

## 4. Material e Métodos

### 4.1 Caracterização da Bacia Hidrográfica de Estudo

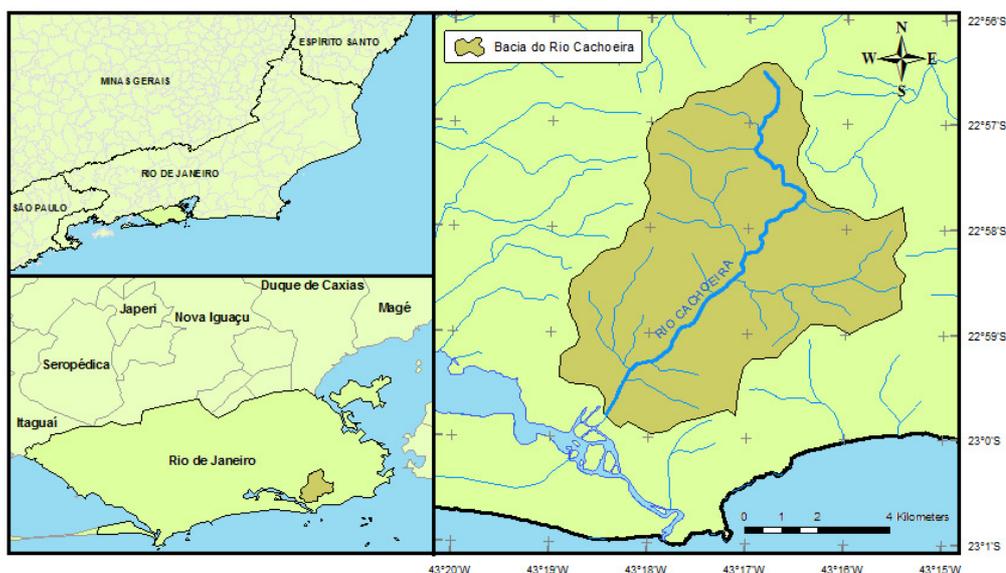
#### 4.1.1 Caracterização Fisiográfica

A bacia hidrográfica do rio Cachoeira se localiza na vertente sul do Maciço da Tijuca, município do Rio de Janeiro, entre os paralelos 22° 56' e 23° 00' de latitude sul e os meridianos 43° 15' e 43° 19' de longitude oeste.

A bacia tem forma triangular, abrangendo uma área de 21,7 km<sup>2</sup> e seu perímetro atinge aproximados 22,2 km. Aspectos gerais sobre geologia, pedologia e cobertura vegetal foram caracterizados por Coelho Netto (1979):

“A topografia é marcada por um relevo montanhoso onde sobressaem os pontões rochosos. Entre eles, destaca-se o pico da Tijuca (1.022 m), ponto central do Maciço da Tijuca, além do Pico do Papagaio (983 m), Pedra do Conde (821 m), Pedra do Elefante (863 m) e Pedra do Archer (800 m). [...]. O substrato rochoso, de idade pré-cambriana, é constituído predominantemente por gnaisses diversos e algumas intrusões de granitos. Em termos pedológicos, sobressai a ocorrência de grandes extensões de latossolos. [...]. A cobertura vegetal é formada por Mata Latifoliada Perene, onde se destaca a grande diversidade de espécies. Existem 3 estratos principais na mata (arbóreo, arbustivo e herbáceo), além da grande quantidade de epífitas, lianas (cipós) e escandentes (trepadeiras). As espécies encontram-se em estágio de recomposição florestal em função de diferentes usos submetidos ao solo até o fim do século XIX (1860).”

A Figura 4-1 a seguir ilustra a localização geográfica da bacia do rio Cachoeira na cidade do Rio de Janeiro.

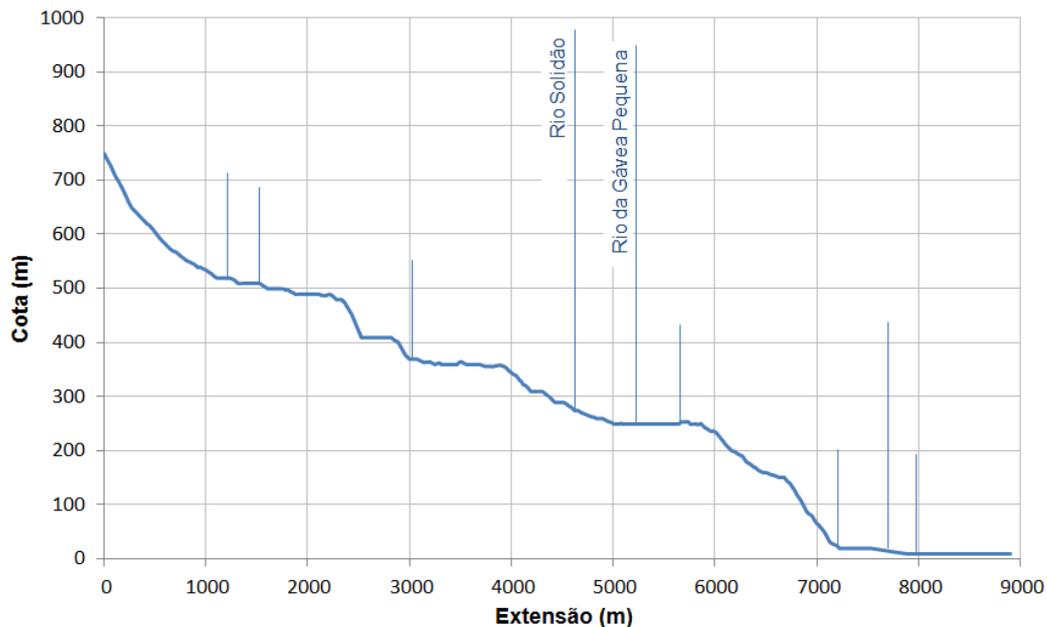


**Figura 4-1** – Mapa de Localização da Bacia do Rio Cachoeira

Fonte: Elaboração própria.

O rio Cachoeira possui um percurso de aproximados 8,9 km de extensão, desaguando na Lagoa da Tijuca, em frente à Ilha da Gigóia. Como principais afluentes destacam-se pela margem direita o rio Solidão e pela margem esquerda o rio da Gávea Pequena.

A Figura 4-2 apresenta o perfil longitudinal do rio Cachoeira, indicando os locais onde ele recebe seus afluentes.



**Figura 4-2** – Perfil Longitudinal do Rio Cachoeira

Fonte: Elaboração própria.

A partir das dimensões características da bacia hidrográfica do rio Cachoeira foram calculados alguns índices fluviomorfológicos. Esses índices constam apresentados na Tabela 4-1 a seguir.

**Tabela 4-1** – Índices Fluviomorfológicos da Bacia do Rio Cachoeira

Índices Fluviomorfológicos	Valores Obtidos
Área de Drenagem	21,7 km <sup>2</sup>
Perímetro	22,2 km
Comprimento	8,9 km
Desnível Médio	740 m
Índice de Compacidade	1,33
Índice de Conformação	0,27
Densidade de Drenagem	1,5 m/m <sup>2</sup>
Declividade Média	8,3 %

#### 4.1.2 Caracterização Climatológica

O clima predominante na região da bacia do rio Cachoeira, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, é Tropical, quente (média maior que 18°C em todos os meses) e superúmido com subseca no inverno. Os principais parâmetros climatológicos, que interferem na caracterização do clima na região, são apresentados na sequência, tomando por base os valores registrados na estação climatológica da cidade do Rio de Janeiro, extraídos da publicação Normais Climatológicas – 1961/1990 (INMET, 1992).

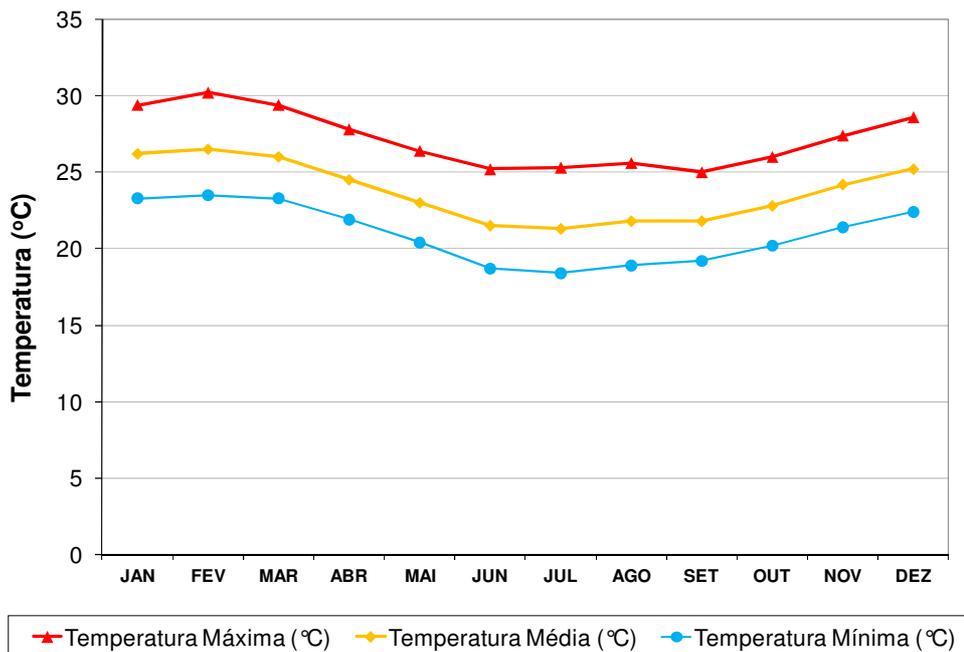
As temperaturas médias anuais da região oscilam entre 26,5°C e 21,3°C. Os meses mais frios são junho e julho, quando a temperatura média destes atinge 21,4°C e, os meses mais quentes são janeiro e fevereiro, época de maior insolação na região quando a temperatura média destes atinge os 26,4°C. A umidade relativa média mensal é de 79%, variando entre o mínimo de 77% e o máximo de 80%. A evaporação total anual é de 1198,5 mm, variando entre o mínimo de 84,2 mm em junho e o máximo de 111,8 mm em janeiro.

As médias climatológicas mensais para a região são apresentadas resumidamente na Tabela 4-2. As Figuras 4-3 e 4-4 ilustram graficamente esses valores.

**Tabela 4-2** – Características Climatológicas da Região – Temperaturas, Evaporação e Umidade (1961 a 1990)

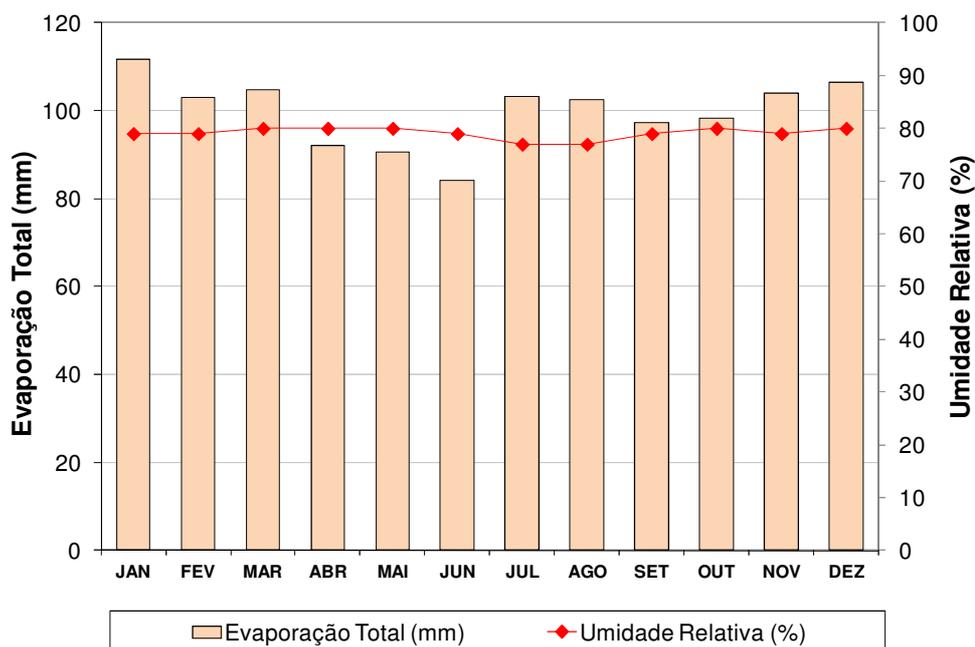
Mês	Temperatura Média (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Evaporação Total (mm)	Umidade Relativa (%)
<b>Jan</b>	26,2	23,3	29,4	111,8	79
<b>Fev</b>	26,5	23,5	30,2	103,0	79
<b>Mar</b>	26,0	23,3	29,4	104,8	80
<b>Abr</b>	24,5	21,9	27,8	92,2	80
<b>Mai</b>	23,0	20,4	26,4	90,6	80
<b>Jun</b>	21,5	18,7	25,2	84,2	79
<b>Jul</b>	21,3	18,4	25,3	103,2	77
<b>Ago</b>	21,8	18,9	25,6	102,6	77
<b>Set</b>	21,8	19,2	25,0	97,4	79
<b>Out</b>	22,8	20,2	26,0	98,2	80
<b>Nov</b>	24,2	21,4	27,4	104,0	79
<b>Dez</b>	25,2	22,4	28,6	106,5	80
<b>Anual</b>	<b>23,7</b>	<b>21,0</b>	<b>27,2</b>	<b>1198,5</b>	<b>79</b>

Fonte: Normais Climatológicas – 1961/1990 (INMET, 1992)



**Figura 4-3** – Características Climatológicas da Região – Temperaturas (1961 a 1990)

Fonte: Elaborado a partir das Normais Climatológicas – 1961/1990 (INMET, 1992)



**Figura 4-4** – Características Climatológicas da Região – Evaporação e Umidade (1961 a 1990)

Fonte: Elaborado a partir das Normais Climatológicas – 1961/1990 (INMET, 1992)

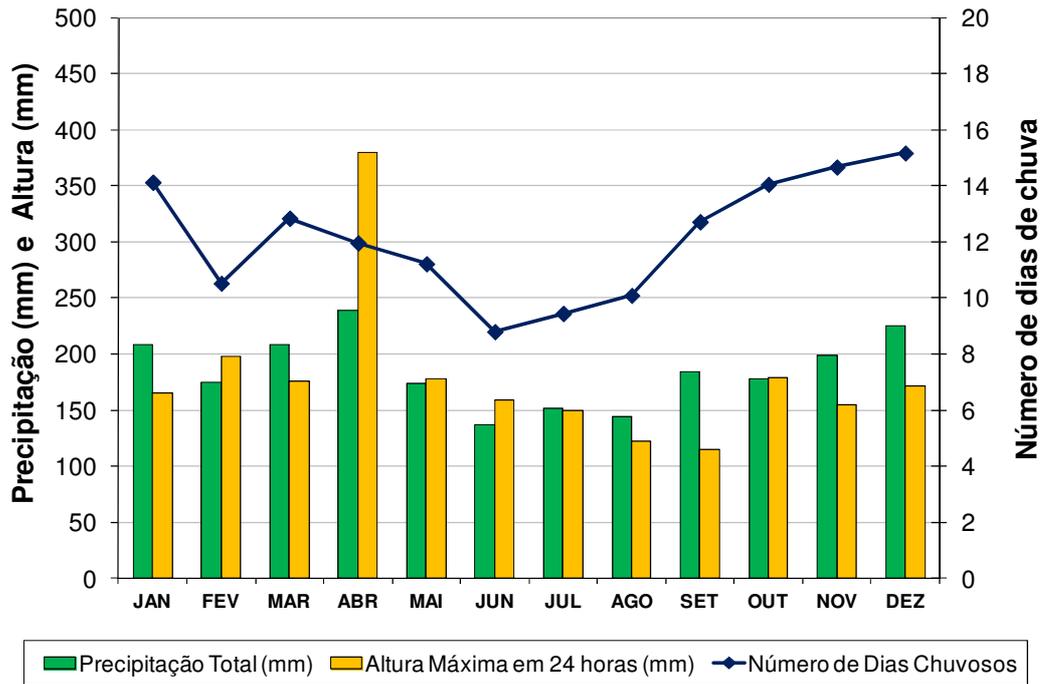
Para determinação das características pluviométricas da bacia do rio Cachoeira, foi considerada como referência a estação pluviométrica Capela Mayrink (código: 2243239), a qual se encontra instalada dentro da bacia hidrográfica do rio Cachoeira. Sua série histórica de totais diários de precipitação disponível se encontra compreendida entre os anos de 1976 e 2010. Essa estação apresenta 2230 mm de precipitação total anual, com médias mensais variando entre 137 mm, em junho, e 239 mm, em abril. A altura máxima de chuva registrada em 24 horas foi de 380 mm, ocorrida em 07/04/2010, e o número médio de dias chuvosos no ano foi de 146 dias.

As principais características pluviométricas mensais para a bacia do rio Cachoeira são apresentadas resumidamente na Tabela 4-3. A Figura 4-5 ilustra graficamente esses valores.

**Tabela 4-3** – Características Pluviométricas da Bacia do Rio Cachoeira (1976 a 2010)

<b>Mês</b>	<b>Precipitação Total (mm)</b>	<b>Altura Máxima em 24 horas (mm)</b>	<b>Número de Dias Chuvosos</b>
<b>Jan</b>	208	165	14
<b>Fev</b>	175	198	11
<b>Mar</b>	208	176	13
<b>Abr</b>	239	380	12
<b>Mai</b>	173	178	11
<b>Jun</b>	137	159	9
<b>Jul</b>	151	149	9
<b>Ago</b>	144	123	10
<b>Set</b>	184	115	13
<b>Out</b>	178	179	14
<b>Nov</b>	199	155	15
<b>Dez</b>	226	172	15
<b>Anual</b>	<b>2230</b>	<b>380</b>	<b>146</b>

Fonte: Elaborado a partir dos dados da estação pluviométrica de referência Capela Mayrink (código: 2243239)



**Figura 4-5** – Características Pluviométricas da Bacia do Rio Cachoeira (1976 a 2010)

Fonte: Elaborado a partir dos dados da estação pluviométrica Capela Mayrink

## 4.2 Seleção da Base de Dados

### 4.2.1 Seleção de Dados Geográficos

Para elaboração do Sistema de Informação Geográfica (SIG) para a bacia do rio Cachoeira, optou-se pelo software ArcGIS na sua versão 9.3, utilizando a combinação dos modelos vetorial e matricial. O ArcGIS é uma solução de SIG desenvolvido pela Environmental Systems Research Institute (ESRI) em Redlands, Califórnia - EUA.

O principal formato de arquivo de modelo vetorial utilizado no presente estudo foi o *Shapefile*. Este formato armazena informações de acordo com a geometria das entidades, ponto, linha ou polígono (ESRI, 1998). Já para o modelo matricial foram utilizados arquivos do tipo *GeoTIFF*, que inclui no próprio arquivo informações de georreferenciamento e geocodificação de imagens (CPRM, 2002).

A abordagem inicial no SIG visou a identificação e reconhecimento da região em estudo, sendo construído basicamente a partir dos dados geográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e do Instituto Municipal

de Urbanismo Pereira Passos – IPP-Rio, que mantém parceria com o Laboratório de Geoprocessamento (LabGis) da PUC-Rio.

O plano de informação com a localização geográfica das estações hidrometeorológicas do Rio de Janeiro foi produzido a partir das coordenadas das estações, de acordo com o inventário de estações da Agência Nacional de Águas - ANA.

O Modelo Digital do Terreno (MDT) do Estado Rio de Janeiro foi obtido a partir dos dados do radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) disponibilizado na rede mundial de computadores pelo Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A equipe técnica desse laboratório processou e organizou os dados do radar SRTM por estados brasileiros, de modo que as falhas existentes nos dados originais fossem corrigidas.

Os dados geográficos selecionados para construção do SIG estão descritos na tabela 4-4, a seguir.

**Tabela 4-4** – Dados Geográficos Selecionados

<b>Dados Geográficos</b>	<b>Tipo do Modelo</b>	<b>Fonte</b>
Unidades Federativas do Brasil	Vetorial	IBGE
Municípios do Brasil	Vetorial	IBGE
Subacias Hidrográficas do Rio de Janeiro	Vetorial	IPP
Hidrografia do Rio de Janeiro	Vetorial	IPP
Estações Hidrometeorológicas	Vetorial	Produzido
Modelo Digital do Terreno	Matricial	SRTM

#### **4.2.2 Seleção de Dados Hidrometeorológicos**

O Brasil dispõe de uma rede hidrometeorológica com aproximadamente 11.000 estações hidrometeorológicas (fluviométricas, pluviométricas e climatológicas), sendo operadas por diversas entidades como órgãos federais, setoriais, estaduais e particulares. Desse total, cerca de 4.200 estações representam a rede básica nacional em operação (CPRM, 2012). No Rio de Janeiro as estações, em sua maioria, são administradas por órgãos públicos.

Para avaliar o comportamento hidrológico da bacia do rio Cachoeira foram selecionadas nove estações hidrometeorológicas como representativas da região. A Tabela 4-5, 4-6 e 4-7 apresentam essas estações, fornecendo para cada uma seu código, a localização e o órgão responsável.

**Tabela 4-5** – Estações Fluviométricas Selecionadas

Nome	Código	Latitude	Longitude	Responsável
Capela Mayrink	59305071	-22°57'28"	-43°16'40"	INEA
Itanhangá	59305072	-22°59'12"	-43°18'05"	INEA

**Tabela 4-6** – Estações Pluviométricas Selecionadas

Nome	Código	Latitude	Longitude	Responsável
Alto da Boa Vista	2243149	-22°57'57"	-43°16'42"	INMET
Benfica	2243092	-22°53'17"	-43°14'56"	INEA
Capela Mayrink	2243239	-22°57'28"	-43°16'40"	INEA
Eletrobrás	2243083	-22°55'18"	-43°25'12"	INEA
Rio Centro	-	-22°57'25"	-43°24'42"	GEORIO
Via 11	2343007	-23°00'00"	-43°21'59"	INEA

**Tabela 4-7** – Estação Climatológica Selecionada

Nome	Código	Latitude	Longitude	Responsável
Rio de Janeiro	83743	-22°52'48"	-43°10'51"	INMET

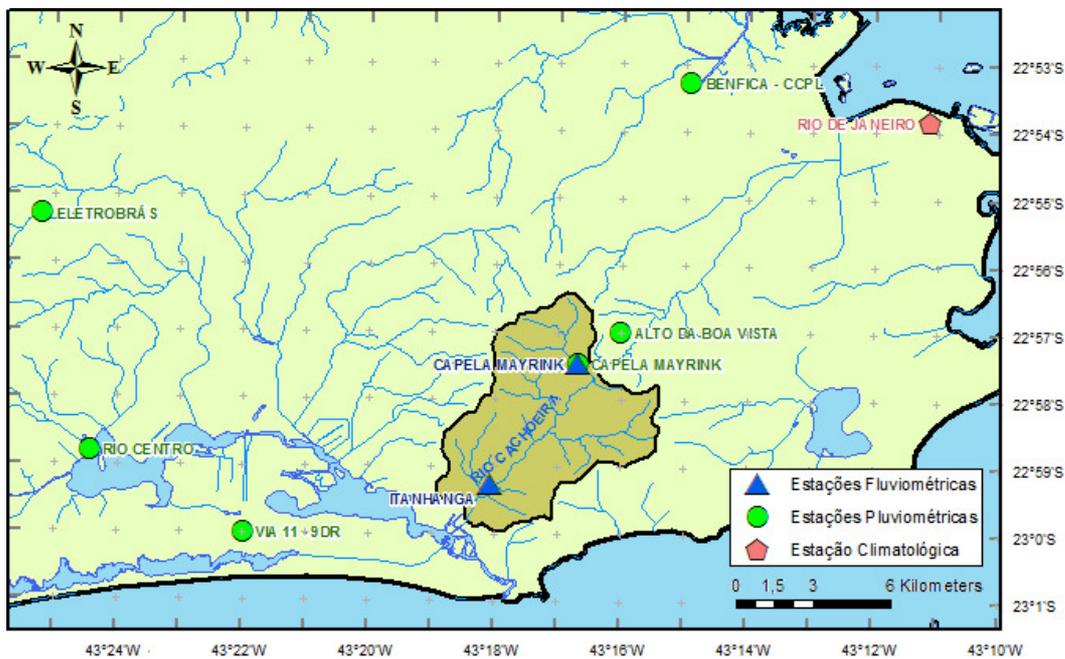
Ambas as estações fluviométricas selecionadas se situam dentro da bacia hidrográfica do rio Cachoeira, dispondo de registros de leituras de níveis d'água e de medições de vazões. Esses registros foram solicitados junto ao Instituto Estadual de Ambiente – INEA, órgão responsável pela administração dessas estações.

Dentre as estações pluviométricas selecionadas destacam-se, tanto pela localização quanto pela disponibilidade de dados, as estações Capela Mayrink e Alto da Boa Vista. A primeira é a única estação localizada dentro da bacia hidrográfica do rio Cachoeira, e a segunda, além de pluviométrica é também

meteorológica, com dados disponíveis de temperatura média do ar. Os dados pluviométricos foram obtidos através de consulta ao sistema de informações hidrológicas da ANA, o Hidroweb. Além dessa fonte de informação foi consultado o Sistema Alerta Rio, operado pelo Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro – GEORIO, que disponibiliza dados pluviométricos e meteorológicos.

Em complementação aos dados de temperatura média do ar registrados na estação Alto da Boa Vista, foram utilizados como referência os dados da estação climatológica Rio de Janeiro, localizada no bairro Saúde. Seus dados históricos foram obtidos através do sistema de Monitoramento Agrometeorológico – Agritempo.

A Figura 4-6 ilustra a localização das estações hidrometeorológicas selecionadas, enquanto as Tabelas 4-8, 4-9 e 4-10 apresentam a situação da disponibilidade dos dados fluviométricos, pluviométricos e climatológicos, respectivamente. Através da situação da disponibilidade de dados constata-se uma carência geral de dados na bacia estudada.



**Figura 4-6 – Localização das Estações Hidrometeorológicas**

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4-8 – Disponibilidade de Dados Fluviométricos

## Legenda:

- período de observação conforme Inventário de Estações  
x período completo de dados de leitura de régua  
x período incompleto de dados de leitura de régua  
o período com medições de descarga  
o Período com curva-chave válida

Nome	Código	Tipo de Dado	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Capela Mayrink	59305071	Leitura de Régua										x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Medição de Desc.																						
Itanhangá	59305072	Leitura de Régua		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
		Medição de Desc.																						

Nome	Código	Tipo de Dado	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Capela Mayrink	59305071	Leitura de Régua	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		Medição de Desc.																						
Itanhangá	59305072	Leitura de Régua																						
		Medição de Desc.																						

Tabela 4-9 – Disponibilidade de Dados Pluviométricos

## Legenda:

- período de observação conforme Inventário de Estações  
x período completo de dados de precipitação  
x período incompleto de dados de precipitação

Nome	Código	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Capela Mayrink	2243239									x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Alto da Boa Vista	2243149								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Benfica	2243092					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Via 11	2343007					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Eletronbras	2243083					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rio Centro	-																						

Nome	Código	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Capela Mayrink	2243239	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Alto da Boa Vista	2243149	x	x	x	x	x	x	x	x	x													
Benfica	2243092	x	x	x	x	x																	
Via 11	2343007	x	x	x	x	x																	
Eletronbras	2243083	x	x	x	x	x																	
Rio Centro	-								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 4-10 – Disponibilidade de Dados Climatológicos

## Legenda:

- período de observação conforme Inventário de Estações  
x período completo de dados de temperatura média do ar  
x período incompleto de dados de temperatura média do ar

Nome	Código	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Alto da Boa Vista	2243149			x		x				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Rio de Janeiro	83743														x	x	x	x	x	x	x	x	x

### 4.2.3 Seleção de Dados de Satélite

Os dados de satélite também foram obtidos em formato *GeoTIFF*, através do catálogo de imagens da Divisão de Geração de Imagens – DGI do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

Foram escolhidas dez imagens no catálogo do satélite Landsat-5, sendo todas do sensor TM e dotadas das sete bandas (Tabela 3-2). As imagens que abrangem a região da bacia do rio Cachoeira pertencem ao conjunto órbita/ponto 217/76. A seleção das imagens foi baseada em um histórico de 22 anos com espaçamento temporal médio a cada 2 anos. De acordo com a disponibilidade no catálogo e a análise visual de cada imagem, foram selecionadas as imagens que apresentaram maior nitidez e pouca cobertura de nuvens.

As imagens selecionadas foram as datadas de 22/03/1988, 24/02/1990, 14/02/1992, 18/01/1994, 24/01/1996, 02/11/2000, 31/12/2004, 31/08/2006, 23/10/2008 e 15/02/2010. Mesmo que o período comum dos dados hidrológicos possua uma extensão menor do que o histórico das imagens de satélite, optou-se em manter essa seleção buscando-se uma melhor compreensão da dinâmica da cobertura vegetal da bacia.

Das bandas óticas disponíveis nas imagens, foram selecionadas para formar a composição colorida as bandas 5, 4, 3, em R, G, B (do inglês: Red, Green, Blue) respectivamente. Conforme caracterizado na Tabela 3-3, a cor verde (G), associada às características da banda 4, representa a maior reflectância da vegetação, pois reflete muita energia nesta banda. O segundo maior índice de energia refletida, a banda 5, foi associada ao vermelho (R), assim o solo é indicado na composição em cores vermelhas. A cor azul (B) foi associada à banda 3, que permite bom contraste entre áreas ocupadas por vegetação e aquelas sem vegetação (solo exposto, estradas e áreas urbanas). A mistura dessas últimas duas cores resulta na cor roxa. Com isso, dependendo da cobertura do solo (exposto ou áreas urbana), na imagem aparecem tons de roxos mais fortes ou mais fracos.

## 4.3 Tratamento da Base de Dados

### 4.3.1 Tratamento dos Dados Geográficos

O Sistema de Informações Geográficas elaborado para a bacia do rio Cachoeira foi desenvolvido no sentido da obtenção de planos de informação para a determinação das áreas de drenagem dos pontos de interesse e no sentido da integração de imagens digitais do satélite Landsat-5/TM.

Para a realização do geoprocessamento no Modelo Digital do Terreno da bacia utilizou-se o ferramental disponível na extensão *Spatial Analyst Tool* do ArcGIS 9.3 (ESRI). Dentre as funções presentes nessa extensão destaca-se o conjunto *Hydrology*, com funções específicas para caracterizar o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas.

Conforme citado anteriormente, o Modelo Digital do Terreno utilizado no estudo foi obtido a partir dos dados do radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). De acordo com Lemos et al. (2004) apesar dessa missão topográfica ter sido executada na resolução espacial de 30 metros, a disponibilização global dos dados da América do Sul consta na resolução espacial de 90 m.

Baseado nesse fato, o pré-processamento do Modelo Digital consistiu primeiramente na reamostragem de seus dados para a resolução espacial de 30 metros. Cabe ressaltar que a interpolação aqui realizada não regenerou os dados registrados com a resolução original da missão SRTM, mas apenas suavizou o modelo.

Em seguida, buscou-se garantir que o Modelo Digital do Terreno estivesse hidrológicamente consistente, ou seja, livre de depressões. Uma depressão no modelo matricial é representada por uma célula que possui valor de altitude menor do que suas vizinhas, o que impossibilita a saída do escoamento ao passar nessa célula (Tarboton, 1997).

Com o Modelo Digital do Terreno em resolução compatível e hidrológicamente consistente, foram realizados processamentos que se fazem necessários até a obtenção da rede de drenagem.

Estes processamentos envolveram a geração de planos de informação que permitiram caracterizar o escoamento superficial quanto à direção dos fluxos e ao fluxo acumulado na bacia hidrográfica. Através desses planos foi possível

se obter a rede de drenagem, o que deu origem ao mapa da bacia hidrográfica e a delimitação de forma automática das áreas de drenagem nos pontos de interesse (seções das estações fluviométricas e seção exutória). A Figura 4-7 ilustra a sequência dos planos de informação gerados para uma região definida no entorno da bacia hidrográfica do rio Cachoeira.

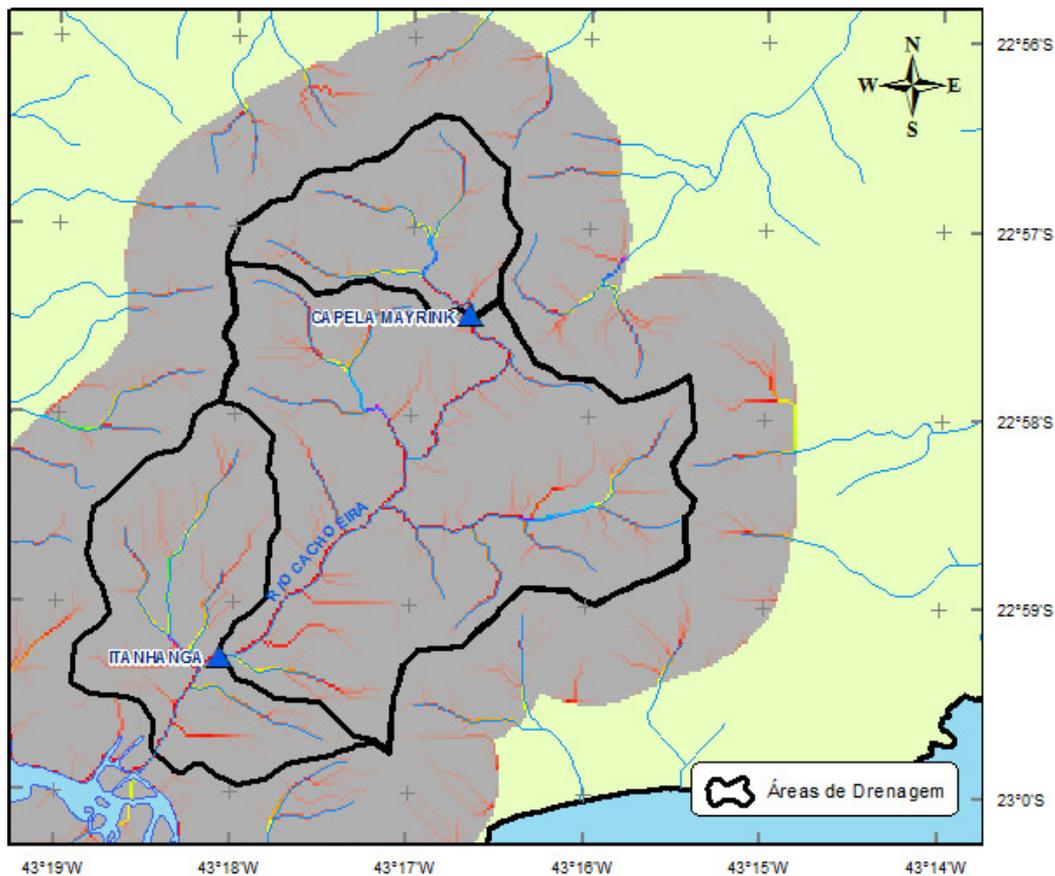


**Figura 4-7** – Sequência de criação dos planos de informação

A localização do ponto exutório da bacia foi feita com auxílio do plano de informação de escoamento acumulado, que apresenta as linhas de fluxos preferenciais na bacia hidrográfica. Além da delimitação automática das áreas de drenagem, o plano de escoamento acumulado também proporcionou a aferição da rede de drenagem informada pelo IPP-Rio no plano “Hidrografia do Rio de Janeiro”, a qual para um pequeno trecho da bacia do rio Cachoeira encontrava-se incompleta.

A delimitação das áreas de drenagem associadas às estações fluviométricas foi realizada com o intuito de aferir as áreas informadas no inventário de estações da ANA. Foram utilizadas no estudo as áreas de drenagem calculadas por geoprocessamento, considerando-se que os erros relativos são minimizados ao se utilizar uma mesma base geográfica.

A Figura 4-8 apresenta a delimitação das áreas de drenagem nos locais de interesse sobre o plano de informação de escoamento acumulado, enquanto a Tabela 4-11 apresenta os valores dessas áreas calculadas.



**Figura 4-8** – Delimitação das Áreas de Drenagem dos Locais de Interesse

**Tabela 4-11** – Áreas de Drenagem Calculadas nos Locais de Interesse

Local	Área de Drenagem Inventário de Estações	Área de Drenagem Presente Estudo
Estação Capela Mayrink	2,2 km <sup>2</sup>	3,3 km <sup>2</sup>
Estação Itanhangá	16,1 km <sup>2</sup>	16,4 km <sup>2</sup>
Foz do Rio Cachoeira	-	21,7 km <sup>2</sup>

### 4.3.2 Tratamento dos Dados Hidrometeorológicos

Os dados hidrológicos são coletados nas estações por meio de observações ou medições. Durante o procedimento da coleta, podem surgir erros do tipo sistemáticos, grosseiros ou aleatórios, fazendo com que os dados obtidos neste instante não sejam representativos (Naghetini e Pinto, 2007). Além de erros de coleta, ao longo da operação das estações podem ocorrer períodos com indisponibilidade de dados, seja por problemas com os aparelhos de medição ou ausência do observador responsável.

Em função da relevância dos dados hidrológicos, foram realizadas análises de consistência dos dados pluviométricos, fluviométricos e meteorológicos, de modo que a base de dados utilizada esteja o mais isenta possível de erros e falhas.

Com o intuito de se comprovar as tendências observadas nas séries hidrológicas resultantes foi aplicado o teste de hipótese de Mann-Kendall. A escolha desse teste não-paramétrico foi baseada no fato de que a maioria das séries históricas de dados hidrológicos não segue uma distribuição normal (TREND, 2005).

#### **4.3.2.1 Dados Pluviométricos**

Os dados pluviométricos foram tratados com o intuito de se obter uma base de dados consistente para o período disponível de 1976 a 2010, fornecendo informações para garantir a consistência da série pluviométrica da estação Capela Mayrink, utilizada como referência da precipitação média na bacia do rio Cachoeira. Conforme comentado anteriormente, esta série de precipitações será utilizada como referência no cálculo do balanço hídrico pelo método de Thornthwaite e Mather.

A análise preliminar dos dados pluviométricos foi feita de forma visual. A partir da plotagem conjunta das séries de precipitações totais mensais das estações, é possível detectar a ocorrência de erros grosseiros nas observações. Em nenhuma das seis estações analisadas foram identificados valores passíveis de correção.

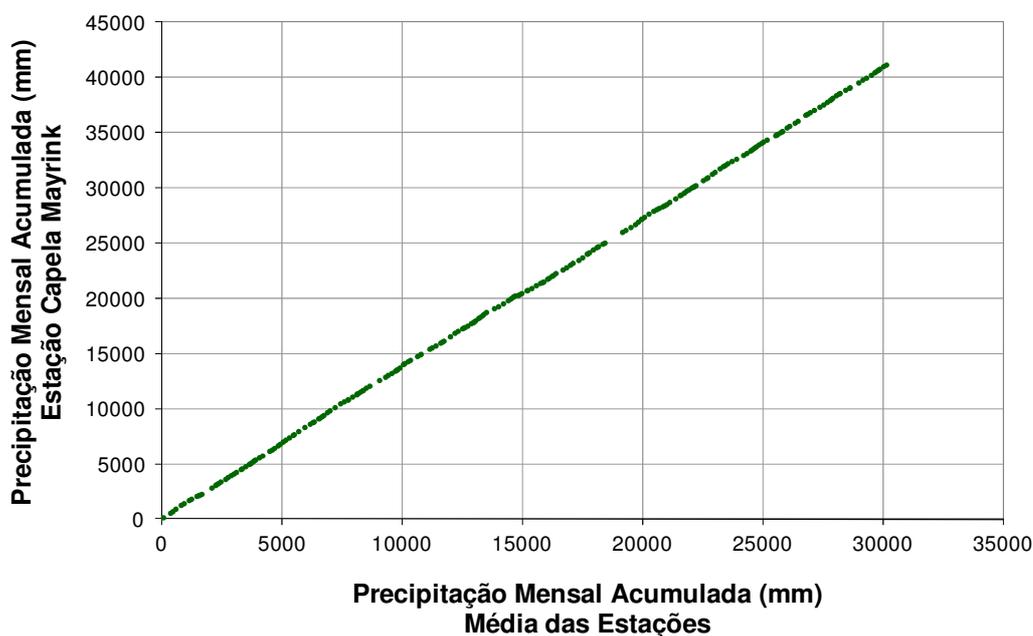
Após a análise preliminar dos dados, buscou-se preencher as falhas apresentadas. Para realizar o preenchimento foram avaliadas as correlações cruzadas entre os dados de precipitação total mensal das estações pluviométricas selecionadas. Para definir os ajustes das equações de correlação utilizou-se o método de regressão linear com constante igual a zero. A escolha de qual estação seria utilizada para preenchimento de outra foi dada pelo maior coeficiente de determinação obtido pelo ajuste linear.

Após os preenchimentos de falhas, a consistência das séries foi analisada do ponto de vista regional, ou seja, foi verificada a homogeneidade do comportamento da precipitação na região. Para isso, utilizou-se o Método da Dupla-Massa, cuja principal finalidade é identificar se ocorreram desvios no

comportamento da precipitação ao longo do tempo, ou mesmo no local de observação (Collischonn e Tassi, 2011).

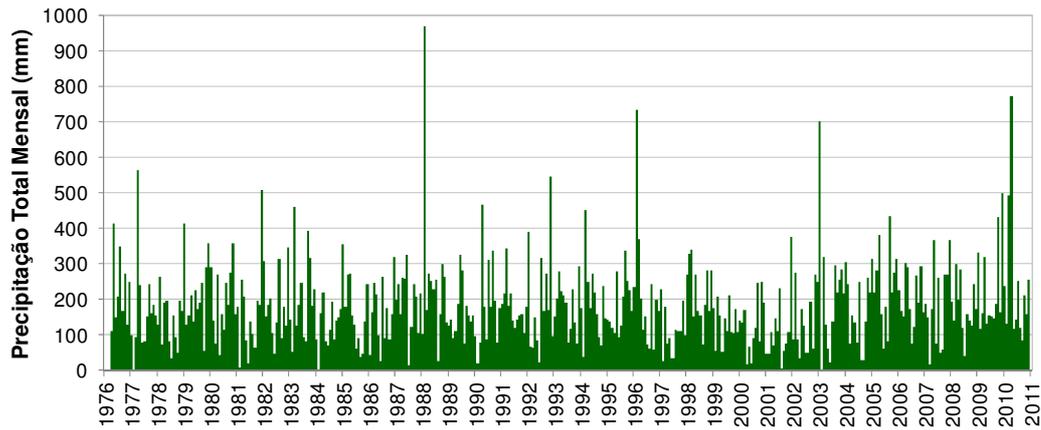
Para a análise da dupla-massa foi identificado o período comum de dados entre as estações da região que apresentasse o menor índice de preenchimentos, sendo este de abril/1976 a dezembro/1994. A estação Rio Centro ficou fora desta análise, pois seus dados disponíveis tem início a partir de janeiro/1997.

Em seguida foram elaborados gráficos para cada estação, sendo plotada a série dos totais mensais acumulados contra a série das médias acumuladas das estações no entorno. As cinco curvas duplo-acumulativas apresentaram tendências retas, o que indica que não houve desvio no comportamento dos dados de precipitação em nenhuma das estações, confirmando suas consistências. A Figura 4-9 apresenta a curva duplo-acumulativa obtida para a estação pluviométrica de referência Capela Mayrink. As demais curvas constam apresentadas no Apêndice A.



**Figura 4-9** – Curva Duplo-acumulativa da Estação Pluviométrica Capela Mayrink

Como resultado da análise de consistência da estação Capela Mayrink, obteve-se para a bacia do rio Cachoeira uma série pluviométrica de totais mensais consistentes e sem falhas. Essa série encontra-se ilustrada na Figura 4-10, onde as barras verdes representam a precipitação total de cada mês. Os valores dessa série mensal constam apresentados no Apêndice B.



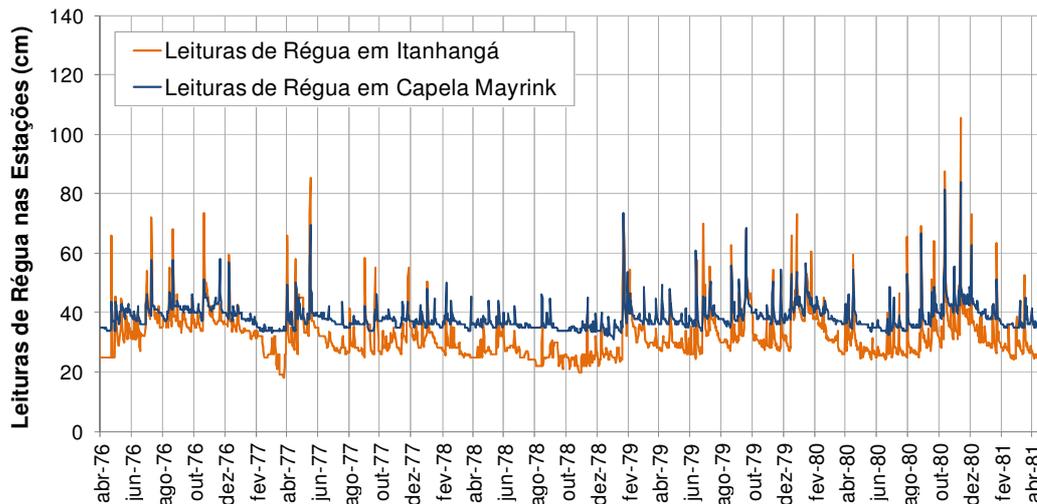
**Figura 4-10 – Precipitação Total Mensal na Bacia do Rio Cachoeira**

### 4.3.2.2 Dados Fluviométricos

Os dados fluviométricos foram tratados com o intuito de se obter uma série de dados o mais consistente possível na seção exutória da bacia, para o período de 1976 a 2010, a fim de ser utilizada como referência na caracterização de seu comportamento hidrológico.

A análise inicial de consistência dos dados fluviométricos foi realizada de forma visual a partir da plotagem conjunta das leituras de régua médias diárias das estações Itanhangá e Capela Mayrink. Essas leituras médias resultam das leituras realizadas as 7 e às 17 horas na régua linimétrica das estações.

Ambas as estações se encontram instaladas no rio Cachoeira, porém dispõem de um período comum de dados durante cinco anos, de abril/1976 a abril/1981. A análise deste período comum permitiu identificar semelhanças na forma dos cotogramas. Na Figura 4-11 observar-se as semelhanças existentes nas leituras de régua entre as estações, para o período comum observado entre abril/1976 e abril/1981.



**Figura 4-11** – Comparação entre as leituras de régua médias diárias das estações

Não foi realizada nenhuma correção na série de leituras de régua da estação Capela Mayrink, visto que não foram identificados indícios de erros grosseiros de observação. Já na série da estação Itanhangá, julgou-se que dez leituras de régua tiveram suas observações registradas erroneamente. Exemplo desse fato ocorreu no dia 01/03/1980, onde foi registrado um pico na leitura da régua que atingiu 182 cm, o que não é coerente com as leituras observadas nos dias anterior e posterior a esta data (ambas em 31 cm) nem com as leituras na estação Capela Mayrink. Assim, as leituras de régua com fortes indícios de terem sido registradas erroneamente tiveram seus valores consistidos por interpolação.

Em seguida foi analisada a consistência das medições de descarga. Esta foi realizada de forma gráfica, através das plotagens leitura de régua x vazão, leitura de régua x área e leitura de régua x velocidade. A partir desses gráficos foram desprezadas as medições de descarga cujos pontos se apresentaram fora da tendência aferida.

A relação entre a descarga medida e a leitura da régua no local da estação fluviométrica, se dá em função de características geométricas e hidráulicas da seção de escoamento. O ajuste de uma curva que represente esta relação é denominado curva-chave (Jacon e Cudo, 1989).

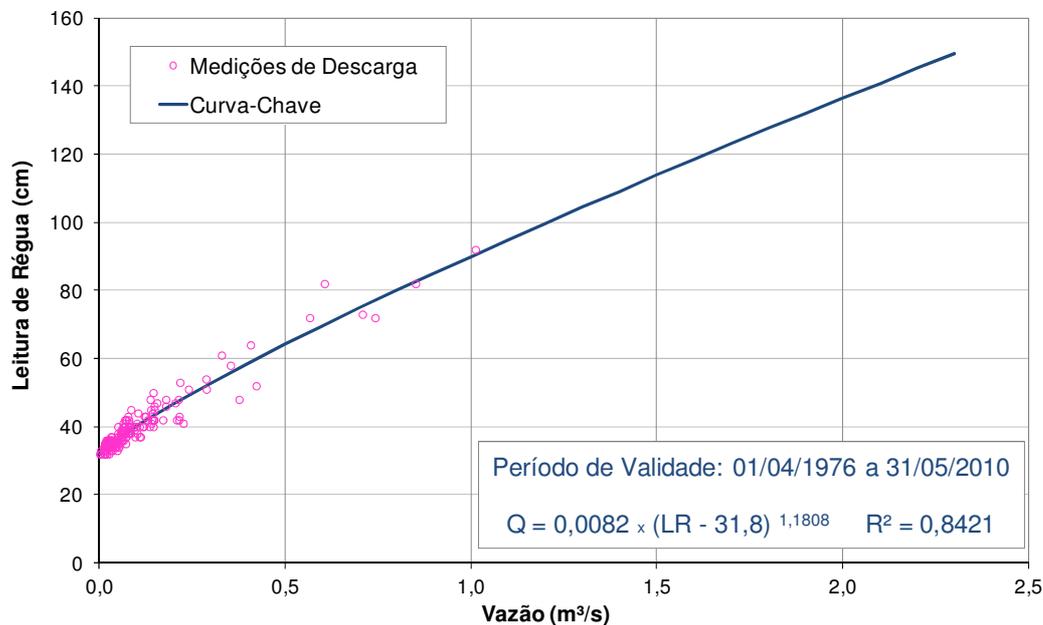
Baseado nas medições de descarga consistidas para cada estação realizou-se o ajuste das curvas-chave através de equações potenciais do tipo:

$$Q = m \times (LR - h_0)^n$$

Onde  $Q$  é a vazão, em  $m^3/s$ ;  $m$  e  $n$  são parâmetros determinados para o local;  $LR$  é a leitura de régua correspondente ao nível para a vazão  $Q$ ; e  $h_0$  é a leitura de régua correspondente ao nível do zero da régua.

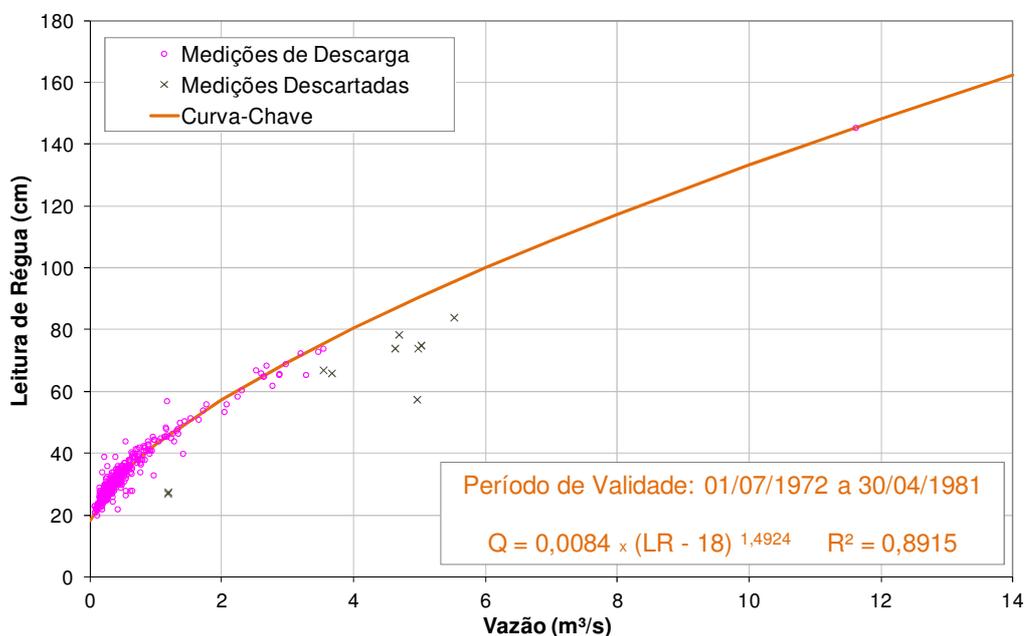
Os critérios utilizados na definição do período de validade de cada curva-chave foram as datas de início e fim de operação das estações.

Para a definição da curva-chave na estação Capela Mayrink utilizou-se todo o período operativo da estação, 01/04/1976 a 31/05/2010. Foram consideradas no ajuste 215 medições de descarga, para intervalos de níveis d'água observados desde 32 cm até 92 cm. Como as leituras de régua para o período de validade abrangem valores entre 26 cm e 144,5 cm, procedeu-se à extrapolação da curva-chave para cobrir estes valores. A figura 4.12 a seguir apresenta a curva-chave estabelecida para a estação Capela Mayrink.



**Figura 4-12** – Curva-chave do Rio Cachoeira na Estação Capela Mayrink

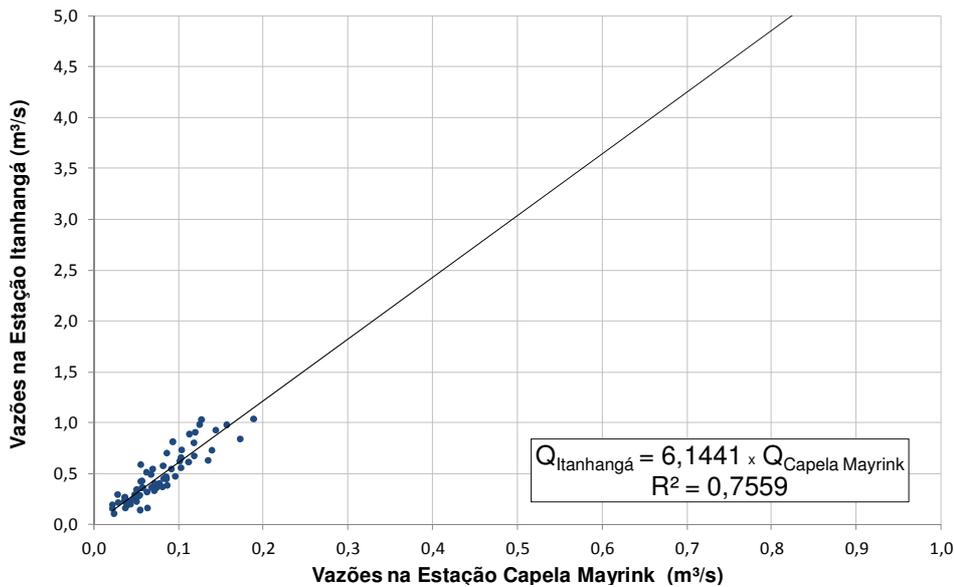
Para a definição da curva-chave na estação Itanhangá utilizou-se apenas o período de 01/07/1972 a 30/04/1981. Optou-se em não incluir na análise o período de dados de 06/07/1969 a 30/06/1972, visto que este apresenta uma evidente mudança de tendência na relação leitura de régua x vazão que não seria representativa ao estudo. Foram consideradas no ajuste 506 medições de descarga, para intervalos de níveis d'água observados desde 20 cm até 146 cm. Como as leituras de régua para o período de validade definido abrangem valores entre 12 cm e 182 cm, procedeu-se à extrapolação da curva-chave para cobrir estes valores. A figura 4.13 a seguir apresenta a curva-chave estabelecida para a estação Itanhangá.



**Figura 4-13** – Curva-chave do Rio Cachoeira na Estação Itanhangá

Após as análises de consistência realizadas, os dados de leituras de régua das estações foram transformados em dados de vazões através das curvas-chave apresentadas.

A metodologia para gerar uma série de vazões médias mensais na seção exutória da bacia do rio Cachoeira consistiu primeiramente na extensão da série de vazões da estação Itanhangá, através de correlação mensal com a série de vazões da estação Capela Mayrink. Posteriormente, a série estendida de vazões da estação Itanhangá foi transferida para o local da exutória da bacia por proporcionalidade entre áreas de drenagem. A equação de correlação mensal entre as estações Capela Mayrink e Itanhangá, ajustada para o período de abril/1976 a abril/1981, é mostrada na figura 4-14 a seguir.

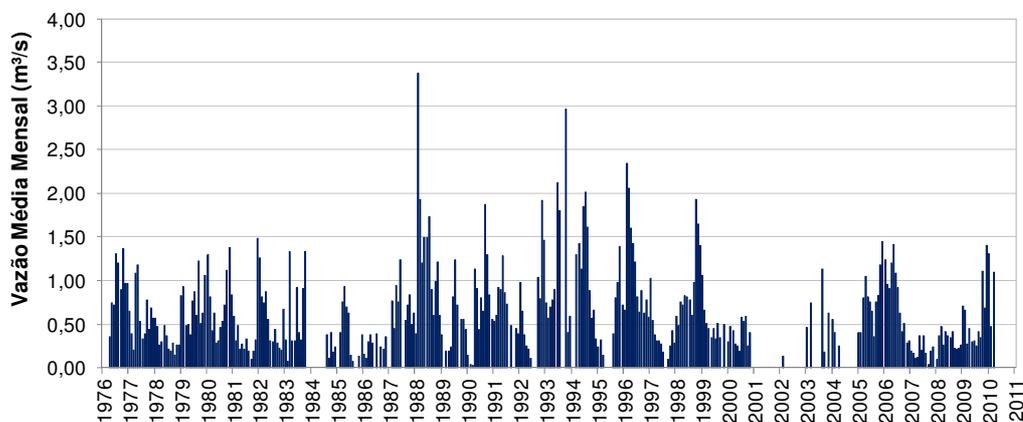


**Figura 4-14** – Correlação de Vazões Médias Mensais entre as Estações Capela Mayrink e Itanhangá (abril/1976 a abril/1981)

A transferência das vazões da estação Itanhangá para o local da exutória da bacia, por proporcionalidade entre áreas de drenagem, se deu através da seguinte equação:

$$Q_{\text{Bacia Rio Cachoeira}} = \frac{21,7}{16,4} \times Q_{\text{Estação Itanhangá}}$$

Como resultado da análise de consistência fluviométrica, obteve-se para a exutória da bacia do rio Cachoeira uma série de vazões médias mensais, julgada até então, consistente. Devido à carência de dados, não foi possível se obter uma série isenta de falhas, o que implica na possibilidade de que a quantificação das vazões a nível anual fique sujeita a incertezas. A Figura 4-15 mostra a variação da vazão na exutória da bacia ao longo do tempo, onde as barras azuis representam a vazão média de cada mês. Os valores dessa série mensal constam apresentados no Apêndice C.



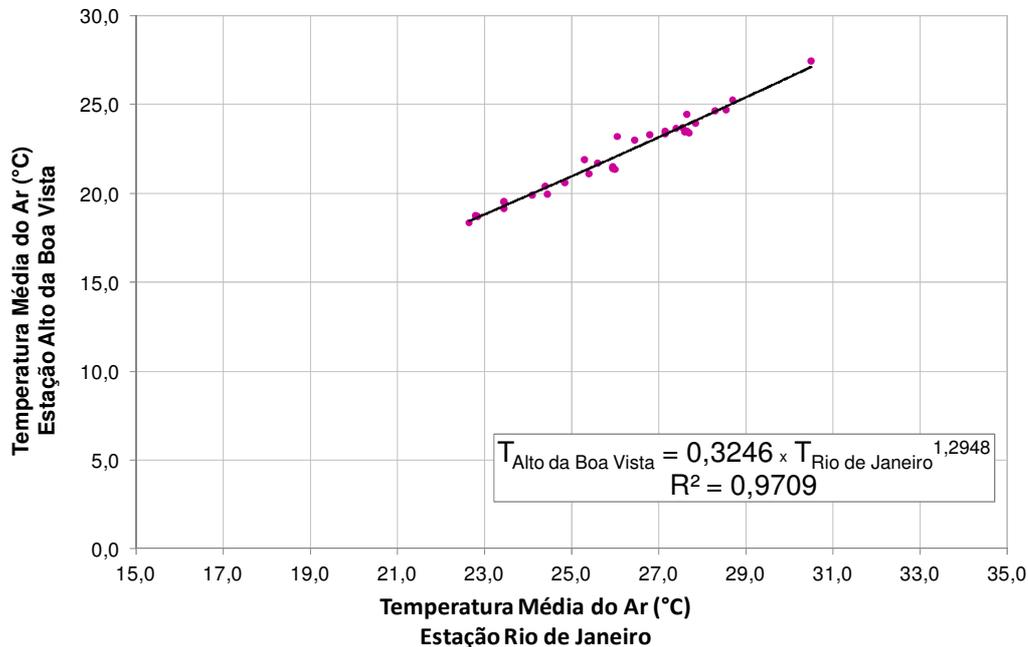
**Figura 4-15** – Vazões Médias Mensais na Exutória da Bacia do Rio Cachoeira

### 4.3.2.3 Dados Meteorológicos

Para se empregar o método empírico do balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) são necessários alguns dados meteorológicos que caracterizem a região de interesse, são eles os dados de precipitação pluvial e de temperatura média do ar.

Os dados de temperatura média do ar utilizados para caracterizar a bacia hidrográfica do rio Cachoeira foram medidos na estação Alto da Boa Vista. Conforme comentado anteriormente, a escolha desta estação se deu pela disponibilidade dos dados e a proximidade à bacia hidrográfica.

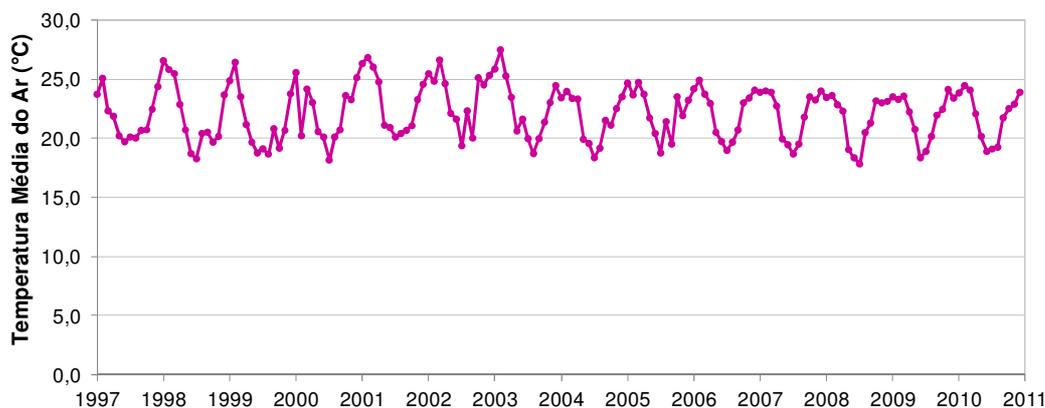
A série de temperaturas médias do ar disponível na estação Alto da Boa Vista compreende o período de janeiro/1997 a dezembro/2005. Buscando-se obter uma série completa e consistida até dezembro/2010, foi estabelecida uma correlação entre esses dados e os dados da estação climatológica da cidade do Rio de Janeiro. O ajuste que apresentou melhor qualidade foi do tipo potência, estabelecido para o período entre fevereiro/2003 e dezembro/2005, conforme apresentado na Figura 4-16 a seguir.



**Figura 4-16** – Correlação Mensal de Temperaturas Médias do Ar entre as Estações Rio de Janeiro e Alto da Boa Vista (fev/2003 a dez/2005)

Nos poucos meses com falhas em ambas as estações, agosto/1997 e de abril a julho/2006, foram adotados os valores médios mensais calculados com base nos dados disponíveis na estação Alto da Boa Vista.

Como resultado da análise dos dados meteorológicos obteve-se uma série histórica consistente e sem falhas, que caracteriza as temperaturas médias do ar na região da bacia do rio Cachoeira. A Figura 4-17 mostra a variação da temperatura média do ar ao longo do tempo. Os valores dessa série constam apresentados no Apêndice D.



**Figura 4-17** – Temperaturas Médias do Ar na Estação Alto da Boa Vista

Através dos dados observou-se que as temperaturas médias do ar se encontram em torno da média dos 22,1 °C, oscilando entre a máxima média de 27,5 °C e a mínima média de 17,8 °C.

Com base nos dados mensais de temperatura média do ar (Figura 4-17) e de precipitação total (Figura 4-10), foi calculado de forma sequencial o balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) para o período compreendido entre janeiro/1997 e dezembro/2010. Considerou-se a capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) em 200 mm. Esse valor foi adotado conforme recomendação da literatura, que para espécies florestais varia de 150 a 300 mm (Stape e Gomes, 1996 e Neves, 2000).

Através desse método foram obtidas estimativas da evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF), excedente hídrico (EXC) e armazenamento de água no solo (ARM). Todos os cálculos foram realizados em planilha Microsoft Excel, elaborada por Rolim et al. (1998). Os valores dessas séries constam apresentados no Apêndice E.

### 4.3.3 Tratamento dos Dados de Satélite

Para o tratamento das imagens de satélite selecionadas utilizou-se o ferramental disponível na extensão *Spatial Analyst Tool* do ArcGIS 9.3 (ESRI). Dentre as funções presentes nessa extensão destaca-se o conjunto *Multivariate*, com funções específicas para processamento digital de imagens obtidas por sensoriamento remoto.

Segundo Figueiredo (2005), processar digitalmente uma imagem significa aplicar técnicas computacionais com o objetivo de facilitar a extração de atributos dessa imagem. Embora o sistema visual humano seja capaz de identificar facilmente padrões de cores, ele não consegue distinguir um único pixel de uma imagem.

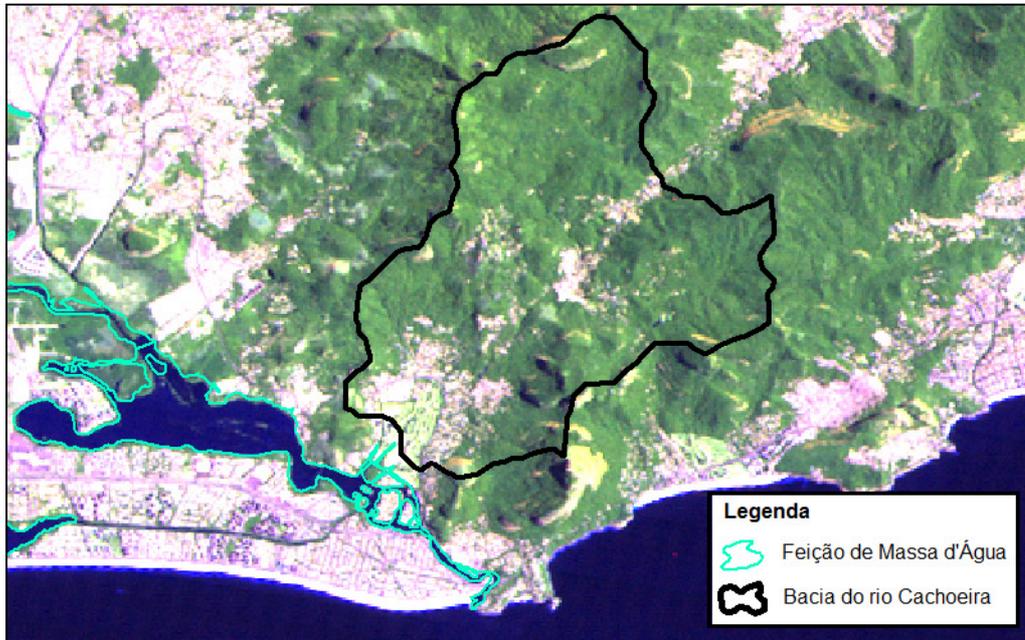
Antes de iniciar o processamento dos dados de satélite, deve ser avaliado um pré-processamento. Figueiredo (2005) ressalta que as imagens na forma em que são recebidas originalmente dos satélites comumente apresentam degradações, geradas devido a desajustes na calibração dos detectores, erros esporádicos na transmissão dos dados, influências atmosféricas e distorções geométricas. As principais correções dessas imperfeições são geométricas, atmosféricas e radiométricas, e o que objetiva cada uma dessas correções é a necessidade da sua utilização.

Nas imagens foi aplicada apenas a correção geométrica, também conhecida como georreferenciamento, visto que as imagens selecionadas apresentaram entre si deslocamentos espaciais oriundos da movimentação do satélite. Devido à complexidade dos processos de correção atmosférica e radiométrica, e da quantidade de imagens trabalhadas, a aplicação dessas correções para melhorar a visualização das imagens estava fora das possibilidades do presente estudo.

#### 4.3.3.1 Georreferenciamento

As imagens foram referenciadas no sistema de projeções UTM, utilizando o Datum WGS-84, Zona 23 Sul, identificando os mesmos pontos de controle nas dez imagens e os registrando em função da base cartográfica georreferenciada no mesmo sistema de projeções.

Os pontos de controle foram obtidos a partir da massa d'água da Lagoa da Tijuca. Esta feição foi considerada no georreferenciamento da imagem devido à facilidade em visualizar massas d'água nas imagens de satélite. A Figura 4-18 ilustra o resultado do georreferenciamento para a imagem do ano de 2010.



**Figura 4-18** – Registro da Imagem de 2010 Corrigida Geograficamente

#### 4.3.3.2 Classificação

A classificação de imagens de satélite é um processo de extração de informações, utilizado para mapear áreas da superfície terrestre reconhecendo seus padrões e objetos homogêneos (Körting, 2006).

Existem várias técnicas de classificação de imagens de sensoriamento remoto. As técnicas atuam sobre a imagem considerando as bandas espectrais selecionadas e os vetores de níveis de cinza para cada pixel dessas bandas. Esses vetores de níveis de cinza são "comparados" e os pixels com níveis de cinza mais similares, segundo a regra de decisão de cada técnica, tendem a ser classificados em uma mesma categoria (Nishida, 1998).

As técnicas de classificação podem ser divididas em dois grupos, a classificação supervisionada e a não supervisionada. Na classificação não supervisionada, cada pixel da imagem é associado automaticamente a uma classe espectral sem que se conheça o número ou identificação das diferentes classes presentes na imagem. Na classificação supervisionada, são selecionadas amostras representativas para cada uma das classes, que o

sistema utiliza como referência para decidir a qual classe cada pixel deve ser atribuído (Fonseca, *apud* Körting, 2006; Nishida, 1998).

No presente estudo foram realizadas classificações supervisionadas das dez imagens selecionadas para caracterizar a cobertura vegetal em função de duas classes temáticas de interesse:

- Área Florestal – Inclui-se nessa classe áreas que apresentam cobertura florestal e demais feições naturais não profusamente alteradas por atividades humanas; e
- Área Não Florestal – Inclui-se nessa classe áreas urbanizadas e a maioria das áreas cujas características originais foram alteradas em consequência de atividades humanas.

Procurou-se selecionar para cada imagem amostras simples e espacialmente bem distribuídas dentro da região da bacia estudada. Admite-se que a classificação empregada é extremamente simplificada e que numerosas diferenças em relação ao comportamento hidrológico devem existir dentro de uma mesma classe. Por exemplo: uma encosta florestada apresenta um grau de infiltração de água no solo muito superior ao de uma área revestida por capim colônio (*Megathyrsus maximus*). Da mesma forma as áreas urbanizadas podem apresentar distintas resultantes hidrológicas em função do grau de impermeabilização do solo, adensamento de construções, etc.

O método estatístico utilizado para classificação supervisionada foi o da máxima verossimilhança. De acordo com Nishida (1998), esse classificador é o mais difundido dentre os supervisionados. Seu método pressupõe que os níveis de cinza de cada classe seguem uma distribuição normal, avaliando as probabilidades que um determinado pixel tem de pertencer às classes identificadas e o designando àquela cuja probabilidade é maior.

Por se tratar de um processo automático, os produtos temáticos gerados pela classificação apresentaram erros, identificados como pixels isolados, fora do contexto das classes, o que deixou as áreas fragmentadas. Para contornar esses erros e proporcionar a uniformidade das classes mapeadas foi realizada uma pós-classificação.

#### 4.3.3.3 Pós-Classificação

O processo de pós-classificação consistiu inicialmente na aplicação de um filtro majoritário, que avalia a frequência da classe que cada pixel pertence em relação às classes dos pixels vizinhos. Baseado na frequência da vizinhança, o filtro substitui a classe isolada pela classe de maior frequência.

Ainda assim, parte dos produtos gerados continuou a apresentar erros na classificação, necessitando de uma edição manual. Por identificação visual e relativo conhecimento da região, os vetores das classes foram alterados para que os produtos temáticos se tornassem mais representativos.

#### 4.3.3.4 Mapeamento

Após a realização dos processos descritos anteriormente, foram gerados mapas temáticos de cobertura vegetal para bacia do rio Cachoeira através de cada imagem. Utilizou-se como contorno o recorte delimitado da bacia, o que possibilitou a extração das porcentagens das áreas definidas pelas classes. Ressalta-se que mesmo com os tratamentos e cuidados tomados no processamento dos dados de satélite, não podemos afirmar que os produtos temáticos elaborados condizem fielmente com a realidade.

Para validar o que foi constatado visualmente nas classificações, avaliou-se a matriz de confusão, que compara as amostras selecionadas para treinamento com o resultado da classificação. Entretanto, por terem sido escolhidas apenas duas classes temáticas de características bem distintas entre si, o desempenho da matriz de confusão demonstrou-se tendencioso e insuficiente para assegurar a acurácia da classificação.

Diante do exposto e com as referências disponíveis, a alternativa utilizada para avaliar a qualidade do resultado obtido no presente estudo foi a comparação do resultado do mapeamento temático gerado para o ano de 2010 com o resultado do trabalho de mapeamento da cobertura vegetal e do uso das terras no município do Rio de Janeiro, desenvolvido em 2010 pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente – SMAC. O mapa de vegetação e demais resultados deste trabalho é disponibilizado pela rede mundial de computadores através do sistema de informações geográficas SIG Floresta, podendo ser acessado pelo Portal da Prefeitura do Rio de Janeiro na página da SMAC.