



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS  
DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL - HIDROBAP**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

**Thiago Batista dos Santos (UNISAL, Bolsista PIBIC/CNPq)**  
E-mail: [tsantos@cptec.inpe.br](mailto:tsantos@cptec.inpe.br)

**Dr. Carlos Frederico de Angelis (DSA/CPTEC/INPE, Orientador)**  
E-mail: [angelis@cptec.inpe.br](mailto:angelis@cptec.inpe.br)

**Julho de 2008**

## Resumo

Esse trabalho demonstra como será feito o monitoramento dos recursos hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul e a validação do desempenho do Modelo Hidroestimador em estimar precipitações para bacias hidrográficas. Como a precipitação é a principal variável do ciclo hidrológico, o Sistema de Monitoramento dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul - HIDROBAP utilizará todos os métodos de quantificação de chuvas empregados pelo CPTEC/INPE. Estes métodos geram dados nas mais diversas escalas espaciais e temporais. Dessa forma, todos os atores envolvidos na gestão dos recursos hídricos da bacia do Rio Paraíba do Sul poderão fazer uso do HIDROBAP.

## **Sumário**

<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CICLO HIDROLÓGICO.....</b>	<b>1</b>
<b>BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL.....</b>	<b>2</b>
<b>ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO.....</b>	<b>5</b>
<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>8</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>10</b>
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>22</b>

## **Introdução**

Os sistemas de monitoramento de recursos hídricos em bacias hidrográficas são ferramentas para entendimento do comportamento hidrológico e para previsão de eventos naturais não esperados. O HIDROBAP será uma ferramenta de monitoramento dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Para tal, serão utilizadas técnicas e instrumentos de sensoriamento remoto. Dentre as principais técnicas estão as estimativas de precipitação por satélite, por estações de coleta de dados e por radares meteorológicos de superfície, além do monitoramento da qualidade da água do Rio Paraíba do Sul por meio de plataformas de coleta de dados.

Para que o sistema possa atender as necessidades dos usuários é preciso que seja feita uma série de análises e validações dos dados gerados. Nessa temática, o objetivo deste trabalho é analisar o desempenho do Modelo Hidroestimador, que faz estimativas de precipitações a partir de imagens captadas na região espectral do infravermelho pelo satélite geoestacionário da série GOES para a área da bacia do Rio Paraíba do Sul. Esse método indireto de estimar a precipitação tem a grande vantagem de produzir estimativas em alta resolução espacial e temporal, além de fornecer dados pluviométricos de regiões inóspitas.

## **Ciclo Hidrológico**

O primeiro passo na busca da eficaz política de gerenciamento dos recursos hídricos é conhecer as interrelações entre os sistemas do ciclo hidrológico. A partir do esclarecimento das características e do comportamento hídrico da bacia hidrográfica em estudo é possível planejar e executar uma gama de atividades para sua gestão e administração.

Definido como fenômeno de circulação fechada da água entre os sistemas atmosféricos, subterrâneo e superficial, o ciclo hidrológico é detentor de alto grau de complexidade e dinamismo. De maneira genérica, ele está ligado ao movimento e à troca de água em seus diferentes estados físicos, que ocorrem na hidrosfera, entre os oceanos, as calotes de gelo, as águas superficiais, as águas subterrâneas e a atmosfera. (CARVALHO & SILVA, 2006).

A força motriz do ciclo hidrológico é a energia solar associada à ação da gravidade e da rotação da Terra. Com a absorção de energia do aquecimento solar, a água superficial evapora e ascende à atmosfera. Posteriormente, o vapor d'água, ao entrar em contato com temperaturas inferiores à da superfície terrestre, se condensa e retorna à superfície por intermédio da ação da gravidade, sob forma de precipitação (chuva, neve, granizo). A precipitação, ao entrar em contato com a superfície, é drenada por meio de linhas de água que as conduzem aos rios, que, por sua vez, atingem os oceanos, constituindo-se o processo de escoamento superficial. Porém, uma parcela da água precipitada é interceptada pela vegetação e exposta à energia solar. Com absorção dessa energia, a água novamente se evapora. Também parte dessa água é infiltrada nos solos e nas rochas abastecendo os lençóis freáticos e os aquíferos, e, posteriormente, é escoada no subsolo (escoamento subterrâneo). A água infiltrada no solo está sujeita à evaporação direta para a atmosfera e à absorção pela vegetação que, através da evapotranspiração, a devolve à atmosfera.

### **Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**

Segundo a Agência Nacional das Águas (2002), o Brasil possui grande disponibilidade de água doce em estado líquido, cerca de 12% das reservas mundiais. Este bem de valor inestimável deve ser protegido e preservado, com o intuito de se manter padrões de qualidade adequados às necessidades das gerações futuras. Nesse âmbito, o Governo Federal, por meio da Lei nº9.433, de 8 de janeiro de 1997, regulamentou a Política Nacional de Recursos Hídricos. Por meio dela foi instituído o Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos e a bacia hidrográfica foi estabelecida como área territorial de gestão dos recursos hídricos. Mas somente por força da lei federal 9.984, de 17 de julho de 2000, foi instituída a Agência Nacional das Águas, entidade federal responsável pela implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e pela Coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Neste contexto, foi escolhida para o presente trabalho uma importante bacia hidrográfica brasileira, a Bacia do Rio Paraíba do Sul, que se localiza na Região Sudeste, possui uma área de aproximadamente 55.500 Km<sup>2</sup> distribuída nos Estados de

São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Drena uma das regiões mais desenvolvidas do país, abrangendo 180 municípios. Esses municípios juntos são responsáveis por aproximadamente 10% do PIB brasileiro. Outra importância dessa bacia está ligada ao abastecimento de cerca de 14,3 milhões de pessoas, incluindo 8,7 milhões de habitantes da Região Metropolitana do Rio de Janeiro beneficiadas pela transposição de grande volume do Paraíba do Sul para a bacia do rio Guandu (SERRICCHIO et al, 2005).

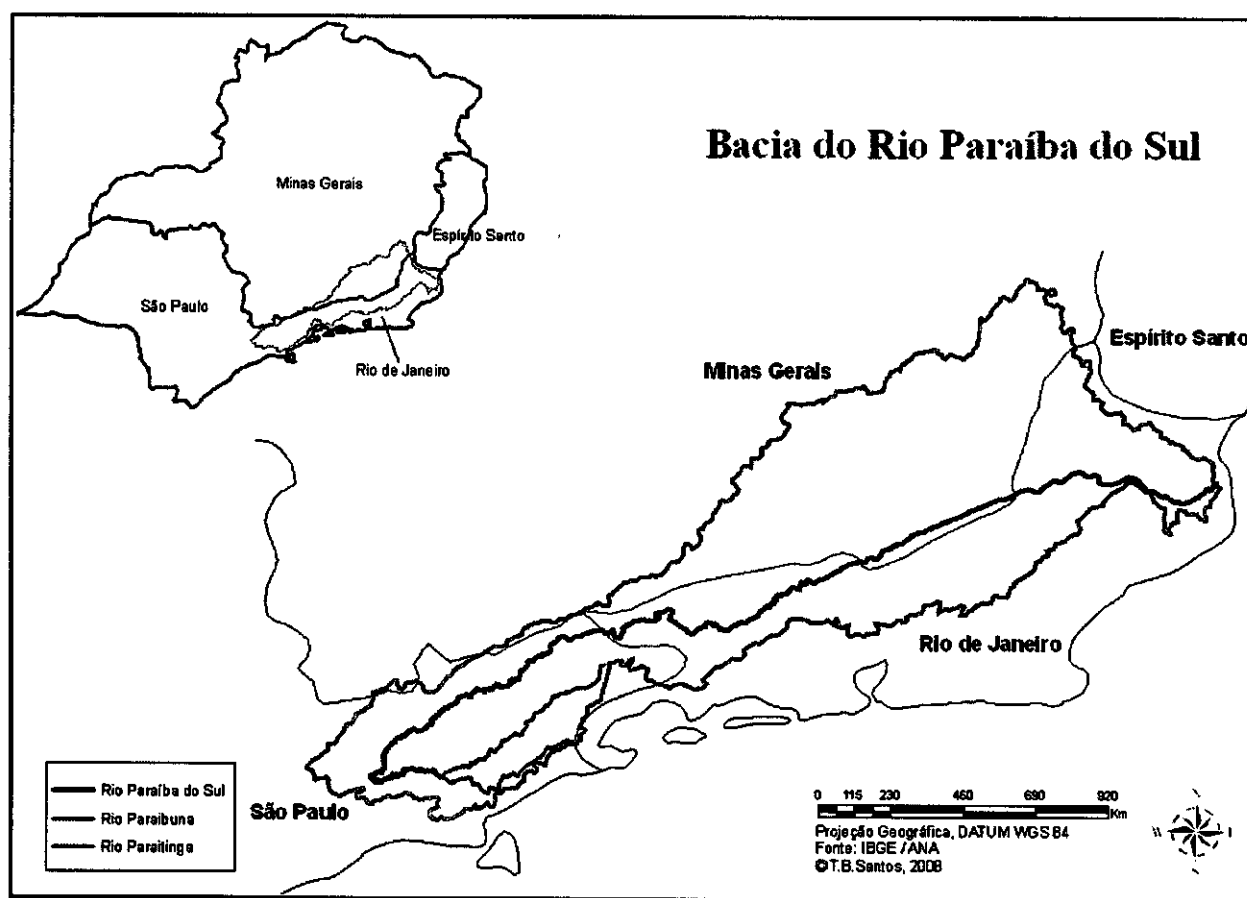


Figura 1: Localização da Bacia do Rio Paraíba do Sul

O Rio Paraíba do Sul tem suas nascentes na Serra da Bocaina, no Estado de São Paulo, na cota de 1800 metros de altitude, e sua foz no norte fluminense, no município de São João da Barra. Sua área de drenagem distribui-se entre as serras do Mar e da Mantiqueira, situando-se em uma das poucas regiões do país de relevo muito acidentado, colinoso a montanhoso, chegando a mais de 2.000 metros nos pontos mais elevados. Como exemplos, pode-se citar o Pico das Agulhas Negras, o Pico dos Marins

e o Pico do Itaguaré, espécimes de montanhas alcantiladas, com, respectivamente, 2.787, 2.422 e 2308 metros de altitude.

No aspecto político-administrativo, a Bacia do Rio Paraíba do Sul foi a pioneira na composição e execução do conjunto de instrumentos e organismos previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos. O gerenciamento dos recursos hídricos da bacia é considerado, em âmbito nacional, como experiência piloto da Política e do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; isto graças à criação do Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – CEIVAP. Por meio do CEIVAP foi possível implantar, praticamente, todos os instrumentos de gerenciamento e as entidades integrantes do sistema de gerenciamento de recursos hídricos de domínio da União. Alguns instrumentos são:

1) O Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Paraíba do Sul: Plano Diretor da bacia, que serve como base para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433/97). Foi aprovado pelo CEIVAP para o período de 2002 a 2006, e, recentemente, atualizado para nortear as ações de recuperação da bacia para o período de 2007 a 2010.

2) Sistema de Cadastramento e de Outorga de Direito de Uso da Água: O processo de regularização de usos de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul teve início em 2002, com a Resolução ANA nº 210, de 11 de setembro de 2002, sendo a pioneira no país.

3) Cobrança pelo Uso da Água: Com uma base de cadastramento de usuários e outorgas consolidadas, iniciou-se em março de 2003, de maneira pioneira no país, a cobrança pelo uso da água.

4) Criação da AGEVAP: Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, figura jurídica da bacia, que tem funções executivas e operacionais de apoio ao CEIVAP e movimenta as contas bancárias do produto da cobrança pelo uso das águas, repassado pela Agência Nacional de Águas.

Apesar de todos os avanços no tema de gestão dos recursos hídricos, o CEIVAP ainda tem problemas a serem resolvidos, entre outros, como lidar com o processo de assoreamento da calha, dos tributários e das barragens do Paraíba do Sul, e como mitigar os problemas de enchentes e inundações em áreas urbanas.

As cheias observadas nesta bacia, no início de janeiro de 1997 e de 2000, reforçam a grande necessidade de se exercer um controle mais efetivo e sistemático sobre as precipitações intensas nas sub-bacias e sobre as vazões que escoam superficialmente nas calhas dos cursos d'água afluentes do Rio Paraíba do Sul (ANA & COPPETEC, 2002).

### **Estimativa de Precipitação por Sensoriamento Remoto**

Nesta temática, o Sistema de Monitoramento dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul – HIDROBAP- está em fase de construção. O HIDROBAP será uma ferramenta para o entendimento do comportamento hidrológico e previsão de eventos naturais não esperados; para isto, utilizará, entre outras, as técnicas de estimativa de chuva por satélite e por radar. O intuito desse sistema é monitorar os recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul.

### **Precipitação por Radar**

O Radar (Radio Detection And Ranging) foi um dos desenvolvimentos mais importantes da eletrônica que resultaram da Segunda Guerra Mundial. A grande necessidade estratégica dessa guerra foi estabelecer um mecanismo capaz de localizar e seguir aviões e navios inimigos em qualquer tempo e a qualquer hora, tanto de dia, quanto de noite. Porém, os ecos (retroespalhamento) dos radares empregados estavam sujeitos a ruídos causados por tempestades. Tais interferências constituíram-se um grande feito, pois pela primeira vez na história foi possível localizar precipitações pluviométricas, medir a sua extensão, observar o seu movimento e crescimento. Após essa descoberta, grande número de problemas meteorológicos pode ser resolvido pela exploração científica (BATTAN, 1974).

O Radar meteorológico é um sensor remoto ativo composto basicamente por transmissor, antena e receptor. O transmissor gera pulsos de energia em frequência de microondas. Esta energia é concentrada pela antena num estreito feixe e tem a capacidade de interceptar gotas de chuva. Ao entrar em contato com as gotas, a energia eletromagnética emitida pelo radar é difundida em todas as direções, porém só a energia



retroespalhada é detectada pelo receptor instalado no radar. A energia eletromagnética difundida de volta é representada pelo fator de refletividade do radar ( $Z$ ), que depende da distribuição das gotas de chuva dentro do volume amostrado.

Com o estabelecimento da equação do radar é possível obter uma relação entre a taxa de precipitação ( $R$ ) e o fator de refletividade. Esta expressão é empírica e dada pela equação  $Z=AR^b$ , em que  $A$  e  $b$  são coeficientes pré-determinados e estão relacionados com o tamanho das gotas de precipitação (ÁVILA, 2006).

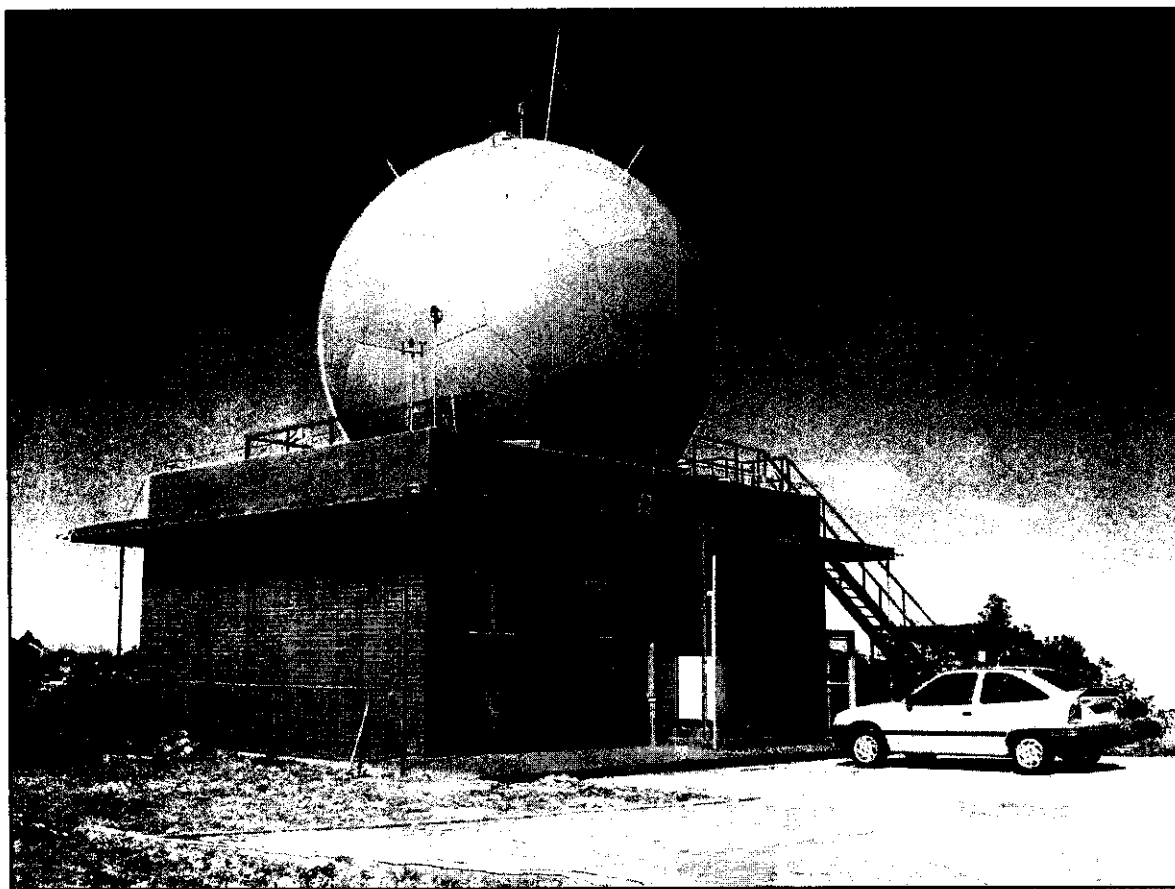


Figura 2: Radar Meteorológico Pico do Couto, Petrópolis – RJ. Aparelho do tipo Doppler.

O HIDROBAP irá utilizar dois radares meteorológicos do tipo Doppler. Esses aparelhos possuem importância singular, pois permitem mensurar a chuva e a velocidade radial de deslocamento dos sistemas precipitantes detectados. Um dos radares está instalado no município de São Roque, no Estado de São Paulo, e cobre quase toda a parte paulista da bacia. O outro está instalado no município de Petrópolis,

no Estado do Rio de Janeiro, e consegue acompanhar as precipitações das porções mineira e fluminense e de uma pequena parcela paulista da bacia. Esse feito será possível graças ao Convênio de Cooperação Técnico-Científico entre o Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA, da Força Aérea Brasileira e o CPTEC / INPE.

A cada 15 minutos, os radares iniciam uma varredura que cobre um raio de 250 km. Após a coleta de dados é possível identificar o campo de precipitação num produto chamado CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator). Os campos de precipitações são calculados para um CAPPI a uma altura de 3 Km, com a resolução espacial de 2 Km.

Os mapas de chuvas são gerados a cada 15 minutos, em tempo quase real. Esses mapas representam as precipitações estimadas a partir da relação Z-R desenvolvida por MARSHALL & PALMER (1948), expressa pela equação:  $Z=200R^{1.6}$ .

### **Precipitação por Satélites**

Além da maneira convencional de se mensurar a chuva de um determinado local através de pluviômetros e radares distribuídos na superfície terrestre, existe a estimativa de chuva por satélites meteorológicos. Por possuírem menor resolução espacial, conseguem o imageamento de vastas áreas. Devido à alta resolução temporal, é possível coletar informações em diferentes épocas do ano e em anos distintos.

Os satélites podem ser classificados, segundo a sua órbita, em geoestacionários e de órbita polar. Os satélites geoestacionários normalmente estão posicionados a uma distância de aproximadamente 36.000 km da Terra e operam dia e noite. Eles fornecem imagens de uma mesma região geográfica a cada 15 ou 30 minutos, utilizando para isso sensores que observam os fenômenos meteorológicos na região espectral do visível e do infravermelho. O uso dos satélites geoestacionários na meteorologia é de extrema importância, pois possuem alta resolução temporal, o que possibilita maior acompanhamento e previsão das precipitações. Tais satélites orbitam no plano equatorial da Terra e seu período orbital coincide com a rotação da do Planeta. Assim, o seu campo de visada sempre estará numa mesma região geográfica.

Já os satélites de órbita polar praticamente mantêm sua trajetória sobre os meridianos, passando pelos pólos norte e sul a cada revolução. Esses satélites estão

distribuídos numa órbita síncrona com o sol, numa distância de 700 a 850 km da superfície terrestre. Os satélites de órbita polar imageiam nuvens diretamente abaixo deles; assim, podem fornecer informações detalhadas sobre tempestades, sistemas de nuvens, entre outras (FERREIRA, 2005). Esses satélites carregam tanto sensores que operam na faixa espectral do visível e infravermelho, quanto na faixa de microondas.

As primeiras técnicas de estimativas de precipitação por satélites utilizavam imagens impressas em papel. Com o decorrer do tempo, as facilidades computacionais foram associadas à interpretação humana, e, nos dias atuais, destacam-se os métodos que relacionam as informações disponíveis nos satélites com dados obtidos por modelos matemáticos, que estimam parâmetros da atmosfera (AVILA, 2006).

A estimativa de precipitação por satélite é realizada por meio do reconhecimento de características físicas das nuvens, da quantidade de gotas de água e gelo, e sua devida associação a uma determinada taxa de precipitação. O principal método empregado pelo CPTEC/INPE para estimar a chuva por satélite é chamado Modelo Hidroestimador, que é uma adaptação do método proposto por VICENTE, et al, 1998.

O Modelo Hidroestimador produz estimativas da taxa de chuva para cada imagem do satélite GOES-10 recebida no CPTEC/INPE. O satélite GOES-10 possui uma órbita geoestacionária. A resolução espacial das estimativas é de 4 km, e estimativas instantâneas são geradas a cada 15 minutos.

## **Metodologia**

Todas as informações geradas durante o processo de monitoramento dos recursos hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul serão integradas em um mesmo ambiente e poderão ser observadas através de um sistema visualizador de dados. O desenvolvimento deste sistema será feito de forma modular, de maneira que ele possa gradativamente incorporar os avanços das técnicas de monitoramento do local. O HIDROBAP irá integrar os diversos tipos de dados existentes, a saber: mapas de chuva, mapas de previsão de tempo, imagens de satélites, imagens de radar meteorológico, localização de municípios, localização de estradas primárias e secundárias, hidrografia... Tal etapa se constituirá de um módulo interativo e o usuário poderá escolher quais informações poderão ser visualizadas ao mesmo tempo.

As informações geradas pelo CPTEC serão armazenadas em um banco de dados e poderão ser usadas sempre que o usuário delas necessitar. A frequência em que essas informações são geradas depende do tipo de dado. As imagens de satélites e mapas de chuva são produzidas a cada 15 minutos; já os mapas de previsão de tempo são gerados a cada 6 horas. Deste modo, o sistema integrador de dados deve trabalhar de forma operacional e apresentar funcionalidades que permitam gerenciar o fluxo de informações automaticamente.

Como o objetivo principal do trabalho é o monitoramento dos recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul, as principais fontes de dados serão os dois radares meteorológicos que cobrem a área, imagens de satélites e mapas de previsão de tempo. Assim, é necessário garantir o fornecimento desses dados com a menor taxa possível de falhas. Para tal, existe uma comunicação entre o CPTEC e os radares. Os dados de radar são gerados pela Força Aérea Brasileira e disponibilizados ao CPTEC por meio do Convênio de Cooperação Técnico-Científica assinado entre o DECEA e o CPTEC-INPE.

O Fluxograma da Figura 3 mostra um esquema das atividades e processos envolvidos na elaboração do Sistema de Monitoramento dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paraíba do Sul.

O primeiro módulo do projeto HIDROBAP apresentará funcionalidades como ZOOM, busca de informações como nome de rios, municípios, estradas, etc. Criará uma área no entorno de qualquer rio de escolha do usuário e calculará o volume de chuva que estará caindo na área no momento da consulta.

Uma vez concluída a elaboração do primeiro módulo, o sistema estará apto a ser atualizado para um novo módulo. Este módulo permitirá a entrada de outros tipos de dados, tal como o da qualidade da água e precipitação estimada por satélites meteorológicos. Esta nova fase também exigirá tarefas de desenvolvimento de funcionalidades específicas para esse fim, como emissão de alertas, dados da qualidade da água e risco de enchentes, entre outras.

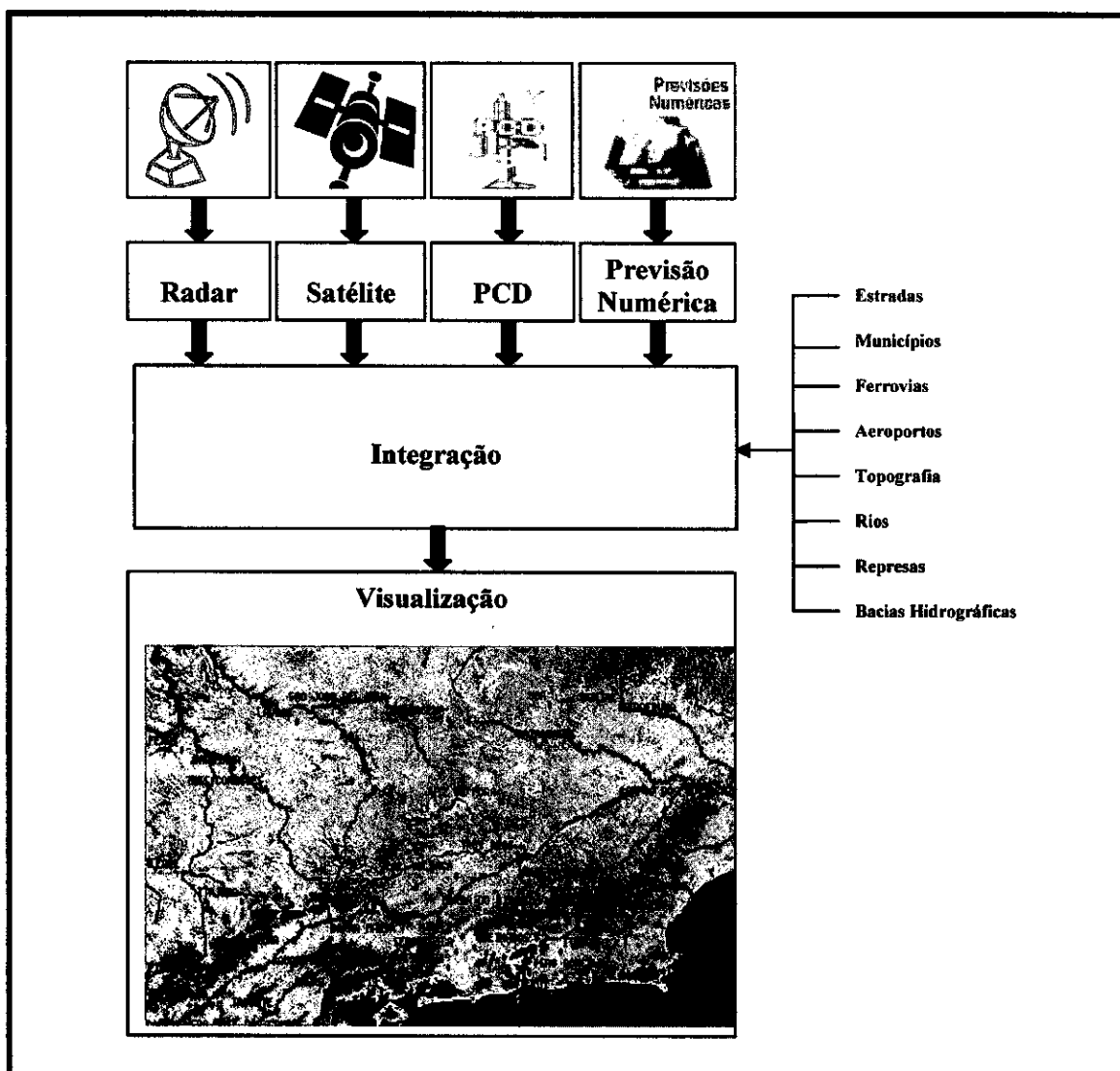


Figura 3: Esquema conceitual do Sistema HIDROBAP

## Resultados

### Base Vetorial

Atualmente, o HIDROBAP possui um sistema visualizador preliminar. Para o usuário, o HIDROBAP funcionará como uma espécie de Sistema de Informações Geográficas (SIG), disponibilizado em sítio eletrônico, com que poderá escolher várias informações e vê-las ao mesmo tempo.

O sistema, por força do Convênio de Cooperação Técnico-Científica assinado entre DECEA e CPTEC-INPE, já está operando com os dados de um radar

meteorológico. O radar que está sendo utilizado é o de São Roque. Dele estão sendo gerados mapas de chuva instantânea, a cada 15 minutos, para a parte paulista da bacia. Além dos dados de radar, também foi inserida neste sistema a base de dados vetoriais no formato de camadas contendo os seguintes dados: mapa com o limite da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul fornecido pela Agência Nacional das Águas – ANA; mapa com as sedes e respectivas malhas municipais dos 180 municípios pertencentes à bacia, distribuídos entre os Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro; mapa das principais rodovias; mapa da linha férrea; mapa com a distribuição das Plataformas de Coleta de Dados – PCDs; mosaico das imagens geradas pelo satélite LANDSAT com resolução espacial de 90 metros, e a rede hidrográfica dos principais rios da bacia.

### **Análise do Desempenho do Modelo Hidroestimador**

Uma ferramenta com grande potencial para monitorar as precipitações sobre a bacia do Rio Paraíba do Sul é o Modelo Hidroestimador. Por ser uma técnica de estimativa que utiliza parâmetros do topo da nuvem, existe uma margem de incerteza associada a esse modelo. A incerteza está relacionada ao tipo de nuvem. O algoritmo tende a superestimar a precipitação quando há a presença de nuvens do tipo *cirrus*, devido à sua baixa temperatura de brilho, porém, sabe-se que este tipo de nuvem não produz chuva. Já as chuvas estratiformes podem não ser quantificadas pelo método, pois as nuvens *stratus*, responsáveis por esse tipo de precipitação, possuem temperatura de brilho próxima à da superfície terrestre. Assim, uma característica do Modelo Hidroestimador é a melhor detecção e quantificação de chuvas convectivas. Por esse motivo, tornam-se necessárias algumas análises e pequenas correções do modelo para certas aplicações.

O CPTEC/INPE vem produzindo tais estimativas desde 2004, porém nenhuma validação efetiva do desempenho do Modelo Hidroestimador foi realizada até o momento. Diante disso, o objetivo deste trabalho é analisar e validar o desempenho do modelo para que as precipitações diárias estimadas pelo Hidroestimador possam ser utilizadas com confiabilidade. Para isso, foram consideradas todas as bacias de nível II (segundo a classificação da ANA) e seus respectivos pluviômetros. Esses instrumentos pertencem a diversas instituições, entre elas o INPE, a Agência Nacional de Águas

(ANA) o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que, juntas, concentram todas as informações em uma base de dados comum.

A fim de se demonstrar o desempenho do Modelo Hidroestimador em estimar chuva para a bacia do Rio Paraíba do Sul foi feita, de maneira preliminar, comparação dos dados de precipitação por satélite com os de superfície. Para tanto, foram utilizadas três técnicas de análise:

#### *Média total da bacia*

O experimento comparou dados de precipitação média diária sobre a bacia do Paraíba do Sul, tanto os derivados de satélite quanto os de pluviômetros (demonstrados na figura 4).

Primeiramente, foram compilados os dados de 24 pluviômetros do período dezembro de 2005 a fevereiro de 2006 (estação chuvosa) e de junho a agosto de 2007 (estação seca). Utilizou-se o acumulado diário dos 180 dias. O mesmo foi feito para precipitação por satélite. A expressão matemática utilizada foi a de média aritmética simples em que:

$$\bar{Y} = \left( \frac{\sum Y_i}{n} \right)$$

*Para o pluviômetro:*

Y = precipitação média da bacia no dia

Y<sub>i</sub> = precipitação acumulada diária pluviômetro

n = número de pluviômetros no dia

*Para o Hidroestimador:*

Y = precipitação média da bacia no dia

Y<sub>i</sub> = precipitação acumulada do pixel

n = número de pixels da bacia

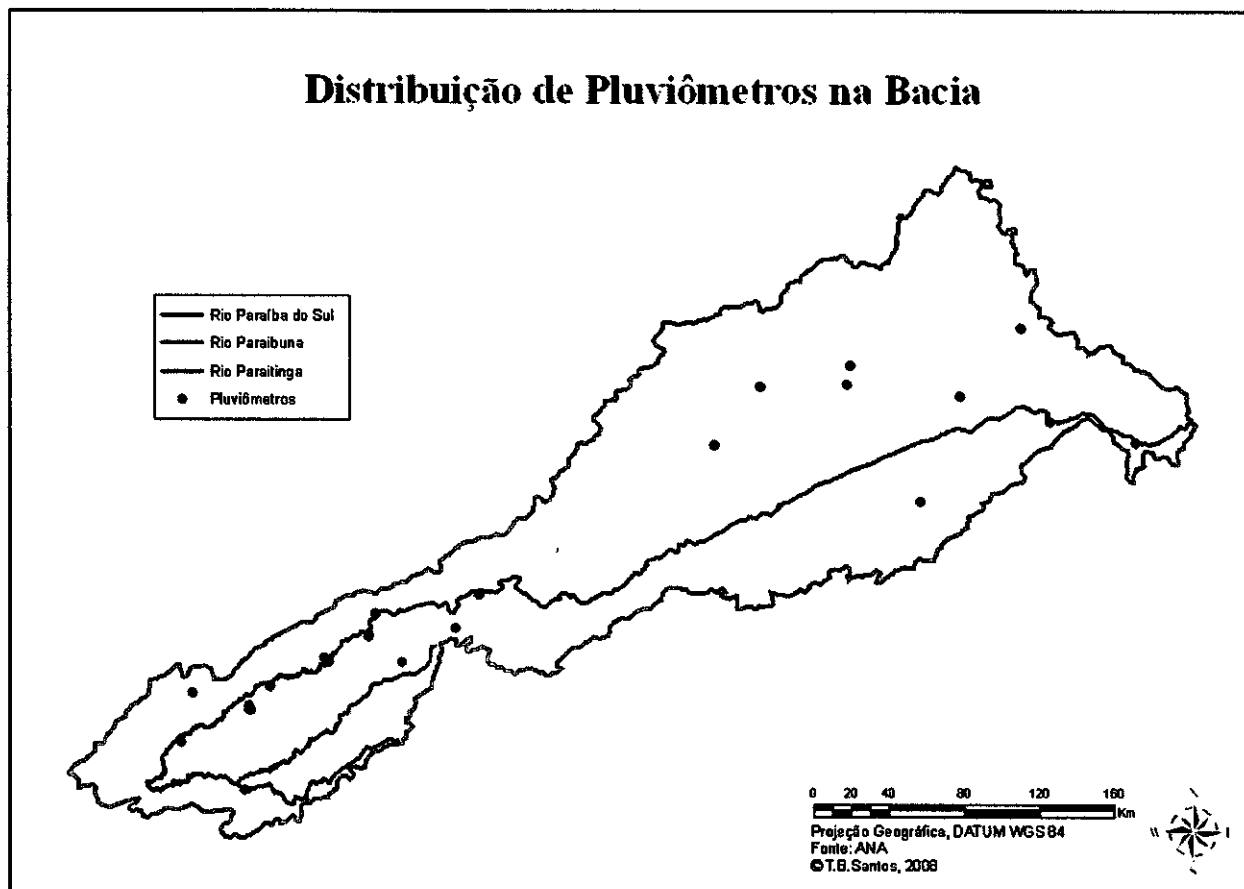


Figura 4: Mapa da distribuição de pluviômetros no Vale do Paraíba.

Após determinar a precipitação média diária da bacia para cada um dos 90 dias de cada estação (chuvosa e seca), os dados de origens distintas foram comparados. Posteriormente, calculou-se a correlação, o viés e o erro quadrático médio.

Considerando que os dados de superfície são fidedignos, os resultados preliminares indicam um satisfatório desempenho do Modelo Hidroestimador para o cálculo de precipitações acumuladas a cada 24 horas, durante o período amostrado. Isso significa que para aplicações que envolvem medidas nessa escala de tempo e espaço podem ser perfeitamente atendidas pelo modelo.



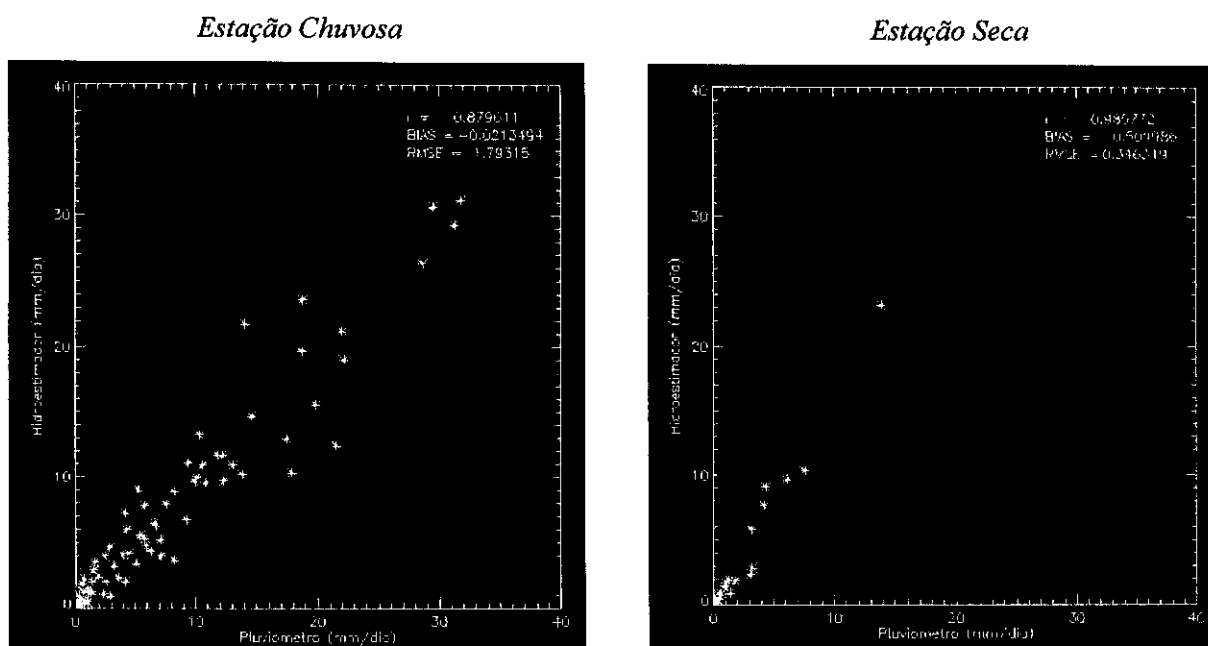


Figura 5: Gráficos de dispersão Pluviômetro x Hidroestimador.

### *Avaliação Local*

Esta técnica consiste na comparação dos dados de precipitação por satélite com os de pluviômetros, sem que haja interpolação dos dados pontuais para a área total da bacia. Os dados de precipitação mensurados por pluviômetro foram sobrepostos na imagem gerada pelo Hidroestimador. Isto foi feito para cada dia do mesmo período utilizado pela técnica *Média total da bacia*. Posteriormente, calculou-se a média dos nove possíveis pixels que viessem a representar o pluviômetro. A figura 6 representa uma situação hipotética do pluviômetro sobreposto à imagem do Hidroestimador e seus respectivos pixels vizinhos.

Como foram utilizados dados de 24 pluviômetros para 90 dias, analisaram-se 2160 dados pontuais de precipitação na área da bacia do Paraíba do Sul, tanto para a estação chuvosa quanto seca. A partir de então foram geradas estatísticas.

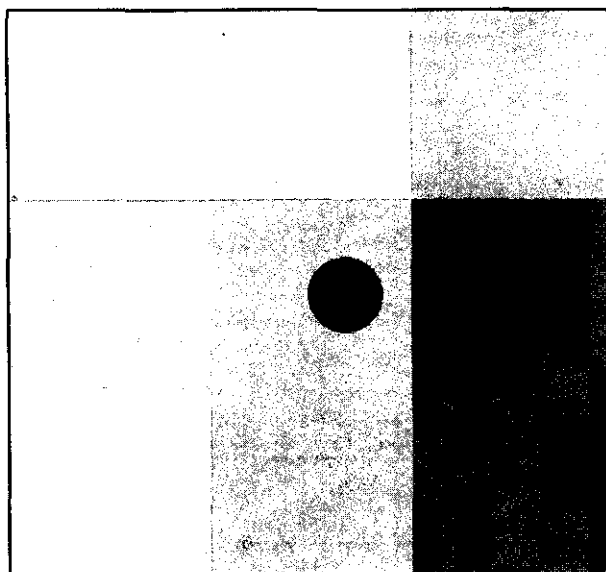
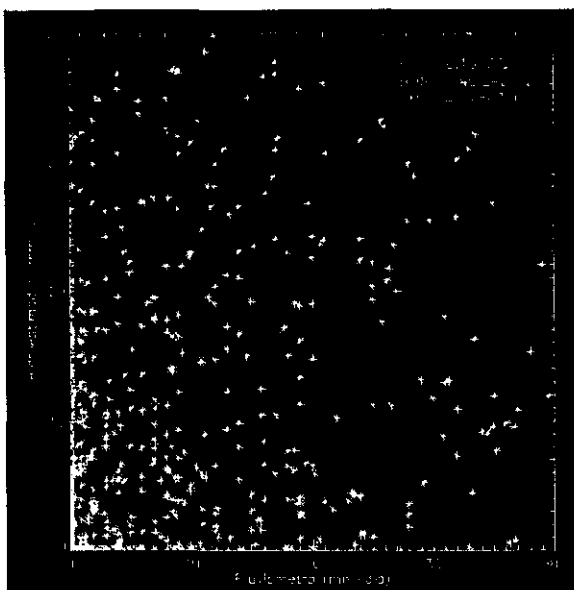


Figura 6: Pluviômetro sobreposto na imagem do Hidroestimador

Para esse período de dados e técnica obtiveram-se resultados não satisfatórios. A estação chuvosa apresentou correlação de 0.161. Isto demonstra que para as estimativas de chuva pontuais o Hidroestimador não possui bom desempenho. Porém, a estação seca apresentou melhor correlação, aproximadamente 0.593. Isto se deve à escassez de chuva desse período e ausência de nuvens *cirrus*, assim os dados de pluviômetros e do Hidroestimador, na maioria foram nulos.

*Estação Chuvosa*



*Estação Seca*

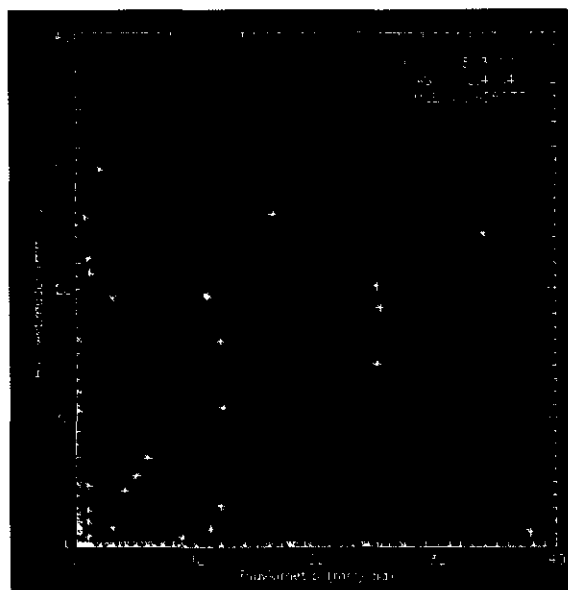


Figura 7: Gráficos de dispersão Pluviômetro x Hidroestimador – Método Avaliação Local.

### Polígonos de Thiessen

O método Polígono de Thiessen consiste na comparação dos dados de precipitação por satélite com os de pluviômetros, fazendo interpolação dos dados pontuais para a área total da bacia. Esta técnica assume que em qualquer ponto da bacia a precipitação é igual à medida no posto mais próximo. Atribui-se um fator de ponderação, que é proporcional à área de influência do pluviômetro, aos totais precipitados que foram detectados por equipamento.

Para a construção dos polígonos de Thiessen são necessários, no mínimo, dois postos de coletas de dados. Primeiramente, os postos adjacentes são ligados por um segmento de reta. Traça-se a mediatriz desse segmento. A junção das mediatrizes com os limites territoriais da bacia forma a área de domínio de cada pluviômetro em relação ao seu vizinho mais próximo. As figuras 8 e 9 ilustram a construção dos polígonos de Thiessen:

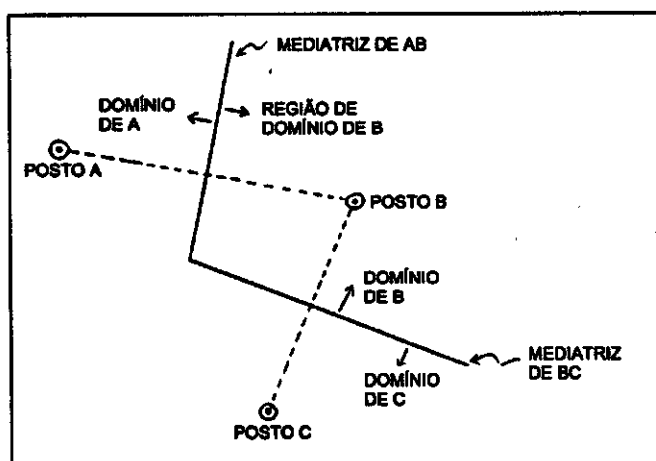


Figura 8: Construção dos Polígonos de Thiessen

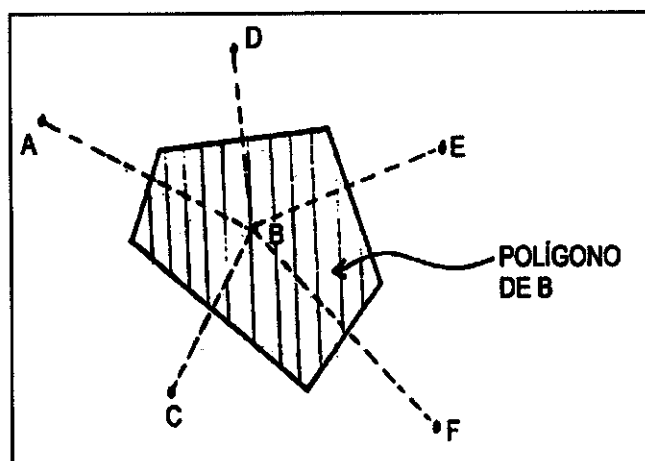


Figura 9: Área de influência do pluviômetro

As áreas de influência de cada um dos 24 pluviômetros da bacia do Paraíba do Sul foram definidas. A ponderação dos dados de precipitação mensurados por pluviômetros foi feita para cada dia dos períodos chuvoso e seco. A expressão matemática utilizada foi a de média ponderada, em que:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \bar{P}_i}{A}$$

$P$  é a precipitação média na bacia (mm);

$i$  é a precipitação no posto  $i$  (mm);

$A_i$  é a área em Km<sup>2</sup> do respectivo polígono, dentro da bacia

$A$  é a área total da bacia.

Após a interpolação dos dados pontuais foram feitas comparações dos dados de superfície com os estimados por satélite. A partir de então, foram geradas estatísticas de correlação, viés e erro médio quadrático.

Os resultados foram satisfatórios para a série temporal amostrada. A correlação manteve-se próxima a 0.706 para os dois períodos, erro médio quadrático de aproximadamente 5 mm.

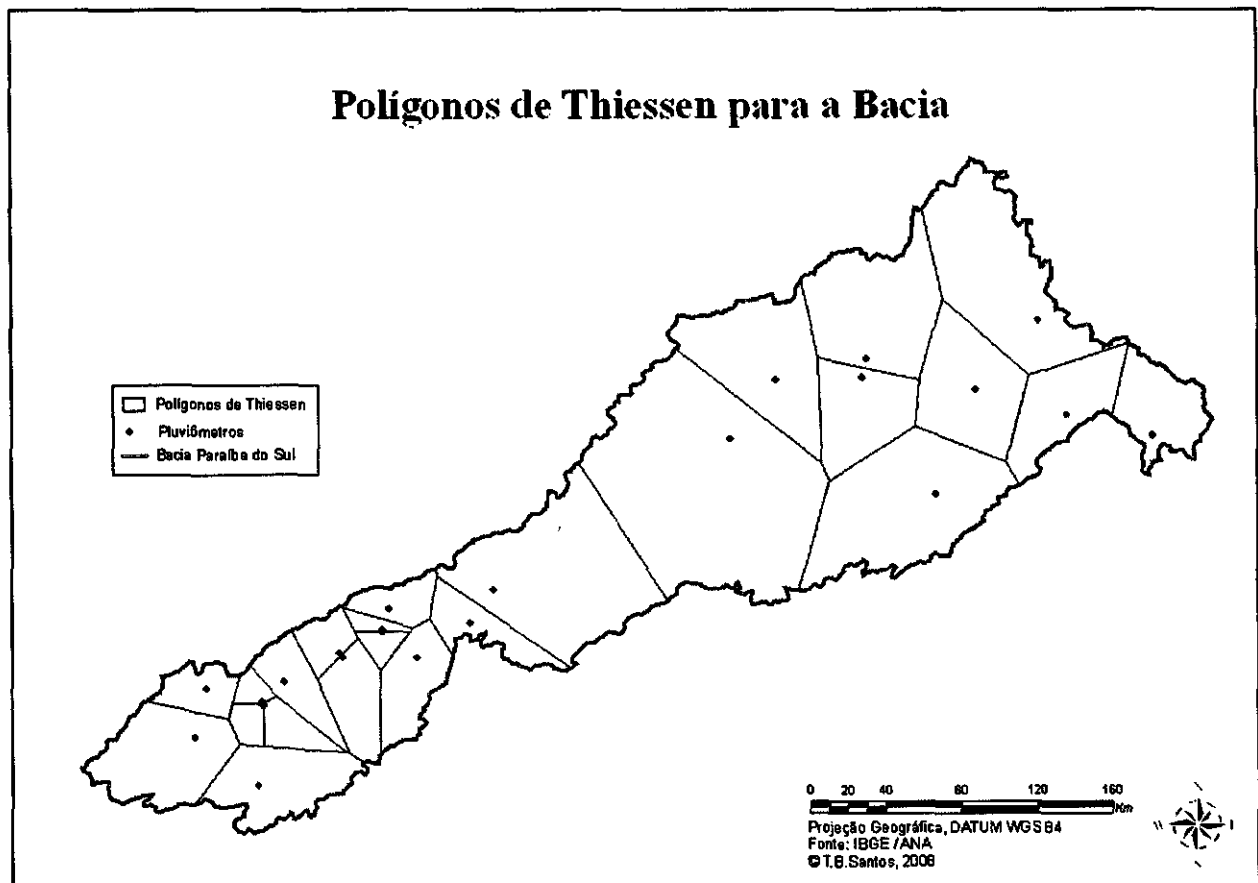
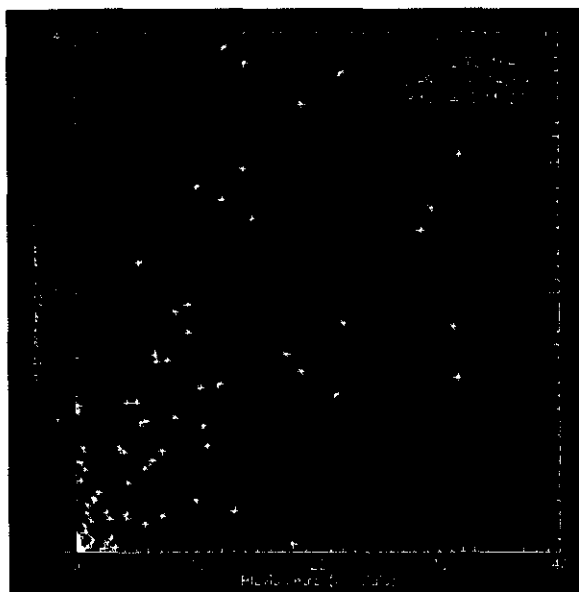


Figura 10: Polígonos de Thessen para a Bacia do Paraíba do Sul

*Estação Chuvosa*



*Estação Seca*

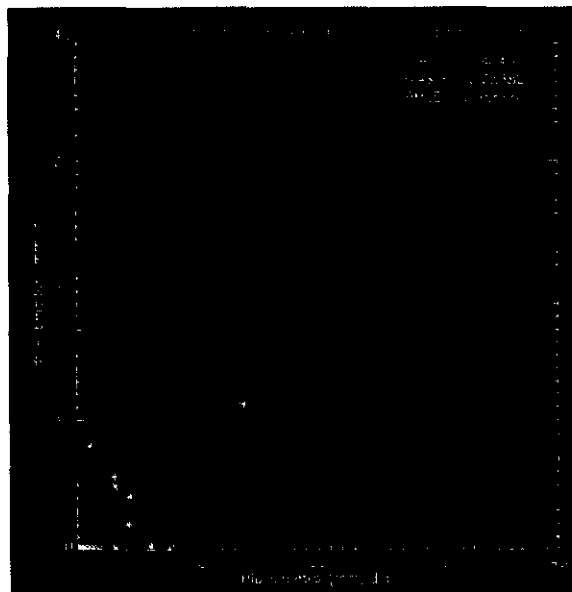


Figura 11: Gráficos de dispersão Pluviômetro x Hidroestimador – Método Polígonos de Thiessen.

As análises preliminares do desempenho do Modelo Hidroestimador para a bacia do Paraíba do Sul demonstram que a técnica de interpolação por média aritmética simples é a mais apropriada para se fazer comparações entre os dados de superfície e os de satélite.

A Figura 12 mostra as bacias analisadas e a localização dos pluviômetros utilizados. A Figura também mostra um mapa de chuva acumulada diária obtido pelo Modelo Hidroestimador e similar aos mapas usados nesse trabalho.

Nessa temática, utilizou-se a mesma técnica para se validar as informações produzidas pelo modelo para todas as bacias de nível II do território brasileiro. Foram geradas estatísticas de correlação, erro absoluto e erro médio quadrático para a mesma série temporal de dados utilizada nas técnicas descritas neste trabalho. As figuras 12 e 13 mostram as estatísticas e o número de pluviômetros encontrados dentro de cada bacia.

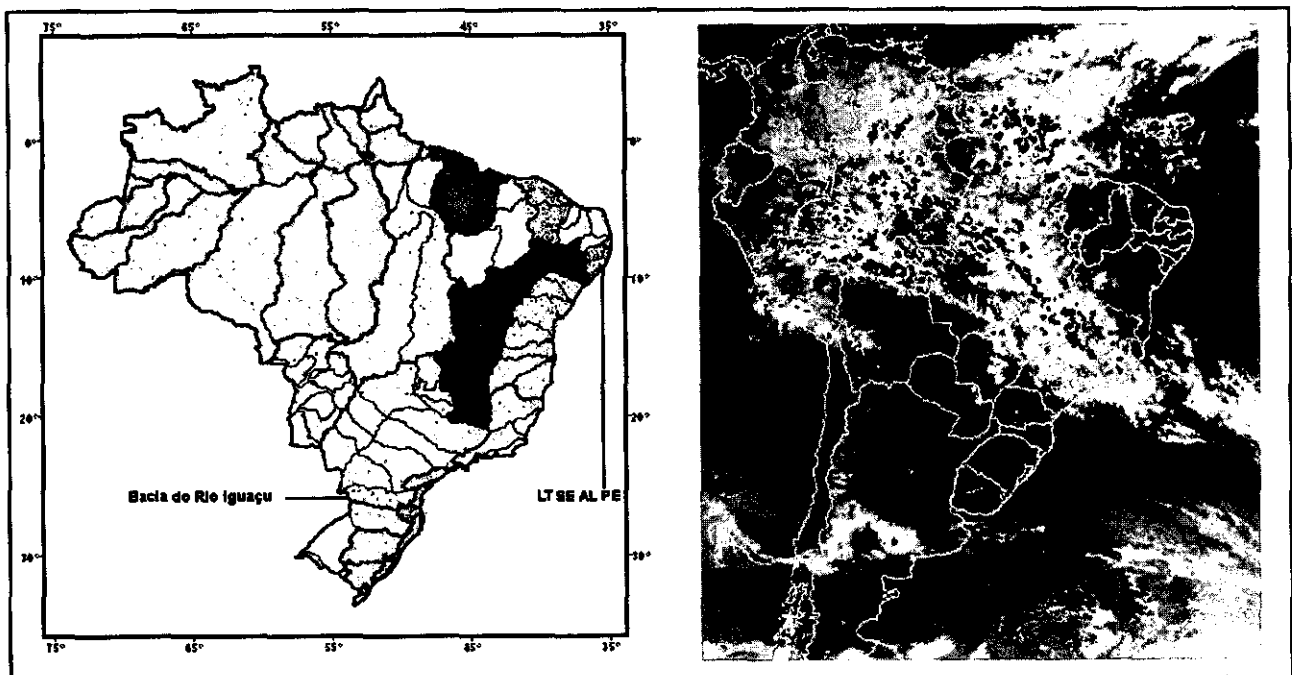


Figura 12: Bacias hidrográficas brasileiras (esquerda) e mapa de chuva instantânea (direita) obtido pelo Modelo Hidroestimador

O período chuvoso mostra que quase todas as bacias hidrográficas das regiões sul, sudeste e nordeste, com exceção de algumas bacias do litoral nordestino, apresentam coeficientes de correlação maiores do que 0.60 e erro médio quadrático (*RMSE*) menor ou inferior a 5 mm/dia. Os *RMSE*'s foram maiores para um pequeno número de bacias, a maioria localizada na região norte do país. Notadamente, esses mesmos locais apresentaram valores de *Desvio Absoluto* elevados (chegando a -10 mm/dia). Nas bacias em questão é possível verificar que suas áreas são maiores que as demais e as mesmas possuem um número de pluviômetros que, além de ser pequeno, não se apresenta bem distribuído dentro das áreas das bacias.

O mesmo não ocorre para locais onde o número de pluviômetros é elevado e a área da bacia é menor. Isto pode ser percebido para bacias localizadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Esses locais apresentam os melhores resultados nas estimativas de precipitação feitas pelo Modelo Hidroestimador, ou seja, altos e significativos valores de *r*, baixos valores de *RMSE* e baixos valores negativos de *Desvio Absoluto*, indicando uma ligeira superestimação nos valores de precipitação calculados pelo modelo.

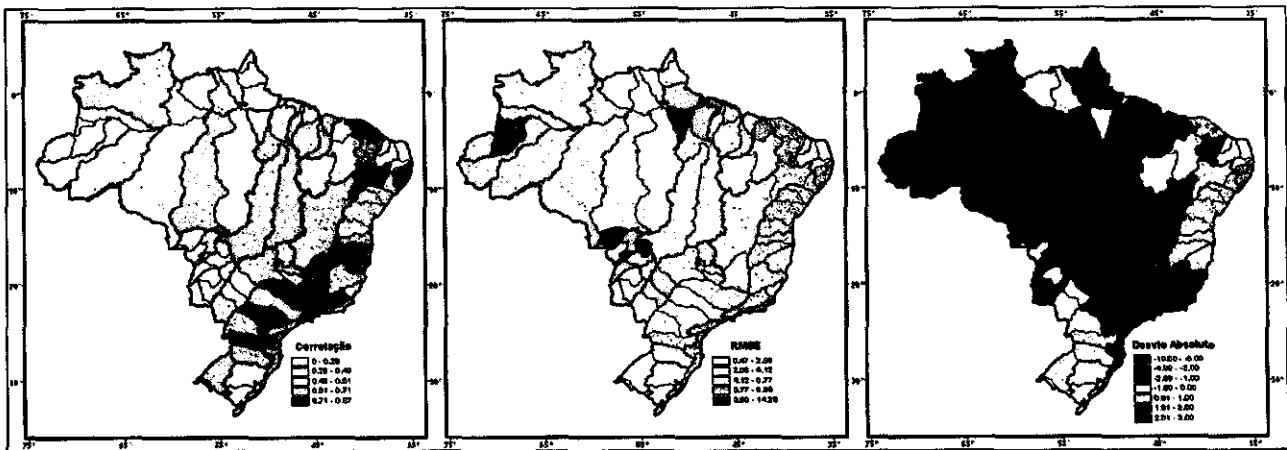


Figura 13: Estatísticas para a estação chuvosa

Para a estação seca, o Modelo Hidroestimador apresenta valores baixos de  $r$  e  $RMSE$  para a maioria das bacias localizadas na região central do país. O *Desvio Absoluto* nesses locais indica que o modelo apresenta uma pequena subestimação na precipitação estimada. Para locais ao norte e ao sul do país, as estatísticas  $r$  e  $RMSE$  aumentam seus valores, porém o *Desvio Absoluto* se mantém baixo indicando a tendência do Modelo Hidroestimador em subestimar a precipitação.

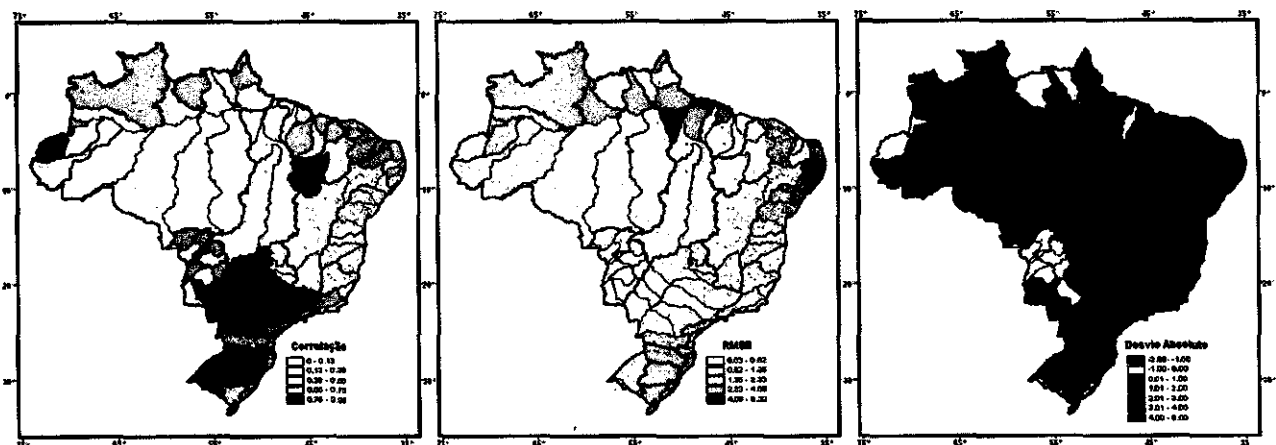


Figura 13: Estatísticas para a estação seca

Esse comportamento diferenciado para as duas estações se dá devido ao fato do Modelo Hidroestimador captar com maior eficiência os eventos de chuvas convectivas. Durante a estação chuvosa, esse tipo de ocorrência é mais freqüente na maior parte do país, enquanto que durante a estação seca esse fenômeno ocorre mais freqüentemente no

extremo norte e no sul do país. O norte do país, por estar localizado no Hemisfério Norte sofre a influência direta da posição da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ), que produz muita chuva de origem convectiva. No sul do país, os sistemas precipitantes são comumente gerados durante a penetração de frentes frias ou deslocamentos de Sistemas Convectivos de Mesoescala (MCS), o que favorece a formação de chuvas predominantemente convectivas.

## **Conclusão**

Os resultados obtidos neste trabalho revelam que o número de pluviômetros em uma determinada bacia é fundamental para se avaliar as estimativas feitas pelo Modelo Hidroestimador. Considerando que o Modelo Hidroestimador mostrou significativa exatidão na captura da precipitação acumulada diária em pequenas bacias, como pode ser visto pelas Figuras 2 e 3, então pode-se concluir que o modelo é eficiente para as demais bacias cujo número de pluviômetros não é suficiente para avaliar o desempenho do modelo. Apesar de algumas estatísticas nesse período mostrarem valores não compatíveis com esta afirmação, isto é resultado do baixo número de pluviômetros que não são representativos para toda a bacia e do baixo desempenho do modelo.

O bom desempenho do Modelo Hidroestimador em capturar a precipitação acumulada em bacias hidrográficas do Brasil é válido para a estação chuvosa. O mesmo não pode ser afirmado para a estação seca, uma vez que o baixo desempenho do modelo é nítido. Isso é confirmado pela análise do caso da Bacia dos Litorais de Sergipe, Alagoas e Pernambuco (LT SE AL PE), no nordeste do país e na Bacia do Rio Iguaçu, no sul do país (ver bacias identificadas na Figura 11,). Esses locais apresentam boa densidade de pluviômetros. No período chuvoso amostrado perceberam-se as melhores estatísticas, ou seja, altos valores de  $r$ , e baixos valores de  $RMSE$  e *Desvio Absoluto*. O contrário aconteceu para no período seco que apresentou baixos valores de  $r$  e altos valores de  $RMSE$  e *Desvio Absoluto*.

Foi percebido, também, que durante a estação chuvosa o Modelo Hidroestimador tende a superestimar levemente a precipitação. Esse efeito é resultado da grande



ocorrência de nuvens cirrus decorrentes da grande atividade convectiva, característica marcante dessa estação. No período seco, apesar de ser a estação seca, a subestimação do Modelo Hidroestimador é decorrente da pouca eficiência do algoritmo em detectar os poucos eventos de chuva (em sua maioria estratiforme) que ocorrem principalmente na região central do país.

## **Bibliografia**

ANA, Agência Nacional das Águas; COPPETEC, Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos. Bacia do Rio Paraíba do Sul: Planos de Recursos Hídricos – Fase Inicial da Cobrança pelo Uso da Água. Rio de Janeiro: Laboratório de Hidrologia e Estudos do Meio Ambiente da COPPE/UFRJ, 2002.

ANA, Agência Nacional das Águas. Águas Subterrâneas. Brasília: Superintendência de Informações Hidrológicas – SIH; 2002.

AVILA, Ana Maria Heuminski de. Estimativa de Precipitação em Regiões Tropicais Utilizando Imagens do Satélite GOES 12. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola, na área de concentração em Água e Solo) – Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

BATTAN, Louis J. O Radar Observa o Tempo. São Paulo: Edart, 1975.

BRASIL. Lei nº9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.

BRASIL. Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA, entidade federal de implementação da Política Nacional de

Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências.

CARVALHO, Daniel Fonseca de; SILVA, Leonardo Duarte Batista da. Ciclo Hidrológico. Disponível em: <[http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA\\_HIDRO-Cap2-CH.pdf](http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA_HIDRO-Cap2-CH.pdf)>. Acesso: Janeiro, 2008.

CAMPOS, Jander Duarte. Desafios do Gerenciamento dos Recursos Hídricos nas Transferências Naturais e Artificiais Envolvendo Mudança de Domínio Hídrico. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós Graduação de Engenharia, COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FERREIRA, Nelson Jesus. Utilização de Imagens Transmitidas por Satélites Meteorológicos. Disponível em: <<http://mtcm16.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marciana/2005/01.06.11.41/doc/cap10.pdf>>. Acesso, Janeiro 2008

MARSHALL, J. S.; PALMER, W. M. K.. The distribution of raindrops with size. J.Meteor., v. 5, p. 165-166, 1948.

SERRICCHIO, Claudio, et al. Prêmio CAIXA melhores práticas em gestão local 2003-2004: O CEIVAP e a gestão integrada dos recursos hídricos da bacia do rio Paraíba do Sul. Um relato da prática. Rio de Janeiro: GESTEC/CAIXA, 2005.