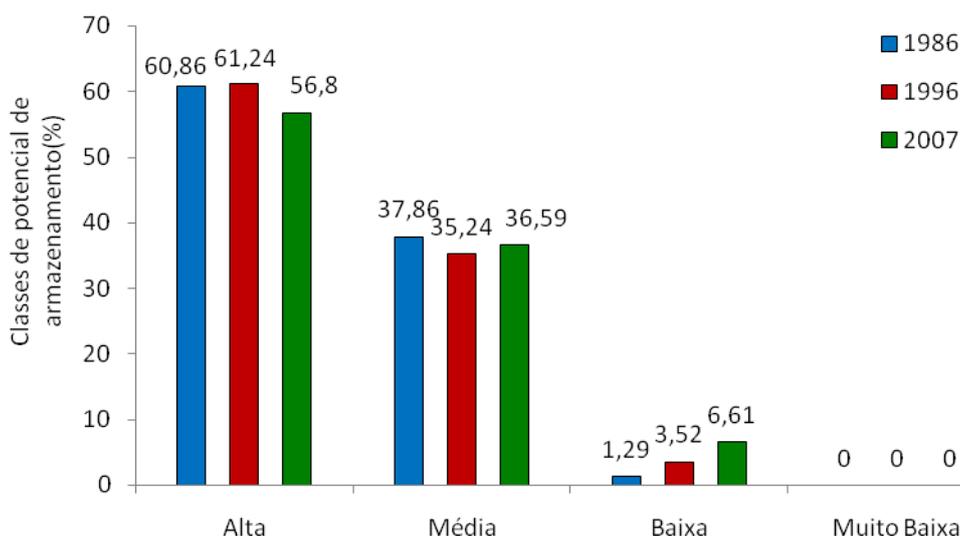


FIGURA 36 – CLASSES DE CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO

FONTE: o autor (2012)

No ano de 1986 a bacia hidrográfica do rio Pequeno apresentou 60,86% de sua área com alta capacidade de armazenamento, 37,86% da área com média capacidade de armazenamento e 1,29% com baixa capacidade de armazenamento tendo seus resultados apresentado na figura 38.

Em 1996, ocorreram pequenas retrações e expansões na capacidade de armazenamento como podem ser observadas na tabela 28. A bacia passou a ter

61,24% de sua área com alta capacidade de armazenamento, 35,24% com média capacidade de armazenamento e 3,52% com baixa capacidade de armazenamento conforme ilustrado na figura 39

No último ano analisado, 2007, a bacia apresentou 56,80% da área da sua bacia com alta capacidade de armazenamento, 36,59% com média capacidade de armazenamento e 6,61% com baixa capacidade de armazenamento, conforme ilustrado na figura 40.

Para demonstrar de uma maneira mais clara as modificações ocorridas na capacidade potencial de armazenamento da bacia, a tabela 29 e a figura 37 demonstra os percentuais de retração e expansão ocorridos nas classes de capacidade de armazenamento no decorrer dos anos.

TABELA 29 – RETRAÇÃO (-) E EXPANSÃO (+) DAS CLASSES DE CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO EM DECORRÊNCIA DOS USOS DO SOLO.

Classes	ANO					
	Original - 1986		1986 - 1996		1996 - 2007	
	Área (Km <sup>2</sup> )	%	Área (Km <sup>2</sup> )	%	Área (Km <sup>2</sup> )	%
Alta	33,14	+25,40	0,50	+0,38	5,79	-4,44
Média	33,82	-25,92	3,41	-2,62	1,76	+1,35
Baixa	1,16	+0,89	2,91	+2,23	4,04	+3,10
Total	68,11	52,21	6,82	5,23	11,58	8,88

FONTE: o autor (2012)

A classe de baixa capacidade de armazenamento é a única que apresentou um padrão constante de expansão, crescendo à medida que os anos passaram como pode ser observado na tabela 29. Nos três períodos considerados ela apresentou uma expansão de 0,89% no ano de 1986, de 2,23% no período de 1986 a 1996 e de 3,19% no período de 1996 a 2007.

Na classe baixa as expansões são reflexos do desenvolvimento sócio-econômico, das políticas de desenvolvimento, da melhoria da infra-estrutura viária e dos valores sociais referentes ao uso do solo que adentraram na bacia hidrográfica por meio da imigração. O crescimento da classe de baixa capacidade modificou outras formas de usos do solo.

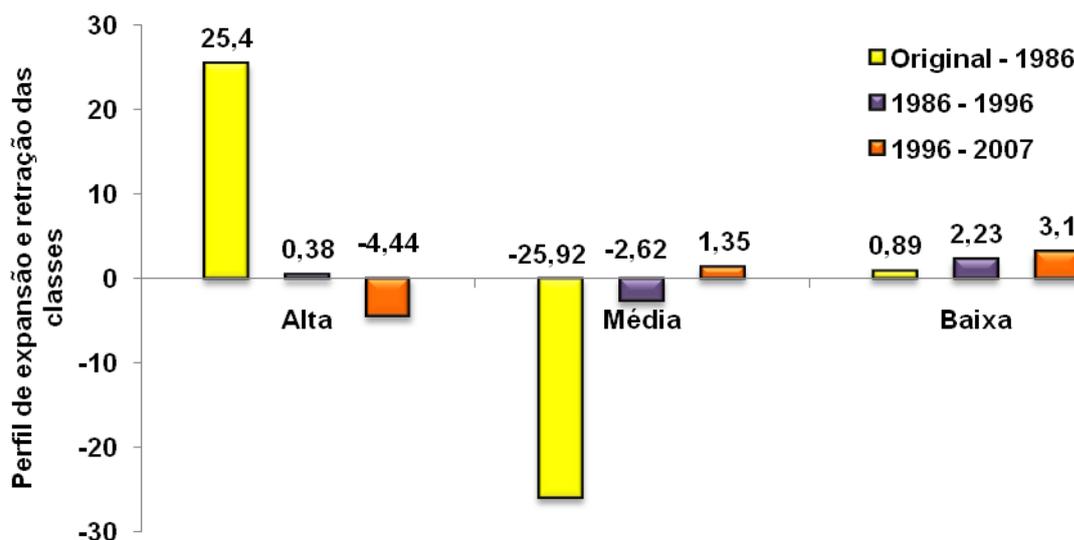


FIGURA 37 – RETRAÇÃO (-) E EXPANSÃO (+) DAS CLASSES DE CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO EM DECORRÊNCIA DOS USOS DO SOLO.

FONTE: o autor (2012)

O crescimento das áreas com baixa capacidade potencial de armazenamento é a que mais preocupa, pois com o aumento da impermeabilização do terreno, diminui a infiltração causando alterações na estrutura hidrológica da paisagem, aumentando a participação do escoamento superficial direto, modificando o comportamento do deflúvio (CHIARANDA, 2002).

A classe de média capacidade de armazenamento apresentou uma retração de 2,62 % no período de 1986 a 1996 e uma expansão de 1,35% no período subsequente que vai de 1996 a 1997. Na comparação feita entre a capacidade original de armazenamento e o ano de 1986 a classe sofre uma retração de 25,92%.

A classe de alta capacidade de armazenamento sofreu, em seu primeiro período uma expansão de 25,40% e continuou o processo de expansão no período de 1986 a 1996 com 0,38% de acréscimo. No período de 1996 a 2007 esta classe sofre uma retração de 4,44%.

As alterações ocorridas nas classes de média e alta capacidade de armazenamento são devido ao crescimento urbano que insere na bacia uma característica de uso do solo diversificado. O crescimento das áreas de “chacrinhas”, que são pequenas propriedades rurais destinadas ao lazer, muito provavelmente é a grande justificativa para a retração das áreas de alta capacidade de armazenamento, pois retiram a cobertura florestal para inserir em seu lugar áreas para o lazer, como campos, áreas de pastagem entre outras.

O que também pode ter causado essas alterações foram às extrações de madeira nativa e os plantios florestais nas décadas de 80 e 90, que modificaram as características de proteção do solo. Contudo o que mais expandiu foi às áreas de campo que representam uma média capacidade de proteção do solo.

Quando se trata da capacidade de armazenamento de uma bacia hidrográfica alguns cuidados devem ser tomados, principalmente na interpretação e nos usos dos mapas de capacidade de armazenamento. Estes mapas não podem ser considerados como medida direta da capacidade de recarga, mas sim como uma indicação, pois a capacidade potencial de armazenamento refere-se ao volume de água que pode ser acumulado ou retido temporariamente no meio poroso. Já a capacidade de recarga está relacionada ao balanço existente entre a precipitação incidente e o escoamento superficial, ou seja, a quantidade do armazenamento nas depressões superficiais, no solo e no lençol freático (CHIARANDA, 2002, BRAUM, 2007).

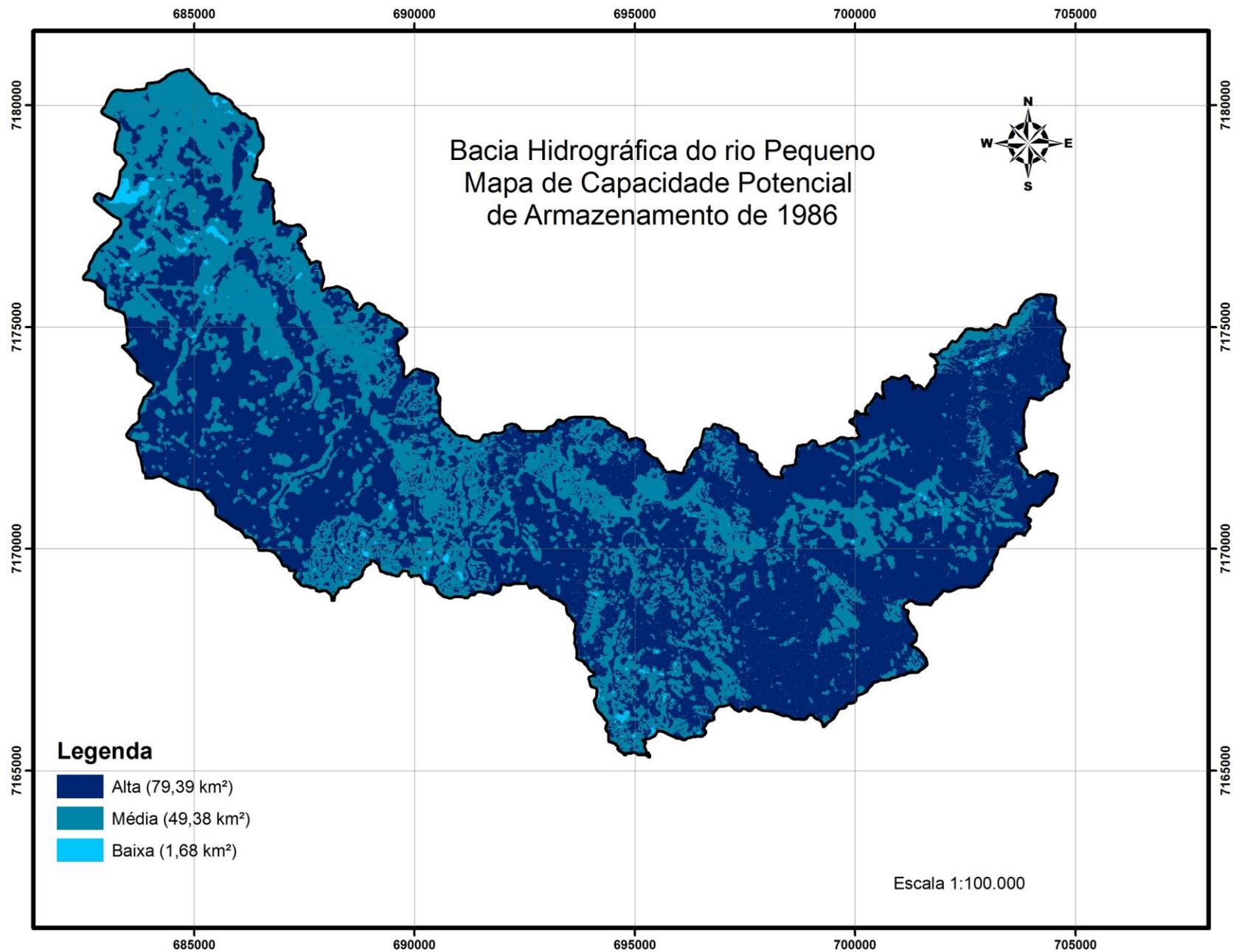


FIGURA 38 – MAPA DA CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO EM 1986.

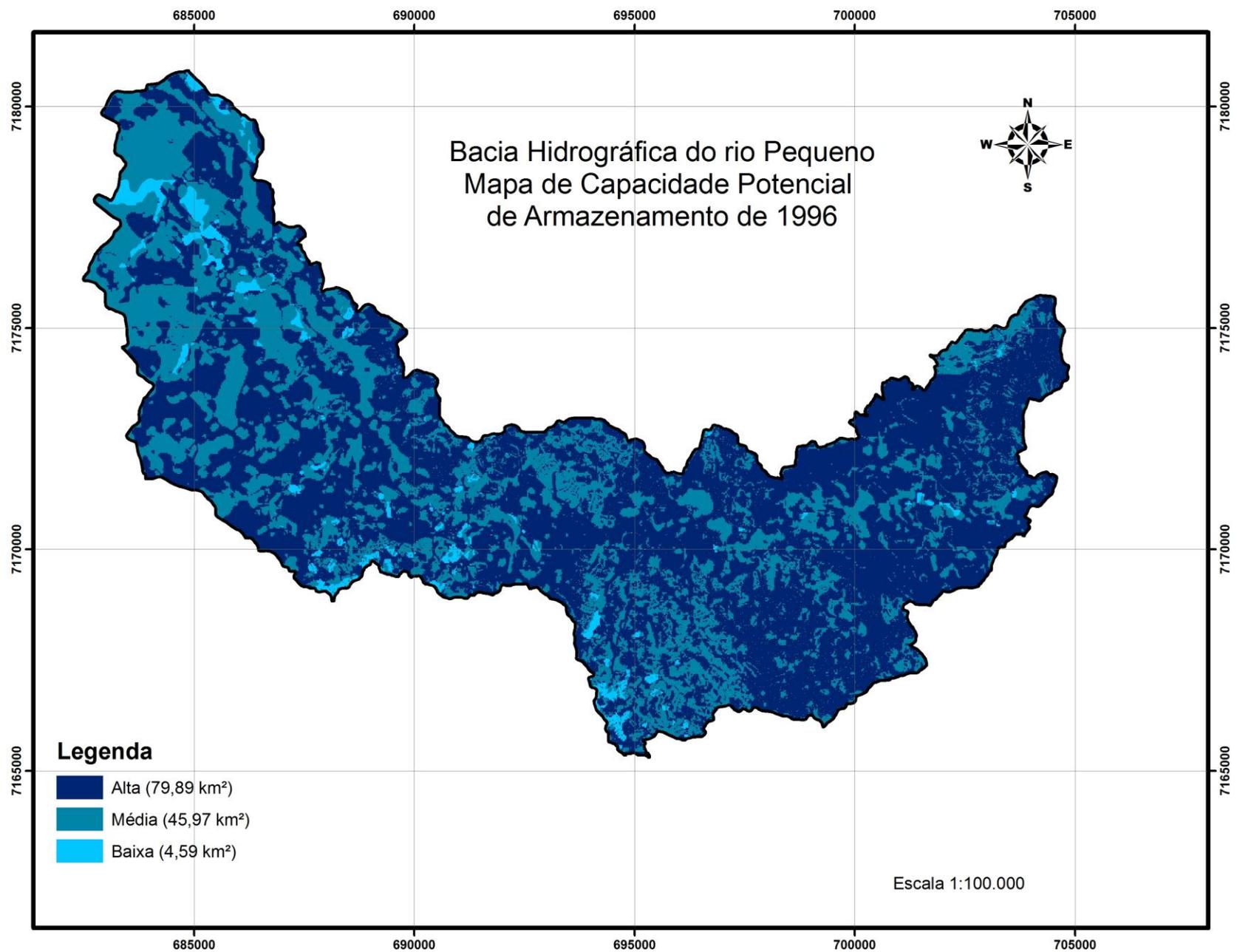


FIGURA 39 – MAPA DA CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO EM 1996.

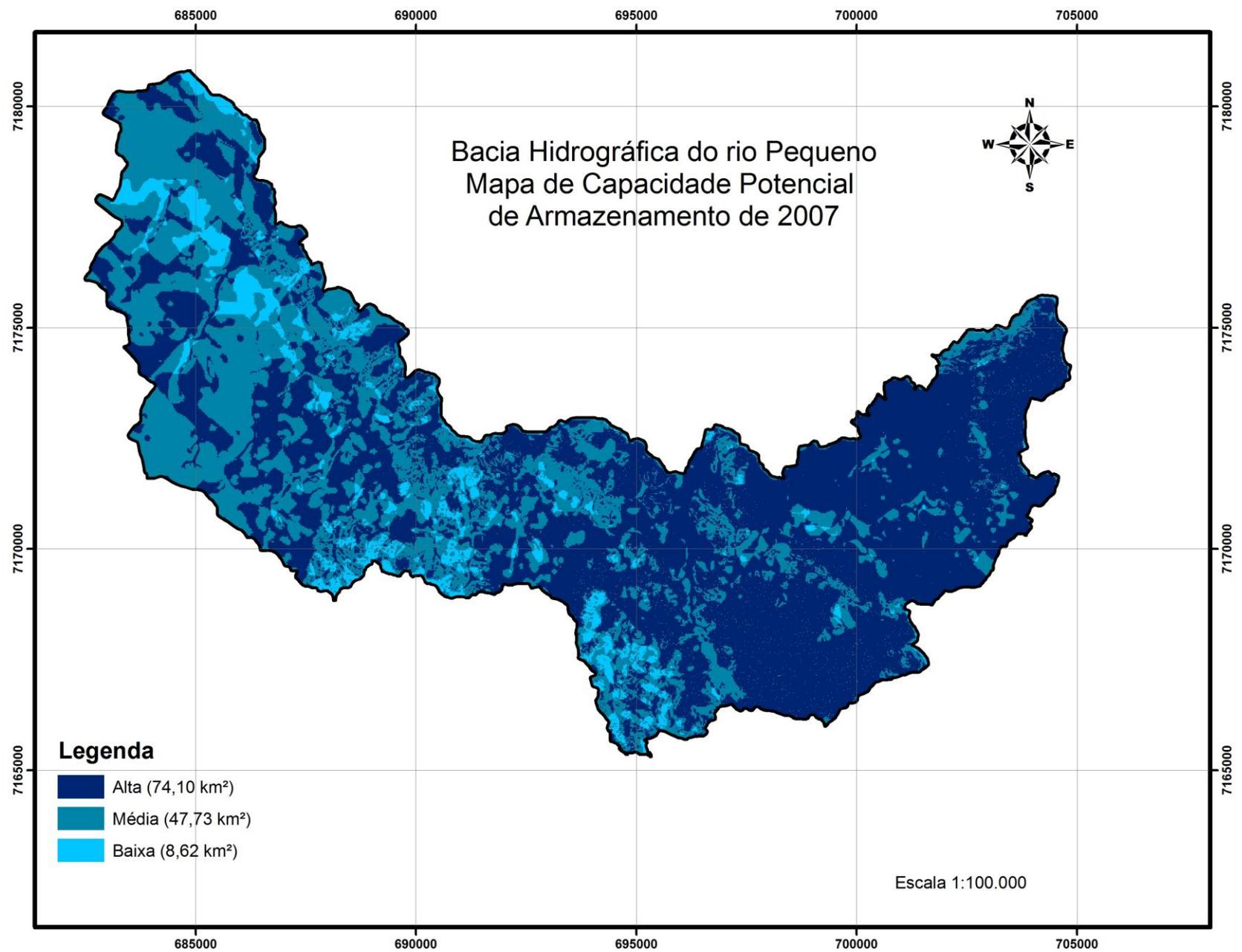


FIGURA 40 – MAPA DA CAPACIDADE POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO EM 2007.

#### 4.7. ANÁLISE YETOGRAMAS DE PRECIPITAÇÃO

A precipitação foi analisada em uma série temporal de 30 anos. Os dados foram obtidos através das medições feitas na estação da Fazendinha – São José dos Pinhais, código ANEL 2549017.

O princípio utilizado para as análises de precipitação, segundo Chiaranda (2002), foi o de que o deflúvio produzido pela bacia hidrográfica é resposta direta e resposta integrada da precipitação, num dado regime climático com as componentes e processos da bacia. Desta maneira os valores mensurados no decorrer de uma série temporal, podem indicar anomalias climáticas como modificações nas variáveis da bacia hidrográfica.

Os dados de precipitação são apresentados na tabela 30 e ilustrados na figura 41.

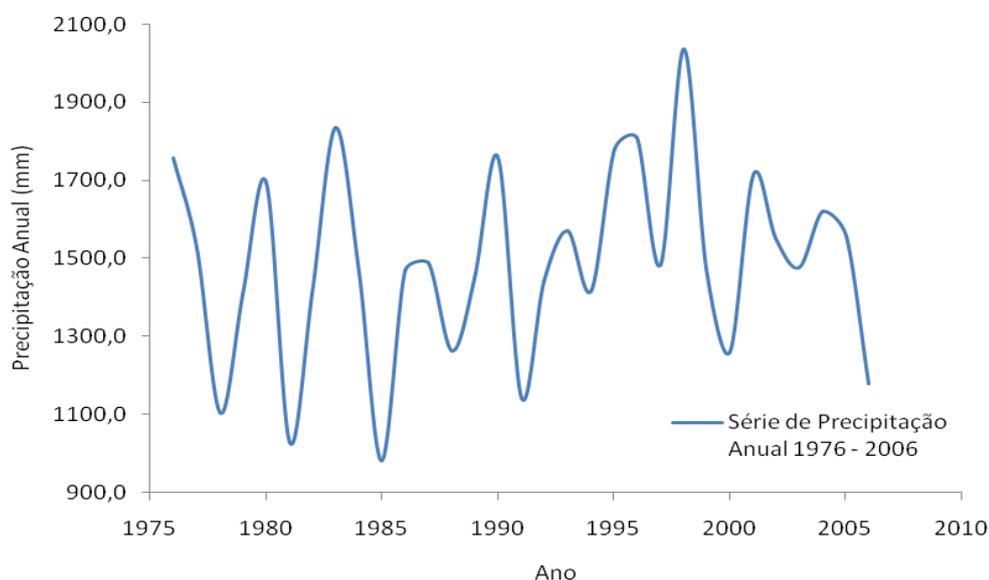


FIGURA 41 – PRECIPITAÇÃO ANUAL NO PERÍODO DE 1975 A 2006.  
FONTE: o autor (2012)

O que pode ser analisado no higrgrama de precipitação são os anos de 1985 que ocorreu a menor precipitação anual, 982,6 mm nos anos de 1983 e 1998 ocorreram as maiores taxas de precipitação 1835,6 e 2036,2 mm respectivamente. Esses fenômenos mais extremos da precipitação registrados, provavelmente estão ligados a fenômenos naturais da atmosfera.

TABELA 30 – VALORES DE PRECIPITAÇÃO (mm) MENSAL E ANUAL DOS ANOS DE 1976 A 2006.

Ano	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
Jan	306,2	193,4	93,4	170,2	206	179,4	6,2	162,6	229	64,6	248,6	96,2	133,4	223,8	244,6	150,8	107,4
Fev	140	117,2	112,9	105,2	160,8	35,6	150,4	126,8	31,4	236	155	228,8	129,2	95,6	178,8	69,6	176
Mar	187	381	106,8	60,8	116,8	86,6	51,6	90,8	155	106,4	138	30,8	190,6	158,8	125,6	199,8	251,6
Abr	85,8	56,2	18,4	81,8	93	78,2	35,4	175,6	120,2	94,6	98,3	163,2	100,8	145,2	168	62,4	22,2
Mai	179,6	36,6	39,8	234,2	26,2	36,4	52,8	268,6	147,4	29,8	101,8	293,4	268	112	79,8	52,4	250
Jun	86,2	67,2	72,8	20	75,6	20	282,6	206,2	144,8	36	5,6	148	72	43,8	99,8	114,6	48,6
Jul	111,8	63,8	101,6	70,4	215,6	32,8	118,2	304,6	61,6	38,1	34,9	38,2	13,2	166	247,6	3	169,3
Ago	125,2	70,4	111,6	46,2	107,8	65,2	75,2	0	171,8	4,2	108,5	57	14,2	35,6	139,4	68	133,2
Set	102,8	58,8	133	128,2	185,6	80,6	33	207	104,4	125,3	55,9	86,8	77,2	169,6	119	34,4	49,5
Nov	114	142,6	171,4	103,6	44,6	142	265,6	44,2	148	83,6	180,2	38,8	20,3	57,4	148,6	67,4	124,2
Dez	176,6	91,2	57	152,7	279,6	151,8	144,4	173,2	118,8	90,4	218,2	170,2	149,4	171,2	93	133,2	40
<b>Precipitação Anual</b>	<b>1757,4</b>	<b>1525,4</b>	<b>1102,9</b>	<b>1406,7</b>	<b>1694,8</b>	<b>1029,0</b>	<b>1409,6</b>	<b>1835,6</b>	<b>1464,0</b>	<b>982,6</b>	<b>1467,2</b>	<b>1488,8</b>	<b>1263,6</b>	<b>1447,4</b>	<b>1758,8</b>	<b>1142,6</b>	<b>1440,2</b>

CONTINUAÇÃO TABELA 30 – VALORES DE PRECIPITAÇÃO (MM) MENSAL E ANUAL DOS ANOS DE 1976 A 2006.

Ano	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Jan	264,4	116	528	281,2	224,2	154,6	319,3	114,2	154	320,4	178,8	195,4	132,4	121
Fev	145,6	214,8	148,8	183,2	78,4	208,8	313,4	181,2	213,8	147	214	79	59,2	149
Mar	139	77,8	77	215,6	89,2	328,9	105,4	73	139,6	97,6	168,8	164,4	81,2	169,8
Abr	58,4	79	79,8	61,4	27,4	174	64	4,6	79	60	53,6	174,2	121,6	24,2
Mai	152	88	42,6	5,2	48,8	36,2	68,8	13,8	184	134,7	25,8	145,7	117,4	19,6
Jun	86	97	97,6	99,6	139,2	90,8	79,2	134,5	157	29,4	87	96,4	81,4	28,8
Jul	119,8	115,4	108,2	94,1	38,8	134,2	132	72,8	205,4	32,8	130,5	132	117,4	49,4
Ago	21,8	5,8	59,2	86	70,6	238,5	12,6	83,8	53,6	135	17,6	19,4	175,4	44,2
Set	304,4	8	145,2	180,4	156,7	319,8	104,8	214,6	65	166,8	155	66,6	277,4	224,2
Out	112,6	124	127,8	148,6	221,6	215,2	98,4	133	183,6	128,9	71,4	172,6	222,6	63,8
Nov	60,8	250,8	118,6	128,8	241,9	27,2	64	82,8	142,4	137,7	159,2	115,2	96,6	166,4
Dez	106,6	239,4	246,8	325,2	146,6	108	112,6	151,9	137	161,4	215,6	259,6	74,4	118,6
<b>Precipitação Anual</b>	<b>1571,4</b>	<b>1416,0</b>	<b>1779,6</b>	<b>1809,3</b>	<b>1483,4</b>	<b>2036,2</b>	<b>1474,5</b>	<b>1260,2</b>	<b>1714,4</b>	<b>1551,7</b>	<b>1477,3</b>	<b>1620,5</b>	<b>1557,0</b>	<b>1179,0</b>

FONTE: SANEPAR

#### 4.8. ANÁLISE DOS HIDROGRAMAS DE VAZÃO

A vazão do rio Pequeno foi analisada com o uso de série temporal de 30 anos de dados da estação da Fazendinha – São José dos Pinhais, código ANEL 65010000.

A vazão média anual máxima apresentada pelo rio Pequeno no período considerado foi de 5,29 m<sup>3</sup>/s no ano de 1998 e vazão média mínima de 1,38 m<sup>3</sup>/s no ano de 1985. Valores estes que podem ser observado no gráfico da figura 42.

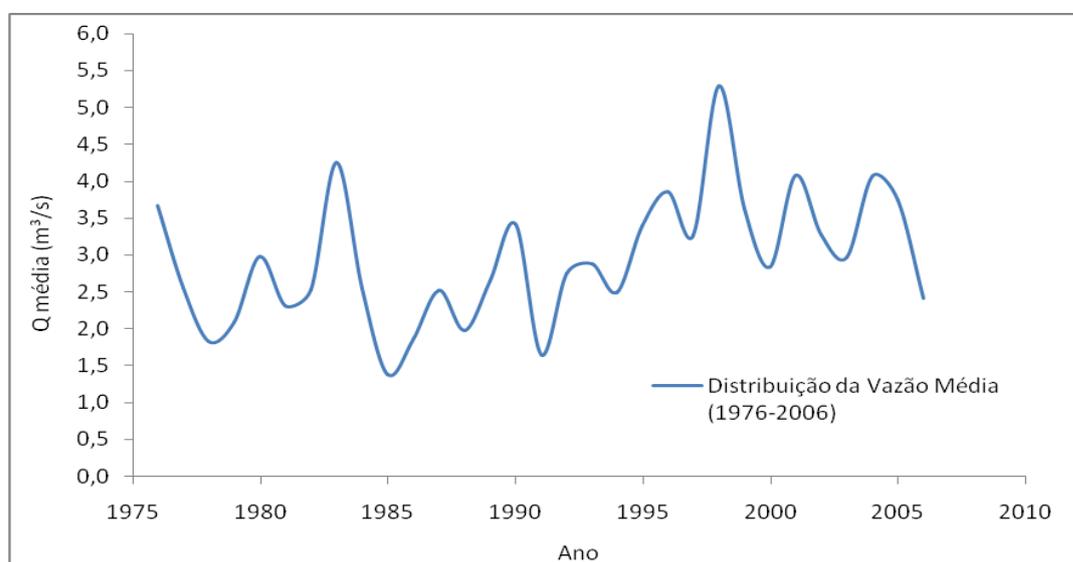


FIGURA 42 – DISTRIBUIÇÃO DA VAZÃO MÉDIA ENTRE 1976 E 2006.

FONTE: o autor (2012)

Para cada um dos períodos onde foi realizado a análise da capacidade potencial de armazenamento foi também elaborada uma curva permanência. Na figura 43 está ilustrada da curva permanência de vazão média mensal para os anos de 1985 e 1986. Na figura 44 ilustra-se a curva de permanência para os anos de 1995 e 1996 e na figura 45 a curva de permanência dos anos de 2005 e 2006.

Conforme os dados de vazão demonstrados na tabela 31 foi calculada a vazão média de 1,39 m<sup>3</sup>/s para os anos de 1985 e 1986. A curva de permanência ilustrada na figura 43 demonstra que esta média é excedida em 33% do número de ocorrência da vazão. Observamos também que o valor onde a vazão é igualada ou superada em 12,5 e 95,8% do tempo é respectivamente 2,11 e 0,54 m<sup>3</sup>/s.

TABELA 31 – VALORES DE VAZÃO PARA CURVA PERMANÊNCIA 1985 - 1986

Número (n)	Q (m <sup>3</sup> /s) ordenado	Mês	Ano	Frequência (n/N)x100
1	2,82	Fev	1986	4,2
2	2,82	Fev	1985	8,3
3	2,11	Abr	1986	12,5
4	2,11	Abr	1985	16,7
5	2,01	Mar	1986	20,8
6	2,01	Mar	1985	<b>25,0</b>
7	1,96	Jan	1986	29,2
8	1,96	Jan	1985	33,3
9	1,35	Set	1986	37,5
10	1,35	Set	1985	41,7
11	1,17	Mai	1986	45,8
12	1,17	Mai	1985	<b>50,0</b>
13	1,14	Nov	1986	54,2
14	1,14	Nov	1985	58,3
15	1,13	Jun	1986	62,5
16	1,13	Jun	1985	66,7
17	1,02	Out	1986	70,8
18	1,02	Out	1985	<b>75,0</b>
19	0,84	Jul	1986	79,2
20	0,84	Jul	1985	83,3
21	0,68	Dez	1986	87,5
22	0,68	Dez	1985	91,7
23	0,54	Ago	1986	<b>95,8</b>
24	0,54	Ago	1985	100,0

FONTE: o autor (2012)

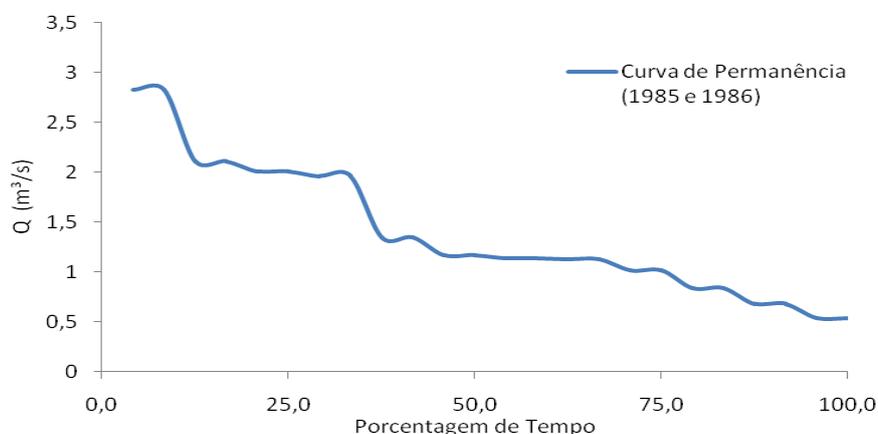


FIGURA 43 – CURVA PERMANÊNCIA MENSAL DOS ANOS DE 1985 E 1986.

FONTE: o autor (2012)

Conforme os dados de vazão demonstrados na tabela 32 foi calculada a vazão média de 3,63 m<sup>3</sup>/s para os anos de 1995 e 1996. A curva de permanência ilustrada na figura 44 demonstra que esta média é excedida em 37,5% do número de ocorrência da vazão. Observamos também que o valor onde a vazão é igualada ou superada em 12,5 e 95,8% do tempo é respectivamente 6,22 e 1,67 m<sup>3</sup>/s.

TABELA 32 – VALORES DE VAZÃO PARA CURVA PERMANÊNCIA 1995 - 1996

Número (n)	Q (m³/s) ordenado	Mês	Ano	Frequência(n/N)x100
1	9,63	Jan	1995	4,2
2	6,64	Fev	1995	8,3
3	6,22	Jan	1996	12,5
4	5,48	Fev	1996	16,7
5	5,41	Mar	1996	20,8
6	4,51	Dez	1996	<b>25,0</b>
7	4,39	Out	1996	29,2
8	4,09	Nov	1996	33,3
9	3,98	Set	1996	37,5
10	3,52	Abr	1996	41,7
11	3,31	Dez	1995	45,8
12	3,19	Nov	1995	<b>50,0</b>
13	3,12	Mar	1995	54,2
14	2,88	Out	1995	58,3
15	2,85	Jul	1996	62,5
16	2,78	Jul	1995	66,7
17	2,43	Set	1995	70,8
18	2,24	Ago	1996	<b>75,0</b>
19	2,15	Abr	1995	79,2
20	1,95	Jun	1996	83,3
21	1,76	Mai	1996	87,5
22	1,68	Ago	1995	91,7
23	1,67	Jun	1995	<b>95,8</b>
24	1,37	Mai	1995	100,0

FONTE: o autor (2012)

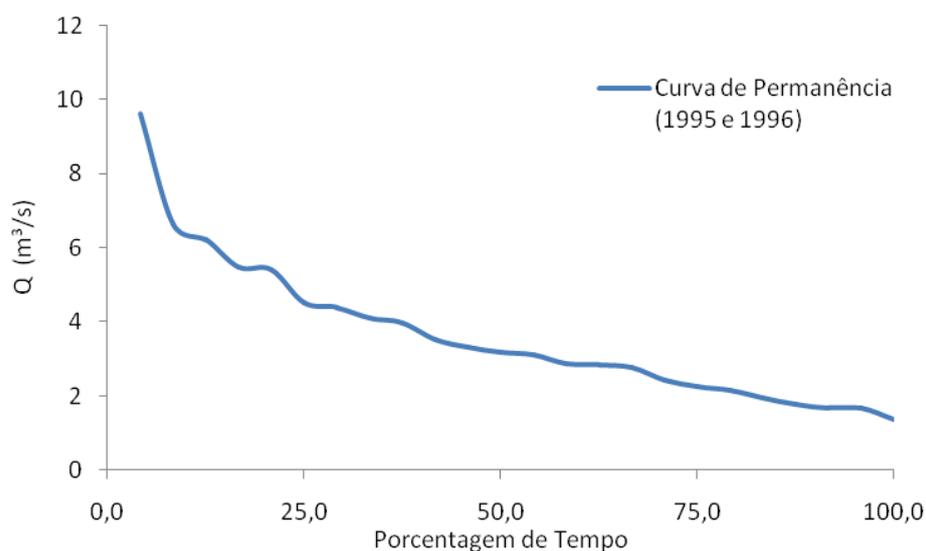


FIGURA 44 – CURVA PERMANÊNCIA MENSAL DOS ANOS DE 1995 E 1996.

FONTE: o autor (2012)

Conforme os dados de vazão demonstrados na tabela 33 foi calculada a vazão média de 3,08 m³/s para os anos de 2005 e 2006. A curva de permanência ilustrada na figura 45 demonstra que esta média é excedida em 37,5% do número

de ocorrência da vazão. Observamos também que o valor onde a vazão é igualada ou superada em 12,5 e 95,8% do tempo é respectivamente 5,04 e 1,09 m<sup>3</sup>/s.

TABELA 33 – VALORES DE VAZÃO PARA CURVA PERMANÊNCIA 2005 - 2006

Número (n)	Q(m <sup>3</sup> /s) ordenado	Mês	Ano	Frequência (n/N)x100
1	8,58	Set	2005	4,2
2	6,32	Out	2005	8,3
3	5,04	Nov	2005	12,5
4	4,2	Dez	2006	16,7
5	4,06	Nov	2006	20,8
6	3,87	Jan	2005	<b>25,0</b>
7	3,51	Dez	2005	29,2
8	3,44	Set	2006	33,3
9	3,32	Fev	2005	37,5
10	2,98	Jul	2005	41,7
11	2,78	Mar	2006	45,8
12	2,74	Jan	2006	<b>50,0</b>
13	2,69	Fev	2006	54,2
14	2,66	Ago	2005	58,3
15	2,38	Mai	2005	62,5
16	2,35	Out	2006	66,7
17	2,26	Abr	2006	70,8
18	2,22	Mar	2005	<b>75,0</b>
19	2,06	Jun	2005	79,2
20	2,02	Abr	2005	83,3
21	1,22	Jul	2006	87,5
22	1,17	Mai	2006	91,7
23	1,09	Jun	2006	<b>95,8</b>
24	1,03	Ago	2006	100,0

FONTE: o autor (2012)

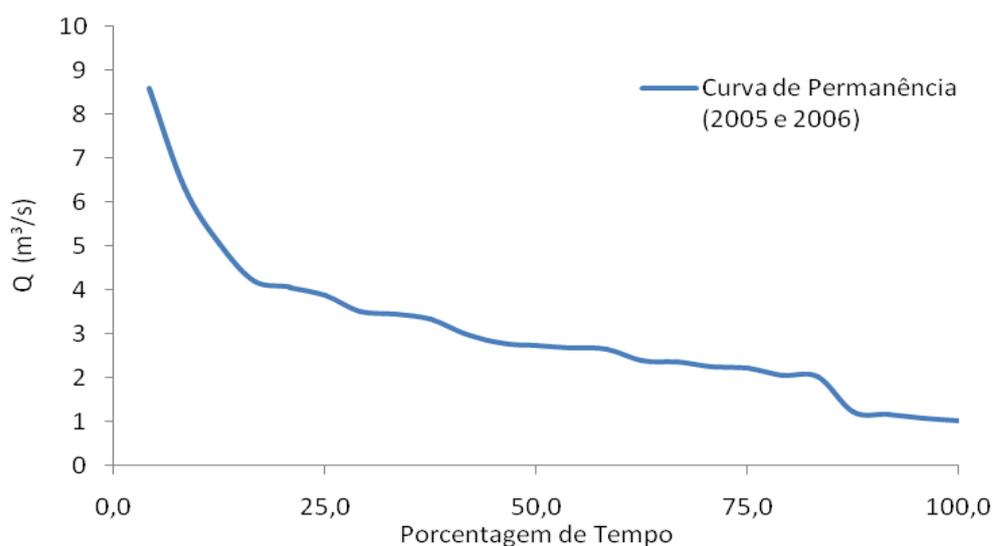


FIGURA 45 – CURVA PERMANÊNCIA MENSAL DOS ANOS DE 2005 E 2006.

FONTE: o autor (2012)

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho pautou-se na utilização da metodologia de análise proposta por Chiaranda (2002), baseada nos princípios de funcionamento das bacias hidrográficas e nos conceitos de estrutura hidrológica da paisagem, possibilitando desta maneira, avaliar o estágio de modificação hidrológica da paisagem através da capacidade potencial de armazenamento.

Com base nos resultados apresentados no decorrer da pesquisa pode ser observado que não houve um padrão de continuidade de expansão ou retração das classes de capacidade potencial de armazenamento. A diferença do percentual de áreas em cada classe de solo entre 1986 e 2007 indica um crescimento de 19,98% para classe urbano, 3,15% para floresta, 1,46% para agricultura e 1,07% para a classe capoeira. Retrações foram obtidas para as classes de várzea, redução de 14,10%, seguida pela classe de campo, 12% de redução.

No decorrer das três décadas contempladas pelo estudo ocorreu uma crescente impermeabilização do solo devido ao crescimento da área urbana da bacia. O que vem a ser o principal responsável pela alteração das classes de média e alta para baixa capacidade de armazenamento, além de modificar as propriedades de proteção e defesa que a cobertura vegetal fornece ao solo.

Grande parte das modificações da estrutura de uso do solo, como as alterações das classes naturais para classes antrópicas, foram geradas em função das políticas de desenvolvimento socioeconômico de expansão da região metropolitana de Curitiba. As reduções ocorridas nas classes de alta capacidade potencial de armazenamento para a média foram principalmente reflexos dos desmatamentos e do crescimento das classes de campo e capoeira.

A expansão territorial, da região metropolitana de Curitiba é inevitável em virtude do crescimento populacional e das migrações para a região. Portanto, a crescente necessidade da sociedade por infra-estrutura, bens e serviços torna o desenvolvimento das atividades socioeconômicas primordiais e incontestáveis. Todas as atividades relacionadas com o crescimento de um município modificam as condicionantes hidrológicas da região, afetando diretamente a capacidade potencial de armazenamento de água de uma bacia hidrográfica.

Esta metodologia tenta reduzir o subjetivismo espacial de zoneamento ao introduzir variáveis que, muito embora necessitem de maiores estudos, funcionam como indicadores reais de planejamento. Isto porque pauta-se em valores numéricos e na integração matemática destes por meio da álgebra aplicada ao espaço.

Para uma aplicação deste trabalho se faz necessário uma análise mais detalhada de determinadas componentes. Geologia e solos foram consideradas de forma simplificada, para facilitar a aplicação da metodologia, contudo estas componentes de ver ser analisadas de forma mais criteriosa. Devem ser feitas, para geologia, análises de permeabilidade das rochas e para solos análises de perfil de solo e ensaios laboratoriais para determinação de texturas.

Essas análises, embora extremamente importantes, elevam os custos dos trabalhos, pois como a área de estudo é relativamente extensa se faz necessária uma alta amostragem. Os recursos para realização deste estudo de mestrado eram limitados e, portanto esses tipos de ensaios não foram realizados.

Neste contexto, o presente trabalho fornece informações, que podem auxiliar no planejamento da expansão territorial da bacia hidrográfica do rio Pequeno. Estas informações devem ser utilizadas para o gerenciamento da bacia hidrográfica de maneira conjunta com estudos de fragilidade ambiental como o realizado por Guimarães (2000), estudos de zoneamento Hidrológico como os de Santos e Kobiyama (2004), entre outros.

Estas análises se justificam na gestão ambiental e gerenciamento de bacias hidrográficas, pela necessidade da geração de informações que alicercem o planejamento das intervenções futuras por meio da avaliação e controle da degradação que poderá a vir a ocorrer.

Para um futuro próximo, quando houver imagens de satélite disponíveis, recomenda-se repetir os passos deste trabalho para uma comparação e avaliação das alterações sofridas na capacidade potencial de armazenamento de água da bacia. Concomitantemente deverão ser realizados monitoramentos anuais dos usos do solo, no intuito de detectar conflitos legais, riscos e tendência de crescimento, tanto urbano como industrial. Recomenda-se também a realização de estudos sobre a viabilidade legal, social e econômica de conciliar a localização das áreas de reserva legal previstas na legislação florestal com as áreas de recarga da bacia hidrográfica, não somente na bacia do rio Pequeno, mas em todas as bacias do

município de São José dos Pinhais. Para que desta forma os recursos naturais do município não sejam suprimidos pela expansão urbana e industrial.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUASPARANÁ, **Mapas temáticos da bacia do Alto Iguaçu**, 2010.  
Disponível em: <http://www.aguasparana.pr.gov.br> Acesso em: 11/04/2012.
- AMARAL, S. B. **Aspectos da Relação entre uso-ocupação do solo e qualidade da água da Bacia do rio Pequeno São José dos Pinhais/PR**. Curitiba, 2002. 135 p. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal do Paraná.
- ANA, Agência Nacional de Águas **Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília, 2005b. Disponível em: < <http://www.ana.gov.br/sprtew/5/5-ANA.swf> > Acessado em: 03 de março de 2011.
- ANA, Agência Nacional de Águas **Fatos e Tendências: Água**, Brasília, p. 38, 2009
- BARTH, F.T. e BARBOSA, W. E.S. **Recursos Hídricos**, São Paulo, p. 46, 1999
- BIGARELA J.J.; SALAMUNI, R. **Caracteres texturais dos sedimentos da bacia de Curitiba**. Boletim da Universidade do Paraná, Curitiba, Inst. de Geologia, n.7,1962.
- BLACK, P. E. **Watersshed functions**. Journal of the American Water Resources Association. Washington: v.33, n. 1, p. 1-11, 1977.
- BRAUN, P. D. K. **Desenvolvimento de um modelo de avaliação da Capacidade de armazenamento de água na bacia do rio Itajaí – SC**. Blumenau: Dissertação (Mestrado em Eng. Ambiental – FURB), 2007.
- CABRAL, J. et al. Recursos Hídricos Subterrâneos. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (Org.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, p. 237-277, 2003.
- CAIECEDO, N.L. **Água Subterrânea**. In: Hidrologia, Ciência e Aplicação. 3.ed. Porto Alegre. Editora Universidade/ UFRGS: ABRH, 943p. 2002.
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Porto Alegre: Tese (Doutorado em Eng. De Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - UFRGS), 2001.
- CRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1º ed. São Paulo: Ed. Edgard Bücher Ltda., 1999.

CHIARANDA, R. **Usos da terra e avaliação da capacidade potencial de armazenamento de água na bacia do Rio Cuiabá – MT.** Curitiba: Tese (Doutorado em Eng. Florestal – UFPR), 2002.

GUIMARÃES, J. L. B. **Relação entre a ocupação do solo e o comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica do Rio Pequeno - São José dos Pinhais – PR** Curitiba: Tese (Doutorado em Eng. Florestal – UFPR), 2000.

HEWLETT, J. D. **Principles of Forest hydrology.** University of Georgia Press. Athens: p.183, 1982.

HISCOCK, K.M.; LOVETT, A.A. BRAINARD, J.S.; PARFITT, J.P. **Groundwater vulnerability assessment: two case studies using GIS methodology.** Quaterly Journal of Engineering Geology, 28: 179-184, 1995

IAPAR - Instituto Agrônômico do Paraná. **Cartas climáticas do estado do Paraná 1994.** Londrina: IAPAR, 1994, p. 06.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, Caderno Estatístico - Município De São José Dos Pinhais, maio 2010. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/cadernos/Montapdf.php?Municipio=83000&btOk=ok>

JACOBS, G. A. **Dinâmica de uso e ocupação dos mananciais na Região Metropolitana de Curitiba-PR.** Curitiba, 2002. 255 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente Uma perspectiva em Recursos Terrestres,** São José dos Campos, Editora Parentese, 597p, 2009.

JORGE, F. N.; UEHARO, K. **Águas de Superfície.** In: Geologia aplicada a Engenharia. 2º ed. São Paulo: Grêmio Politécnico, 1979.

LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da paisagem com SIG.** 1.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 424 p., 2009.

LIMA, C. A. **Considerações sobre ocupações irregulares e parcelamento urbano em áreas de mananciais da região metropolitana de Curitiba-PR** Desenvolvimento e Meio Ambiente, n. 3, p. 97-114, jan./jun. Editora da UFPR, 2001.

LIMA, W.P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas.** Apostila didática, ESAUQ, 253p. Piracicaba, 2008.

LIMA, W. P., NICOLIELO, N. **Precipitação efetiva e interceptação em florestas de pinheiros tropicais e em reserva de cerrado**, IPEF, n.24, p.43-46, ago.1983

MATTOS, S.H.V.L. e PEREZ FILHO, A. **Complexidade e Estabilidade em sistemas geomorfológicos: uma introdução ao tema**. Revista Brasileira de geomorfologia, ano 5, nº1 p. 11-18, 2004.

MAACK, R, **Geografia Física do Paraná**. 2.ed. Rio de Janeiro: J.Olimpio, 450p., 1981.

MORAES, A.C. R. **Meio Ambiente e Ciências Humanas**.. São Paulo: HUCITEC, 100p., 1994.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara, 434p. 1988.

PINTO, N. L. S. *et al.* **Hidrologia Básica**. São Paulo, Edgard Blücher, 278p., 1976.

REBOUÇAS, A.C.; JUNIOR. B., E TUNDISI, J. G. **Água doce no Brasil**. Universidade de São Paulo. Instituto de Estudos Avançados, 2011.

REYES,C.D.R. **Análise das características hidrológicas de três sub-bacias do rio carapá (Canindeyú, Paraguai) em função das mudanças da cobertura vegetal em três diferentes épocas**. Curitiba, 2010. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná.

RIZZI, N.E. **Hidrologia Florestal e Manejo de Bacias Hidrográficas** (apostola didática em meio digital) 26 capítulos (4gb) disponível em [www.hidrologia.ufpr.br](http://www.hidrologia.ufpr.br), 2011.

ROCHA, A. L. **Caracterização ambiental, hidrogeológica e geoquímica dos depósitos aluvionares da Bacia Hidrográfica do rio Pequeno -Região Metropolitana de Curitiba -PR**. Curitiba, 1996. 157 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental), Universidade Federal do Paraná.

SANTOS, I. dos. *et al.* **Hidrometria aplicada**. Curitiba, Lactec, 2001.

SANTOS, A. F.; BERTOTTI, L. G. **Avaliação socioambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Pequeno, São José dos Pinhais (PR)**. *Âmbiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, v. 5, n. 2, p.275-292, 2009.

SANTOS, I.; KOBAYAMA, M.D. **Aplicação do TOPMODEL para zoneamento hidrológico da bacia do rio Pequeno, São José dos Pinhais – PR.** In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1., 2004, Florianópolis. Anais...Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. P. 188-202. (CD-ROM).

SILVA, T.C.; SILANS, A.P.; PEDROSA FILHO, L.A.; PAIVA, A.E.D.B.; BILLIB, M.; BOOCHS, P. Planejamento dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Gramame, uma bacia litorânea do nordeste brasileiro. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.7, n.2, 2002

SOARES, J.V. **Introdução a Hidrologia de Florestas** (apostola didática em meio digital) disponível em <http://www.dsr.inpe.br/dsr/viane/hidrologia/>, 2006.

TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. **Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: Revisão.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. [s.l.]: v.2, n. 1, p. 135-152, jan/jun. 1997

TUCCI, C.E.M. **Interceptação.** In: Hidrologia, Ciência e Aplicação. Tucci, C.E.M. 3.ed. Porto Alegre. Editora Universidade/ UFRGS: ABRH. 2002.

TUCCI, C.E.M. **Escoamento Superficial.** In: Hidrologia, Ciência e Aplicação. 3.ed. Porto Alegre. Editora Universidade/ UFRGS: ABRH. 2002.

TUCCI, C.E.M. **Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos.** Câmara Temática sobre Recursos Hídricos do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas. 2002. Disponível em: <http://www.iph.ufrgs.br/corpo docente/tucci/publicacoes/relclima.PDF>

TUCCI, C.E.E. **Escoamento Superficial.** In: Hidrologia: ciência e aplicação. 3ed., Primeira reimpressão. Porto Alegre: Editora Universidade UFRGS/ABRH, 2004.

VERACEL, R. **Manejo de Bacias Hidrográficas.** In. **Curso sobre biologia do solo na agricultura.** Anais EMBRAPA/CNPBS, Itaguaí, 41p. p 30-31, Rio de Janeiro, 1992.

VILELLA, S. M. e MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada.** São Paulo, McGraw-Hill, 1975.

WHITEHEAD, P. G.; ROBINSON, M. **Experimental basin studies: an international and historic perspective of forest impacts.** Journal of Hydrology, v. 145, p. 217-230, 1993.

**ANEXO I**

