



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

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

Julho de 2009

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

INTRODUÇÃO	1
CICLO HIDROLÓGICO	1
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL.....	2
ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO	5
METODOLOGIA	8
RESULTADOS.....	10
BIBLIOGRAFIA.....	34

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 geostacionário 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 Km² 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).

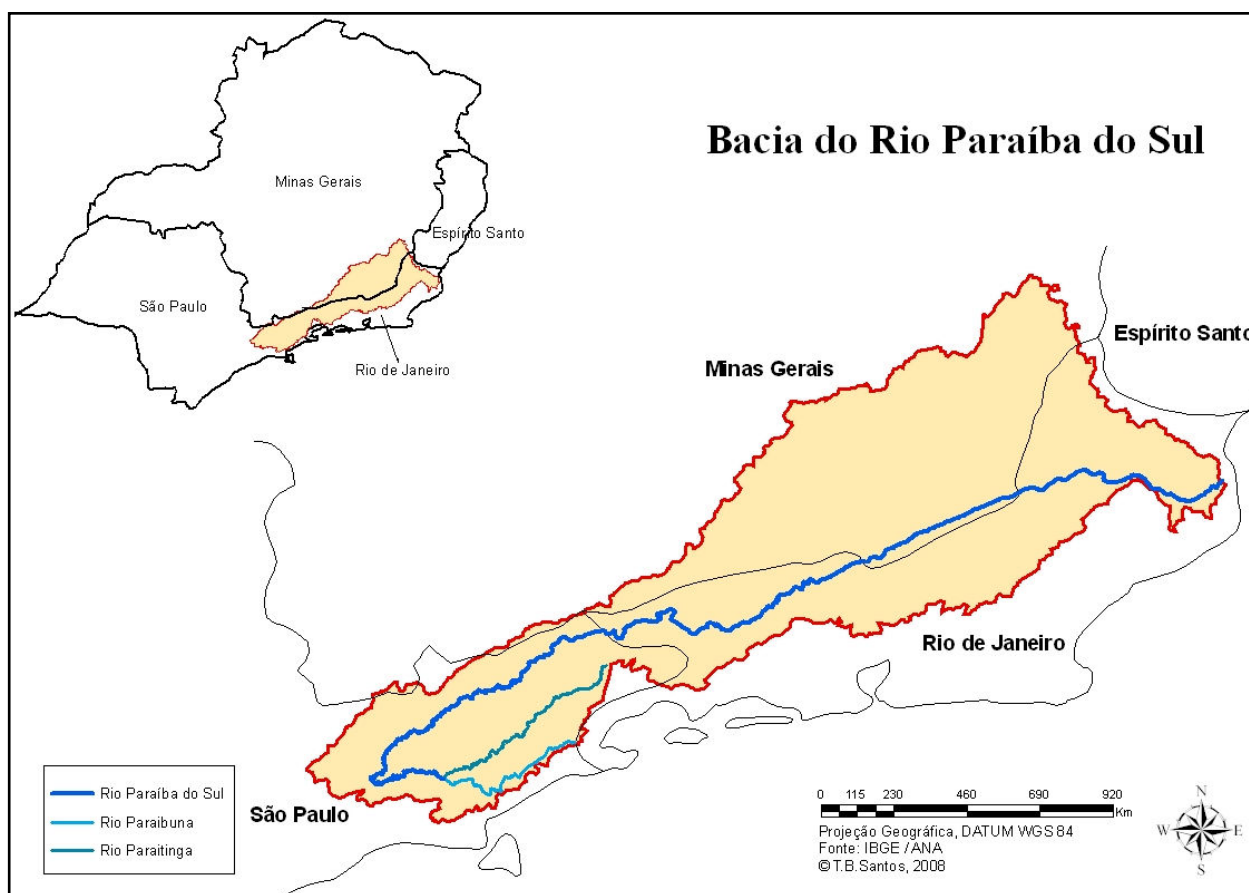


Figura 1: Localização da Bacia do Rio Paraíba do Sul

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 (retrospalhamento) 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.

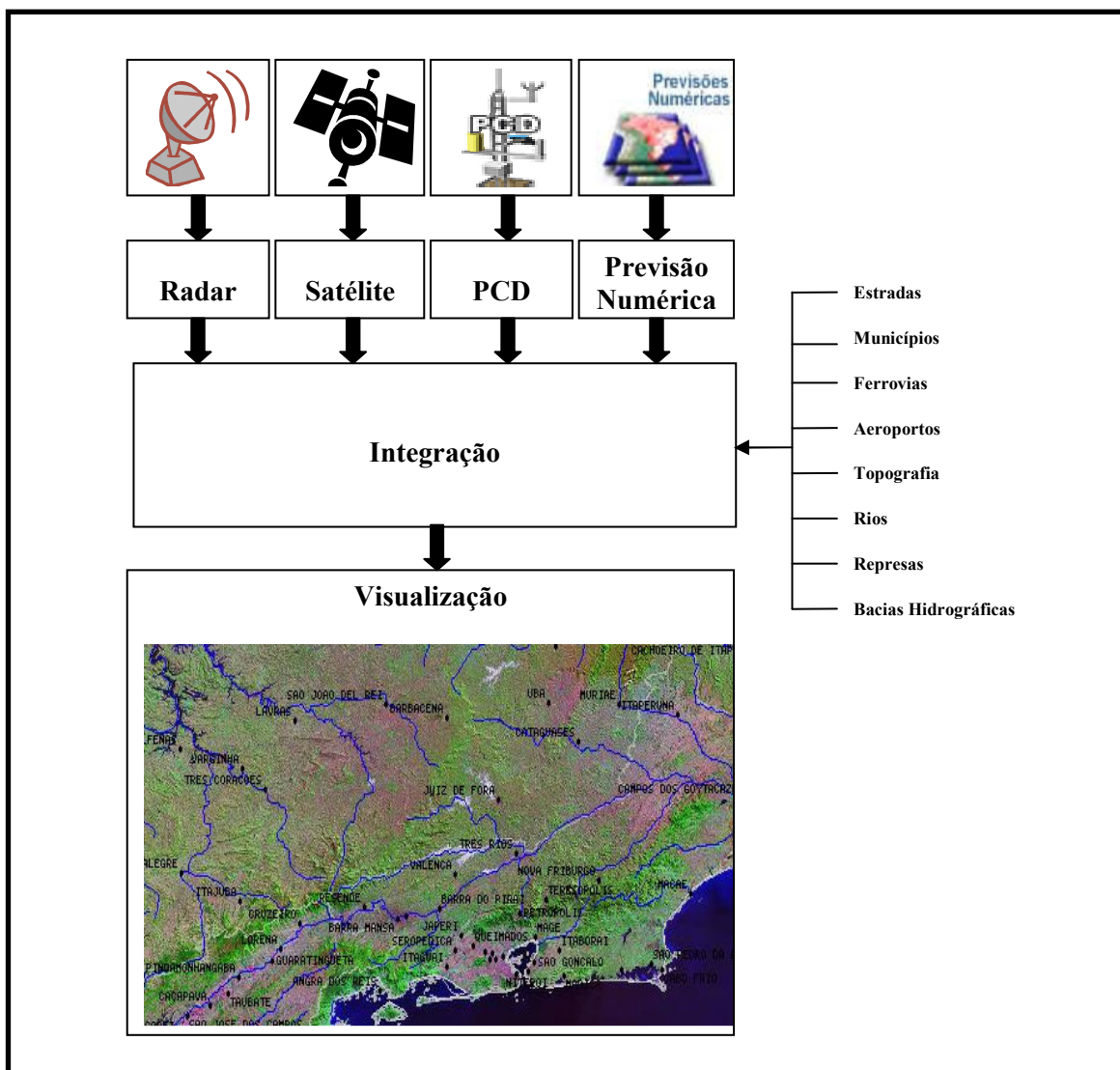


Figura 3: Esquema conceitual do Sistema HIDROBAP

Resultados

Produto 1 - Análise do Desempenho do Modelo Hidroestimador para Antioquia-Colômbia

A Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) em 2008 iniciou um projeto conjunto com as Empresas Publicas de Medellín (Colômbia), que é responsável pelo complexo hidrelétrico de Antioquia – Colômbia. Coube a Divisão fornecer o monitoramento por satélite das precipitações das bacias integrantes desse complexo.

Diante disso foi possível ter acesso a dados históricos de precipitação de algumas microbacias do Departamento de Antioquia – Colômbia.

O complexo hidrelétrico de Antioquia também enfrenta problemas referentes às precipitações intensas em suas bacias hidrográficas. Para minimizar os impactos dos eventos extremos foi construído um modelo hidrológico que monitora a precipitação e possíveis enchentes na bacia. Os dados de entrada do modelo são pluviômetros.

Considerando-se a confiabilidade desses dados, sua alta densidade e distribuição; e ao tipo de chuva da região, essa área configura-se como ideal para analisar o Desempenho do Modelo Hidroestimador. Estudos anteriores demonstraram que seu desempenho, em estimar chuva para a bacia do rio Paraíba do Sul é satisfatório para estação chuvosa e não confiável para a estação seca. Vale ressaltar que, devida à latitude, as características topográficas e a proximidade com o oceano, as chuvas da região de Antioquia são formadas por sistemas convectivos e há precipitação abundante o ano todo.

Área de Estudo

Para o presente estudo utilizou-se a região das bacias hidrográficas, responsáveis pela alimentação do complexo hidrelétrico de Antioquia, Departamento da Colômbia e de sua vizinhança. Essas bacias estão localizadas entre os meridianos $75,5^{\circ} \text{ W}$ e $74,5^{\circ} \text{ W}$; e entre as latitudes $5,5^{\circ} \text{ N}$ e $6,5^{\circ} \text{ N}$, sobre as encostas orientais da Cordilheira Central, na região andina. Vale salientar que esta região é o maior complexo hidrelétrico da Colômbia.

O território colombiano está dividido em região montanhosa a oeste e plana a leste. Um terço da região ocidental é constituído pela Cordilheira dos Andes. A região andina pertencente à Colômbia, inicia-se no Departamento de Nariño, tomando sentido sudoeste a norte-nordeste. Nessa parte do Departamento se forma o Maciço de Los Pastos, um paredão rochoso denominado Cordilheira Ocidental. Nesta mesma região, nos Departamentos de Cauca e Huila, no sentido leste, está o maciço Colombiano que se bifurca e dá origem as Cordilheiras Central e Oriental. Essas cadeias montanhas formam os vales inter-andinos e modelam a drenagem fluvial do país. A vertente ocidental é responsável pela drenagem do rio Cauca, que por sua vez deságua no

Magdalena; já a vertente central drena as águas do rio Magdalena; e por fim a vertente oriental drena o rio Orinoco. As cordilheiras ocidental e central praticamente desaparecem em 8° de latitude norte. Essas cadeias montanhosas junto com as Serras de Nevada de Santa Maria e a Serra de Macarena, assim como outras menores, definem as características topográficas da Colômbia.



Figura 4: Localização das bacias do complexo hidrelétrico de Antioquia - Colômbia

Elaboração do Banco de Dados

Os primeiros dados a serem inseridos no banco foram às imagens do acumulado diário geradas pelo Modelo Hidroestimador. O acumulado diário é o somatório de todas as estimativas de precipitação instantâneas das 12:00 hs GMT do dia anterior as 12:00 GMT do dia atual. Tais imagens estavam compactadas individualmente e arquivadas em fitas magnéticas. Foi feita a leitura dessas fitas e compiladas as imagens do período de 2005 a 2007. No total obteve-se 1095 imagens, que posteriormente foram

descompactadas e armazenadas em um disco rígido externo. Todas as imagens estão no formato binário. Como as imagens representam toda a América do Sul, foi elaborado um algoritmo responsável por identificar e recortar o território da Colômbia em cada imagem e por gerar um novo arquivo binário da área recortada. O algoritmo foi implementado em linguagem IDL (Interactive Data Language).

Os dados pluviométricos coletados por instrumentos meteorológicos de campo também foram inseridos ao banco. Tais informações foram adquiridas por 127 equipamentos, dentre eles: pluviógrafos, pluviômetros convencionais e pluviômetros de báscula. Para cada instrumento obteve-se um arquivo texto com dados históricos. O arquivo é composto por 6 colunas, que representam respectivamente: ano, mês, dia, hora, precipitação acumulada horária em mm e tipo de equipamento. Para que tais dados fossem compatíveis com os do Hidroestimador e que pudessem ser espacializados, foram gerados novos arquivos texto para cada dia do período de estudo. Primeiramente converteu-se a hora local da Colômbia para o horário GMT e posteriormente somou-se a precipitação horária das 12hs GMT do dia anterior as 12hs GMT do dia atual. Após a determinação da precipitação diária foram obtidos 127 arquivos texto. Cada arquivo tinha 5 colunas que representavam respectivamente: ano mês, dia, precipitação diária em mm e tipo de equipamento. Foi feito um programa em IDL para unificar todas as precipitações coletadas pelos instrumentos, de maneira que, a precipitação diária estimada pelos 127 aparelhos, estejam somente em um único arquivo texto. Sendo assim obteve-se 1095 arquivos com 4 colunas (respectivamente: tipo de aparelho, latitude, longitude, precipitação em mm) e 127 linhas (número de aparelhos).

Outra informação importante e a última a ser inserida no bando de dados foram os limites da área de estudo. Os limites são vetores e estão em um arquivo shapefile. O shapefile foi convertido para raster assumindo a mesma resolução espacial das imagens do Hidroestimador e salvo em formato geotiff. Daqui em diante esse arquivo será mencionado como “máscara”.

Dados pluviométricos das Bacias

Foram utilizadas duas técnicas distintas para obter os dados pluviométricos para a área das bacias. Elas estão descritas a seguir:

Média total da bacia

Este método leva em conta a área total das bacias em estudo. Por meio dele é possível extrair a precipitação média diária da localidade em questão. Para cada dia foi compilado um arquivo texto com as precipitações coletadas pelos equipamentos meteorológicos. Desse arquivo, com dados de precipitação acumulada diária dos 127 pluviômetros, foram extraídas as coordenadas dos equipamentos. Posteriormente a localização de cada equipamento foi plotada sobre a máscara (arquivo geotiff que contém os limites da área de estudo). Foram utilizadas somente as informações dos equipamentos que estão dentro da área de estudo. A expressão matemática utilizada para interpolar os dados dos equipamentos 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_i = precipitação acumulada diária pluviômetro

n = número de pluviômetros no dia

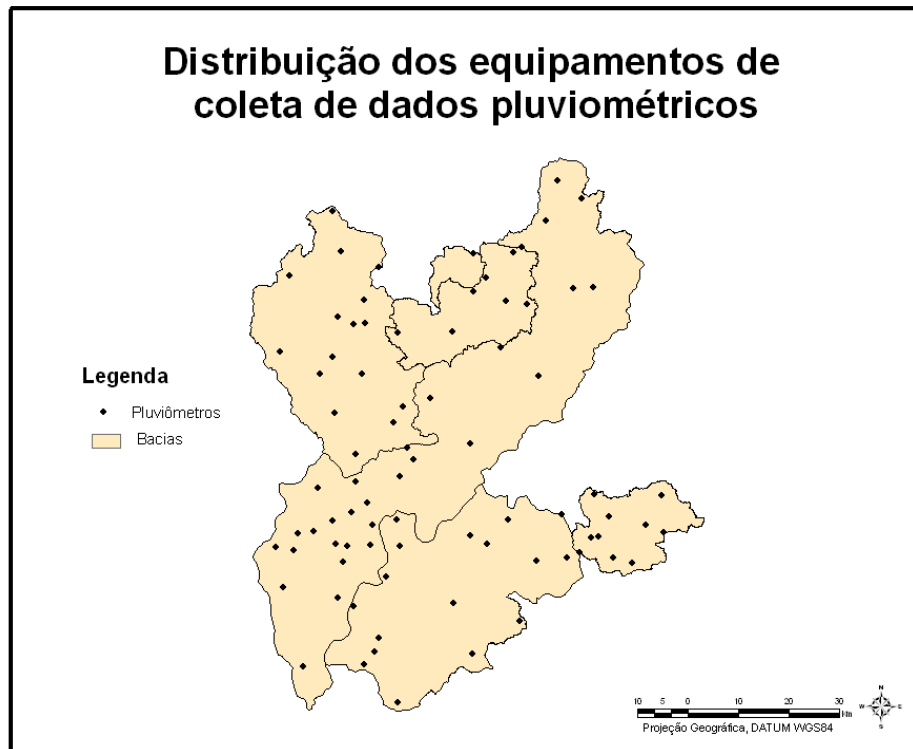


Figura 5: Mapa da distribuição de pluviômetros no complexo hidrelétrico de Antioquia

Polígonos de Thiessen

O método Polígono de Thiessen faz 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 3 e 4 ilustram a construção dos polígonos de Thiessen:

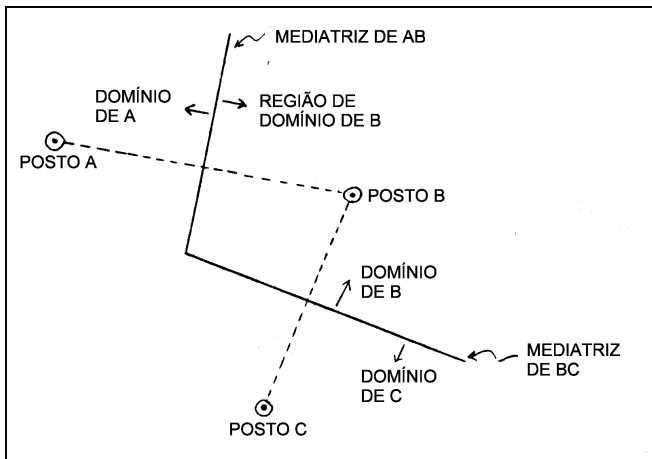


Figura 6: Construção dos Polígonos de Thiessen

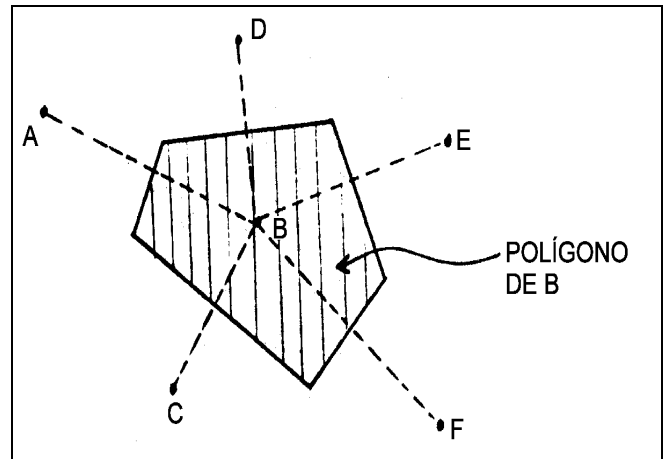


Figura 7: Área de influência do pluviômetro

As áreas de influência de cada um dos 81 pluviômetros das bacias do complexo hidrelétrico de Antioquia foram definidas. A ponderação dos dados de precipitação mensurados por pluviômetros foi feita para cada dia da série anual e 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 Km² do respectivo polígono, dentro da bacia

A é a área total da bacia.

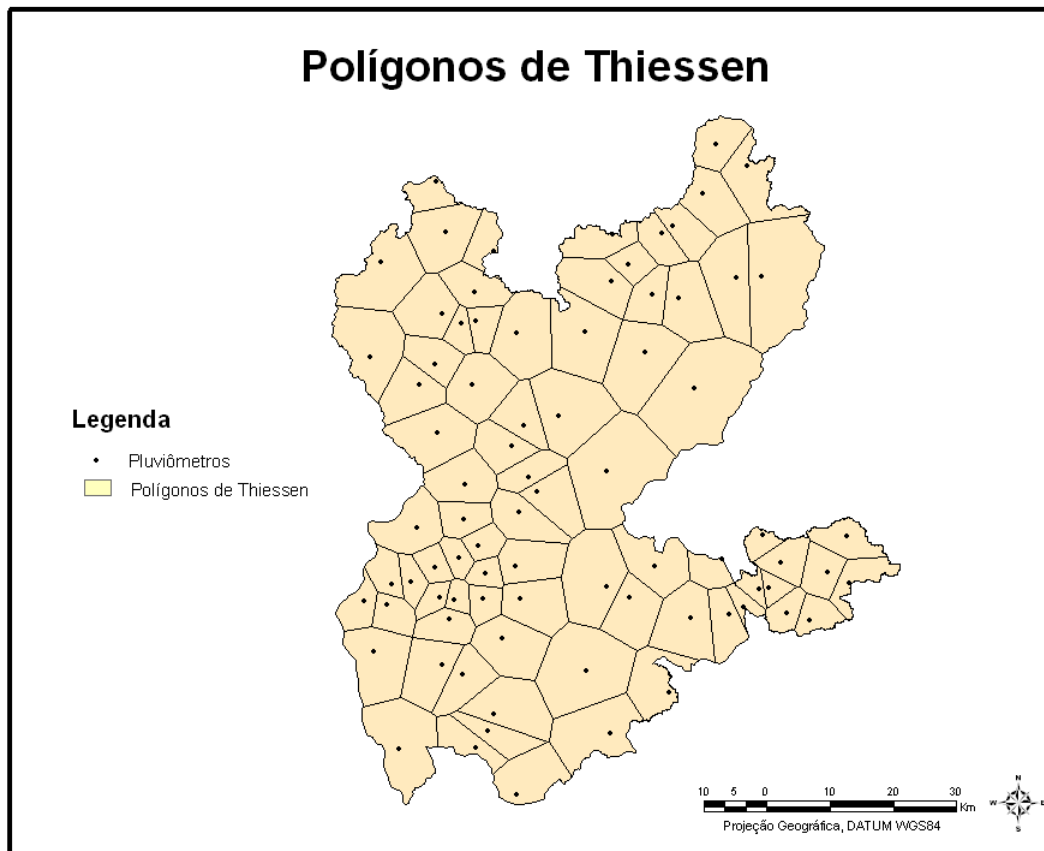


Figura 8: Polígonos de Thiessen para as bacias do complexo hidrelétrico de Antioquia

Análise do Modelo Hidroestimador

Uma ferramenta com grande potencial para monitorar as precipitações sobre bacias hidrográficas 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.

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 6 bacias de Antioquia - Colômbia e seus respectivos pluviômetros.

A fim de se demonstrar o desempenho do Modelo Hidroestimador em estimar chuva para as bacias do complexo hidrelétrico de Antioquia foi feita, de maneira preliminar, comparação dos dados de precipitação por satélite com os de superfície. Vale salientar que os dados de superfície, por serem pontuais, foram obtidos pelo método *média total da bacia* e pelos polígonos de Thiessen.

As análises preliminares do desempenho do Modelo Hidroestimador para as bacias do complexo hidrelétrico de Antioquia 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 9a apresenta o diagrama de dispersão entre o Pluviômetro e Hidroestimador para a série anual.

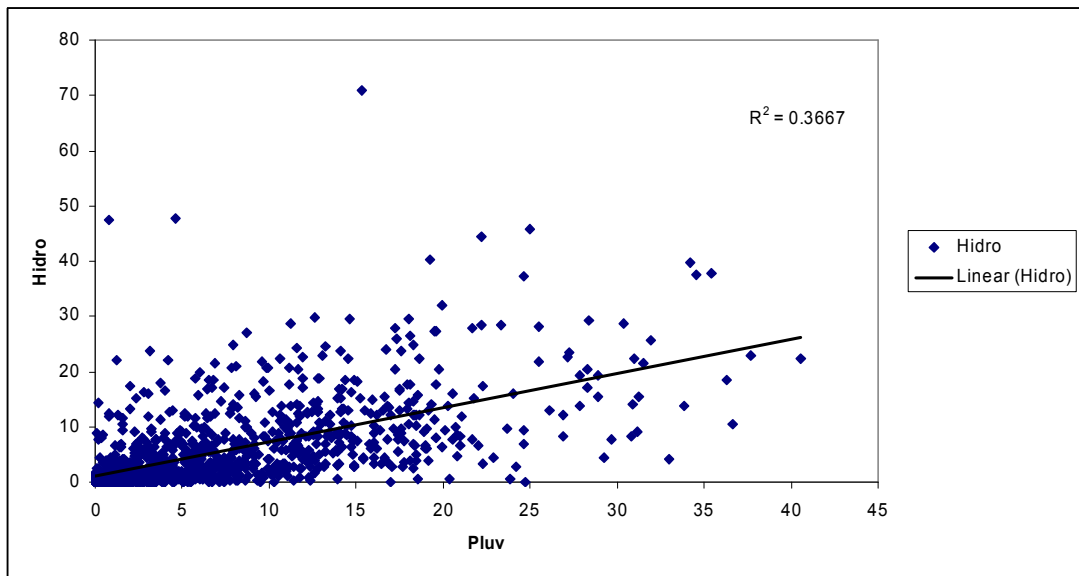


Figura 9a: Gráfico de dispersão Pluviômetro x Hidroestimador, série anual

A série anual apresentou 0.6055 de correlação, 0.2228 de viés e 4.3453 de erro médio quadrático.

A Figura 9b apresenta o diagrama de dispersão entre o Pluviômetro e Hidroestimador para a estação seca.

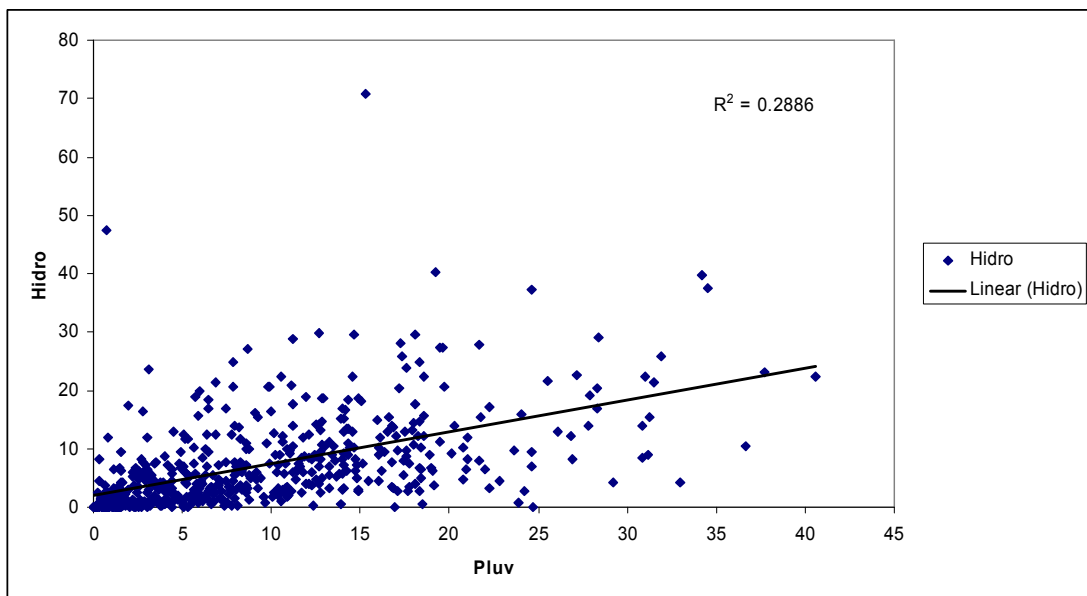


Figura 9b: Gráfico de dispersão Pluviômetro x Hidroestimador, estação chuvosa.

Já estação chuvosa teve 0.5371 de correlação, 0.2389 de viés e 5.28025 de erro médio quadrático.

A Figura 9c apresenta o diagrama de dispersão entre o Pluviômetro e Hidroestimador para a estação seca.

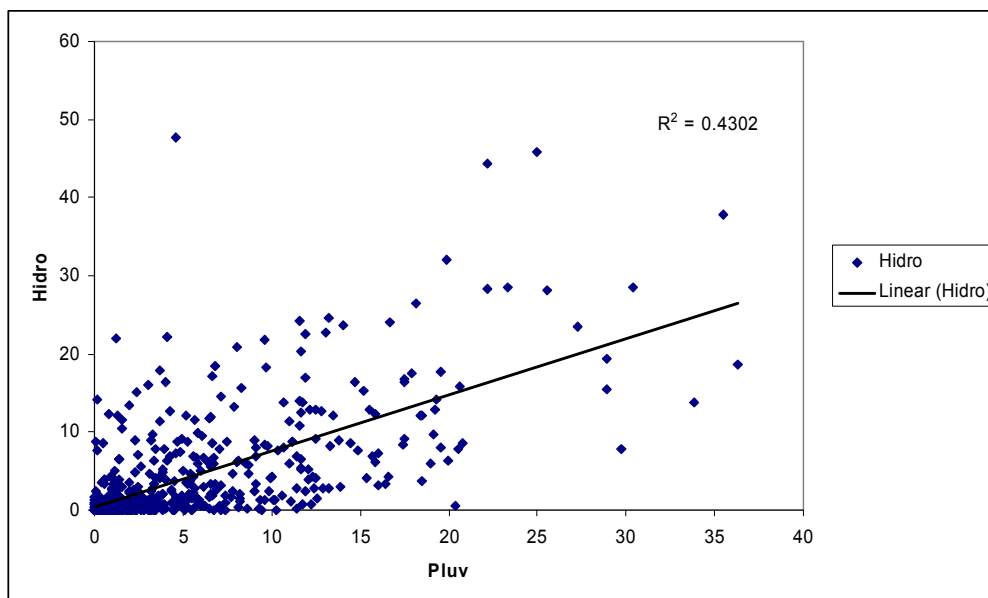


Figura 9c: Gráfico de dispersão Pluviômetro x Hidroestimador, estação seca.

Quanto a estação seca obteve-se 0.6558 de correlação, viés de 0.1937, erro médio quadrático de 3.4088.

Correções das imagens do Hidroestimador

Após determinar qual método é mais apropriado para fazer comparações entre os dados de superfície e os de satélite, foram feitas análises para o período chuvoso e seco dos anos de 2005 e 2006 e para todos os dias dos dois anos. Obtido os resultados, determinou-se, por regressão linear simples, uma equação de correção das imagens de 2007 geradas pelo Hidroestimador.

Depois de serem corrigidas, elas foram submetidas a análises de desempenho pelo método *Média total da bacia*.

Segue abaixo os gráficos de dispersão e as equações de correção:

A Figura 10a apresenta o diagrama de dispersão entre o Pluviômetro e Hidroestimador para 2005 e 2006.

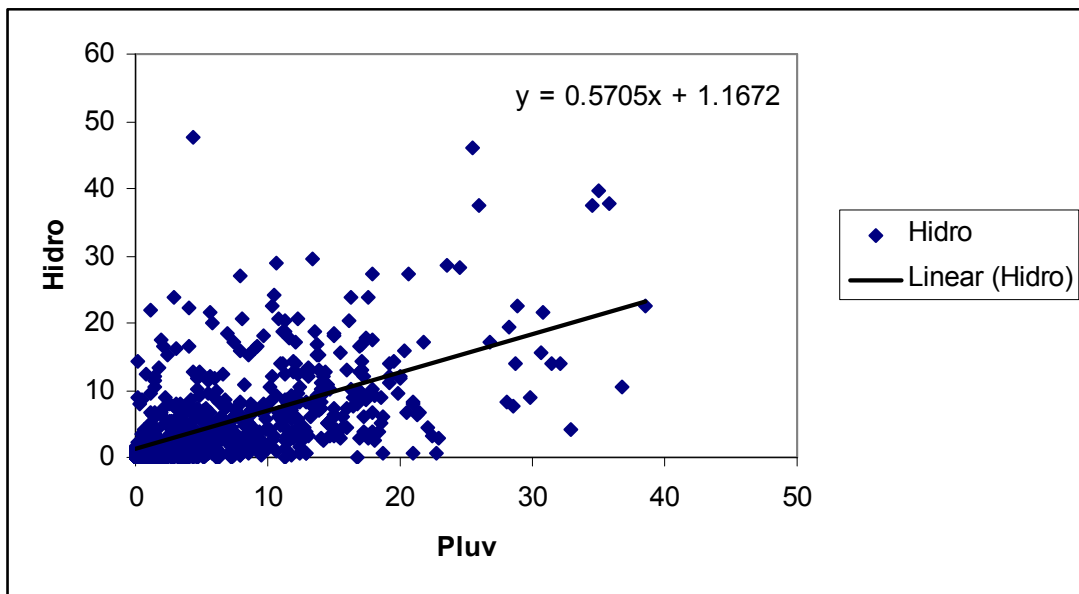


Figura 10a: Gráfico de dispersão Pluviômetro x Hidroestimador para 2005 e 2006.

A Figura 10b apresenta o diagrama de dispersão entre o Pluviômetro e Hidroestimador para estação chuvosa.

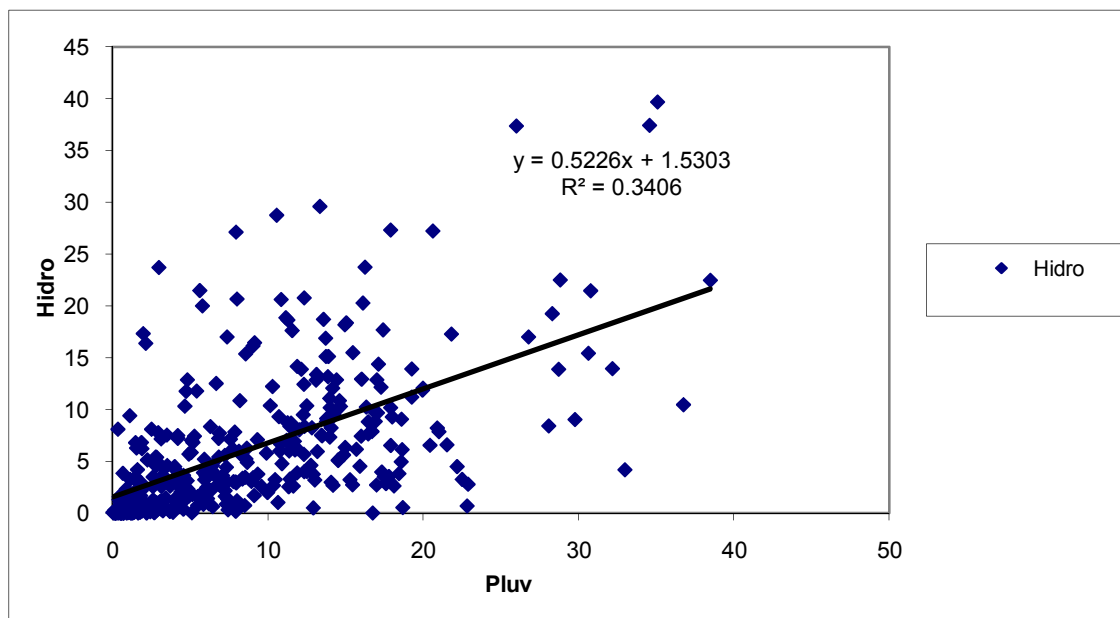


Figura 10b: Gráfico de dispersão Pluviômetro x Hidroestimador para a estação chuvosa.

A Figura 10c apresenta o diagrama de dispersão entre o Pluviômetro e Hidroestimador para estação seca.

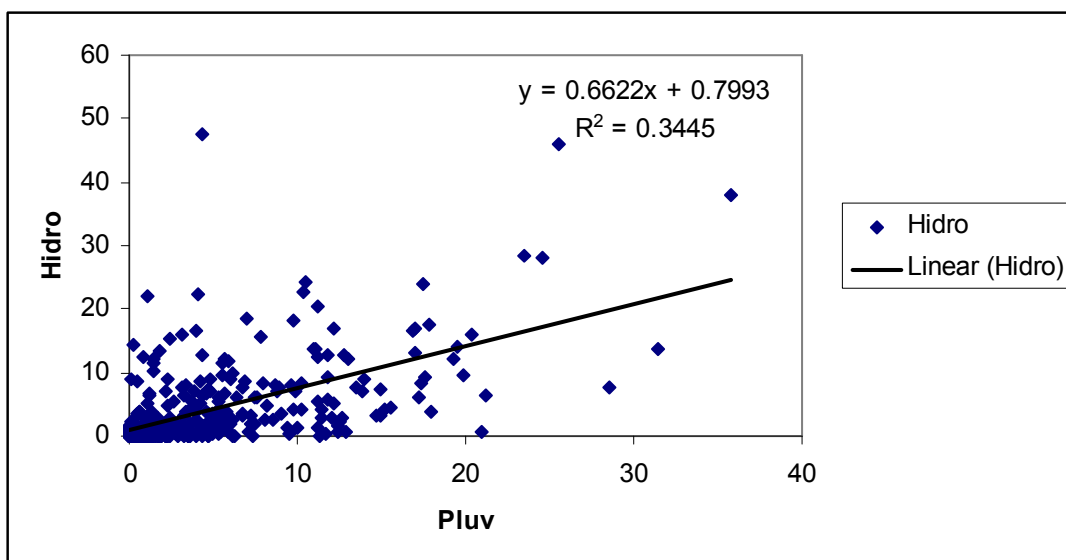


Figura 10c: Gráfico de dispersão Pluviômetro x Hidroestimador para a estação seca.

Resultados pós-correção

O método de correção híbrida dos dados gerados pelo Modelo não demonstrou resultados satisfatórios. Obteve-se a mesma correlação, porém aumentaram-se os erros absolutos e quadráticos.

Segue abaixo gráficos de dispersão pós-correção:

A Figura 11a apresenta o diagrama de dispersão entre o Pluviômetro e Hidroestimador para o ano de 2007.

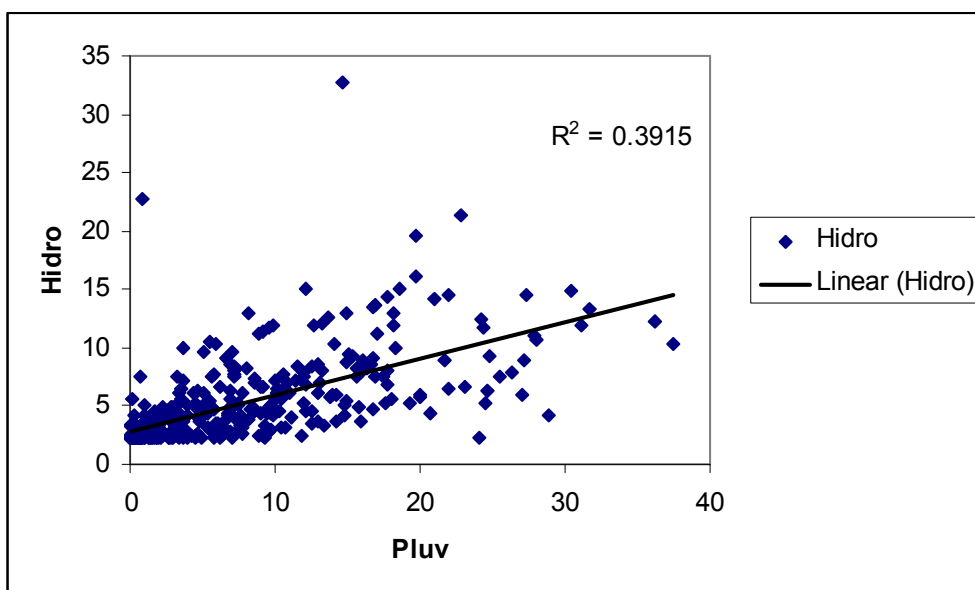


Figura 11a: Gráfico de dispersão Pluviômetro x Hidroestimador para o ano de 2007.

A Figura 11b apresenta o diagrama de dispersão entre o Pluviômetro e Hidroestimador para a estação chuvosa de 2007.

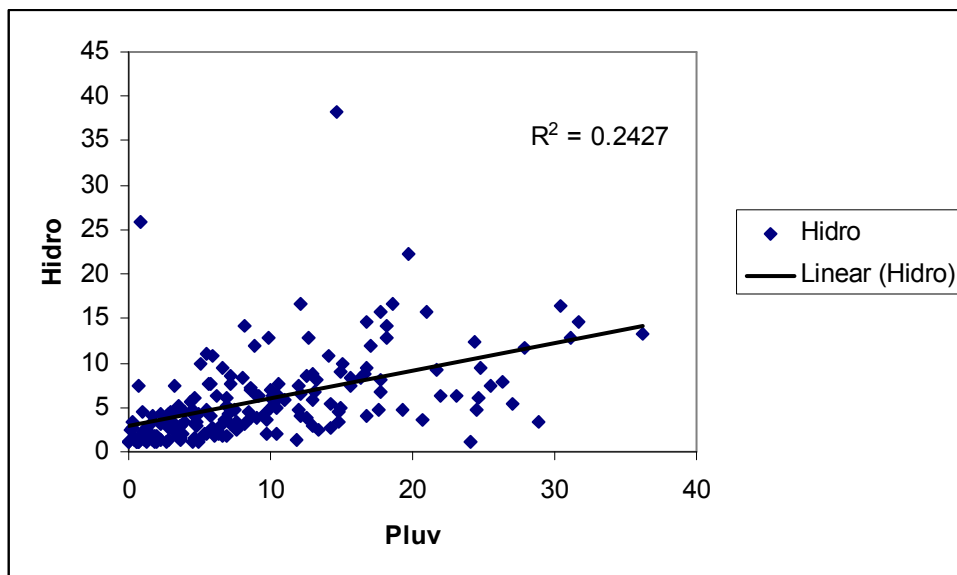


Figura 11b: Gráfico de dispersão Pluviômetro x Hidroestimador para a estação chuvosa de 2007.

A Figura 11c apresenta o diagrama de dispersão entre o Pluviômetro e Hidroestimador para a estação seca de 2007.

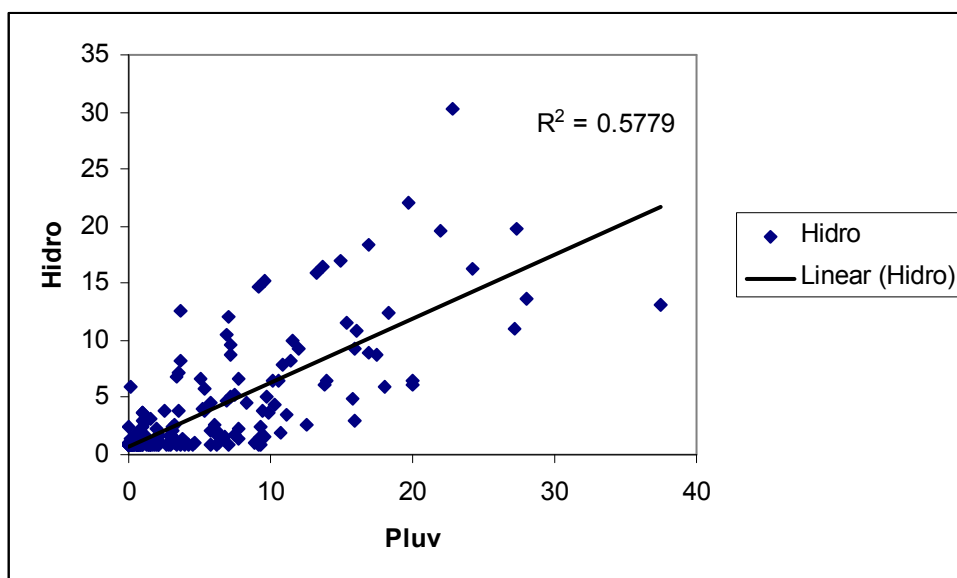


Figura 11c: Gráfico de dispersão Pluviômetro x Hidroestimador para a estação seca de 2007.

Produto 2 – Instalação, validação e análise dos dados gerados por disdrômetros

O disdrômetro é o instrumento utilizado para mensurar o diâmetro e a distribuição de partículas de precipitações. Seus principais componentes são o emissor e o receptor. A fonte emissora e o sensor são alinhados de maneira que se forme entre eles um feixe contínuo de energia. A partir de então, os parâmetros das precipitações são estimados pela interceptação do feixe por partículas precipitadas.



Figura12: Ilustração do funcionamento do disdrômetro.

A Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais adquiriu dois disdrômetros com o intuito de avaliar as estimativas de precipitação geradas por radares meteorológicos. Os equipamentos adquiridos são da Thies Clima, empresa alemã. Seu feixe de energia é invisível aos olhos humanos e possui dimensões de 23 cmx2 cm. O intervalo de granulometria de partículas suportado por ele é de 0,16 mm a 8 mm. Além das dimensões das partículas, o disdrômetro também fornece a velocidade terminal da partícula, a intensidade e a quantidade em milímetros das precipitações.

Validação do Disdrômetro

Para verificar a confiabilidade do equipamento em estimar o diâmetro e a distribuição de partículas foi necessário simular precipitações. Para tanto, utilizou-se de esferas metálicas. Os testes foram feitos com esferas de 3,4,5,6 e 8mm de diâmetro.

Um suporte de madeira foi construído para auxiliar na simulação. A ele foi fixado o disdrômetro. Uma peça móvel continha furos um pouco mais largos do que o

diâmetro das esferas metálicas. Isso possibilitou que as esferas interceptassem o feixe de energia do disdrômetro ao centro.

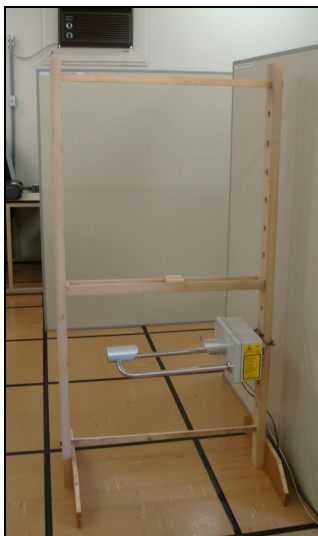


Figura13: Suporte de madeira e disdrômetro utilizados no experimento.

Primeiramente, as precipitações foram simuladas com as esferas de 3 milímetros, posteriormente com as de 4, seguidas das de 5,6 e 8 milímetros. Cerca de 300 esferas de cada diâmetro passaram pelo feixe de energia do equipamento.

Seguem abaixo gráficos da distribuição de frequências dos diâmetros estimados pelo disdrômetro.

Classe -3mm

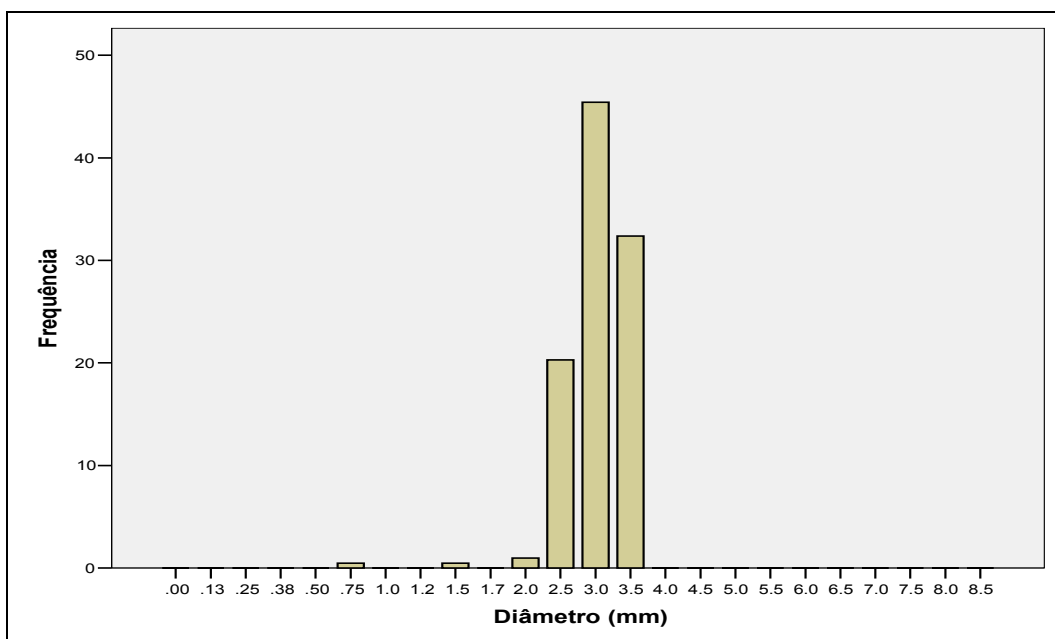


Figura14: Gráfico de distribuição de freqüências. Esferas de 3mm de diâmetro.

Classe - 4mm

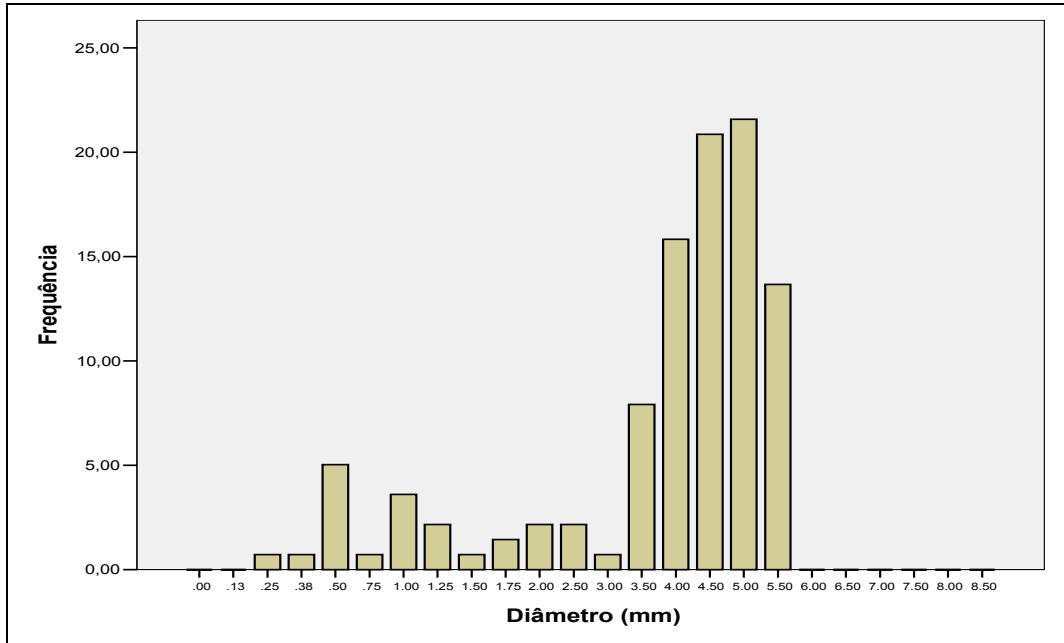


Figura15: Gráfico de distribuição de freqüências. Esferas de 4mm de diâmetro.

Classe - 5mm

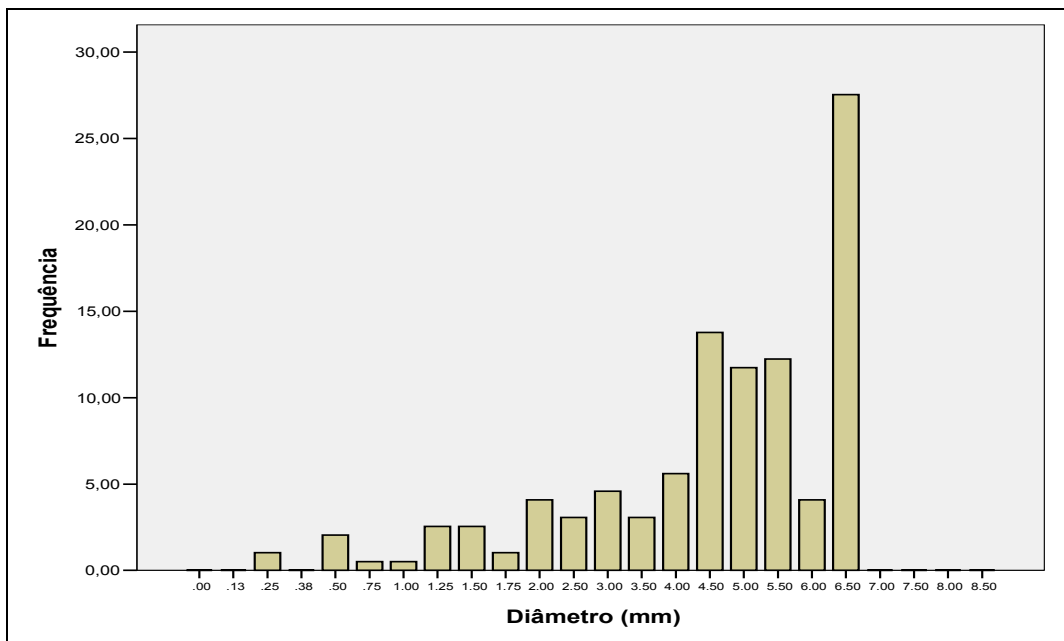


Figura16: Gráfico de distribuição de freqüências. Esferas de 5mm de diâmetro.

Classe - 6mm

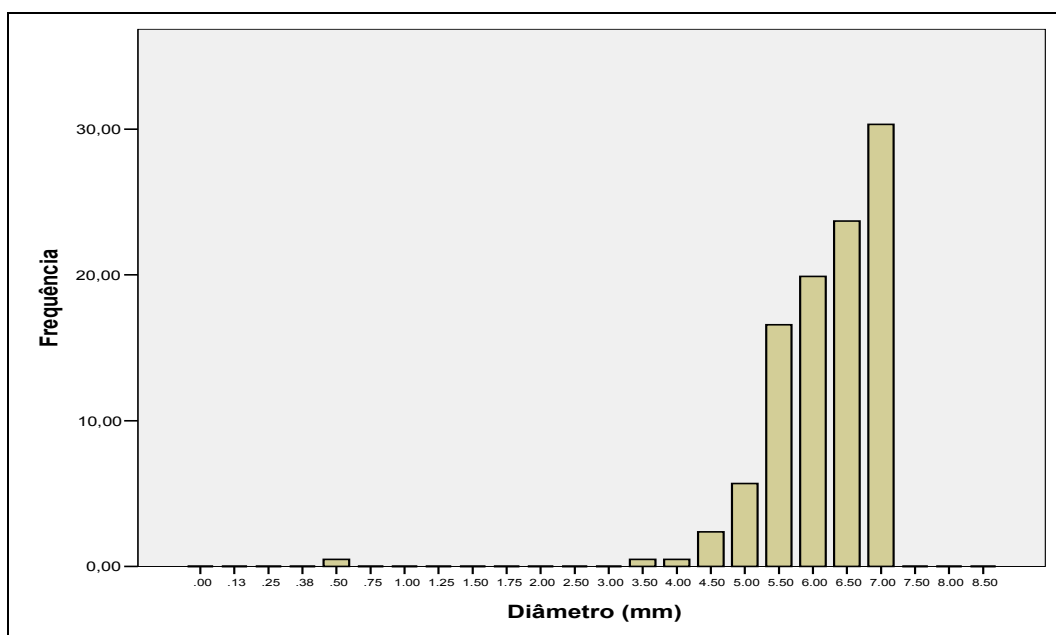


Figura17: Gráfico de distribuição de frequências. Esferas de 6mm de diâmetro.

Classe - 8mm

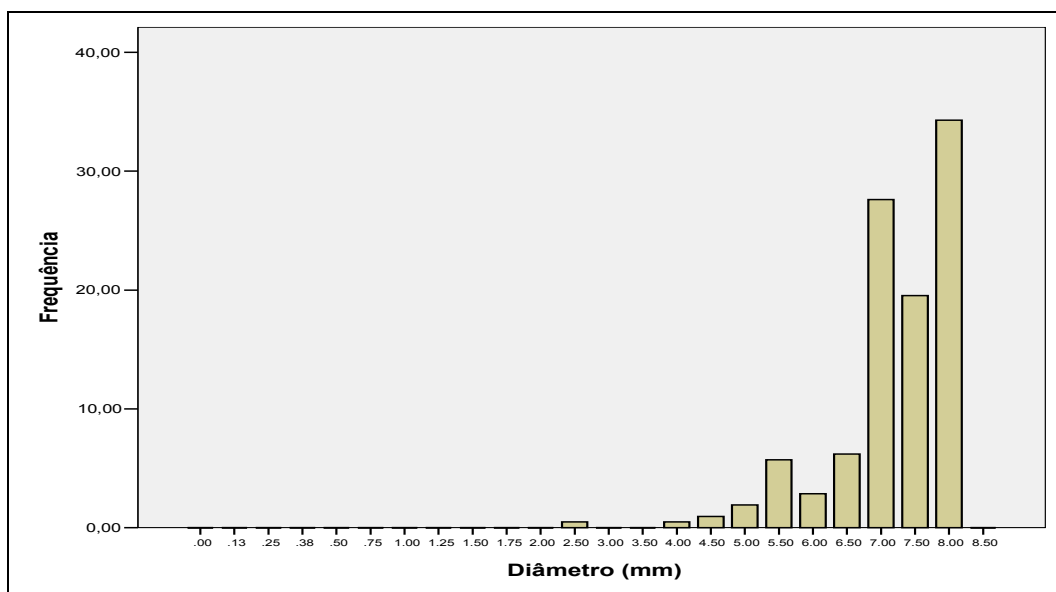


Figura18: Gráfico de distribuição de frequências. Esferas de 6mm de diâmetro.

A qualidade e precisão dos dados estimados pelo disdrômetro foram satisfatórias. Em todos os diâmetros analisados a maior parte das frequências correspondeu ao diâmetro correto. Os desvios apresentados são pequenos e aceitáveis.

Instalação do Disdrômetro

Um disdrômetro foi instalado no Aeroporto Internacional de Guarulhos – São Paulo. Após uma visita ao pátio meteorológico do aeroporto e reuniões com os técnicos da Infraero a instalação do equipamento foi planejada. O equipamento passou por várias análises para se verificar se ele causava algum tipo de interferência nos equipamentos de segurança ao vôo instalados nas proximidades da pista. O disdrômetro foi instalado próximo a um pluviômetro e à pista do aeroporto.



Figura 19: Local de instalação do disdrômetro

Análise dos dados gerados

A precipitação calculada pelo disdrômetro foi comparada com as do pluviômetro da Infraero. O pluviômetro é automático, do tipo báscula, com resolução de 0.1 mm. O período de análise foram os meses de janeiro, fevereiro, março e abril de 2009. As precipitações do disdrômetro inferiores a 0.1 mm foram descartadas das análises. Foram feitos os acumulados de 5, 10, 15, 60 e 120 minutos.

Seguem abaixo gráficos de dispersão do disdrômetro em relação ao pluviômetro.

A) Gráfico de dispersão disdrômetro x pluviômetro. Acumulado de 5 minutos.

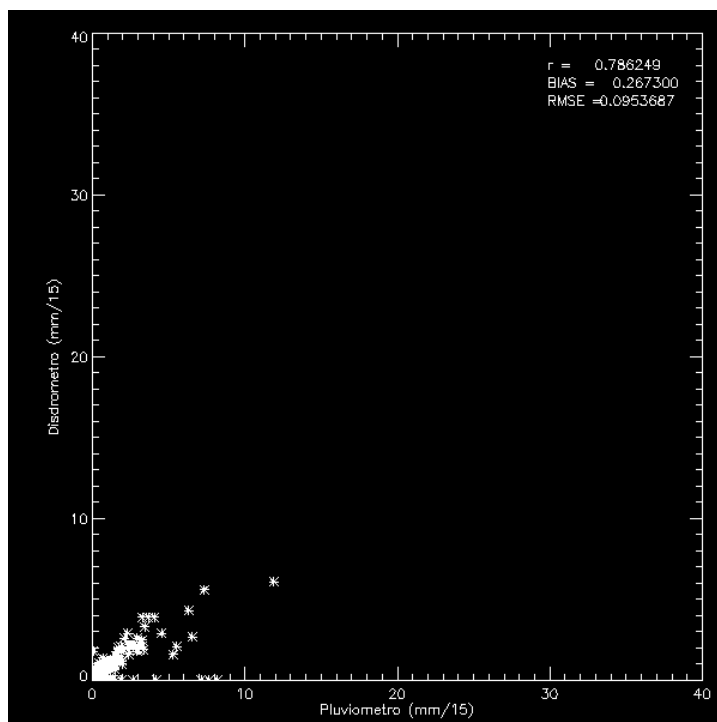


Figura 20: Gráfico de dispersão disdrômetro x pluviômetro.

B) Gráfico de dispersão disdrômetro x pluviômetro. Acumulado de 15 minutos.

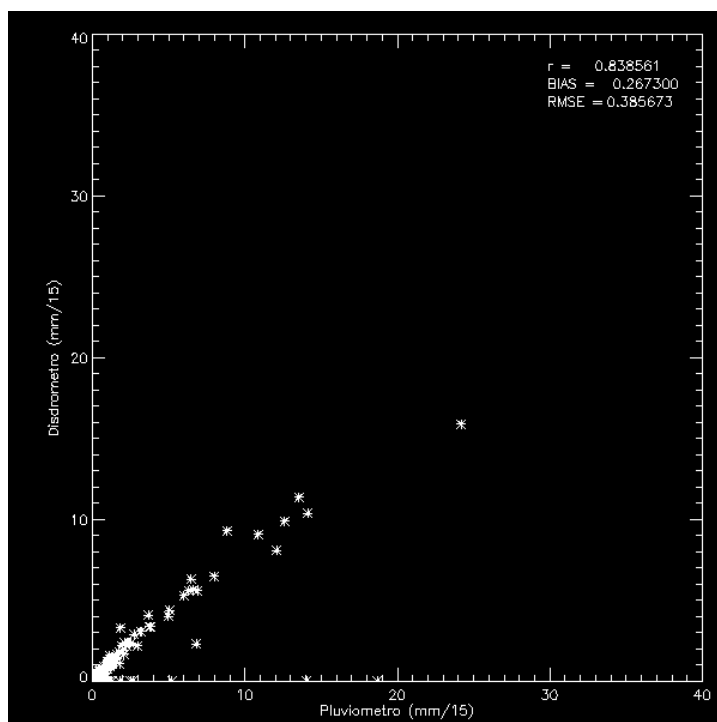


Figura 21: Gráfico de dispersão disdrômetro x pluviômetro

C) Gráfico de dispersão disdrômetro x pluviômetro. Acumulado de 30 minutos.

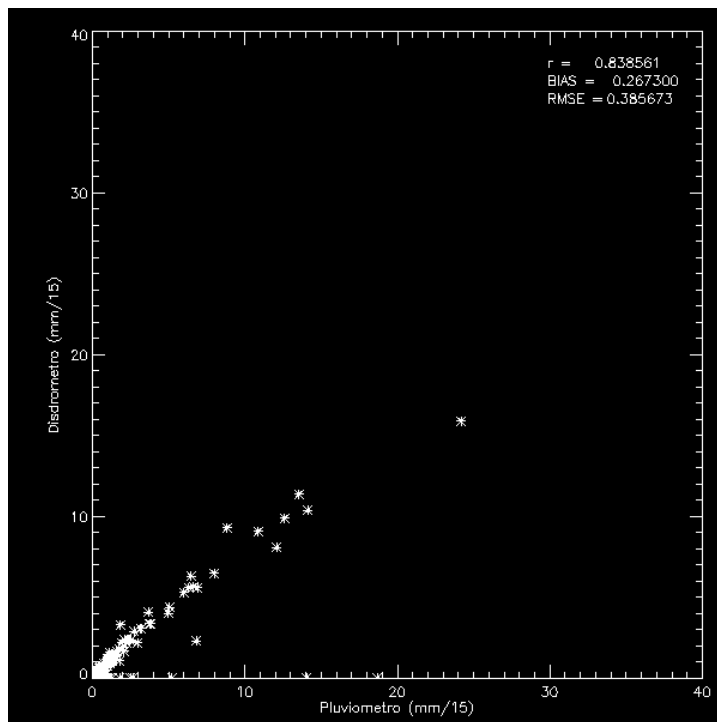


Figura 22: Gráfico de dispersão disdrômetro x pluviômetro

D) Gráfico de dispersão disdrômetro x pluviômetro. Acumulado de 60 minutos.

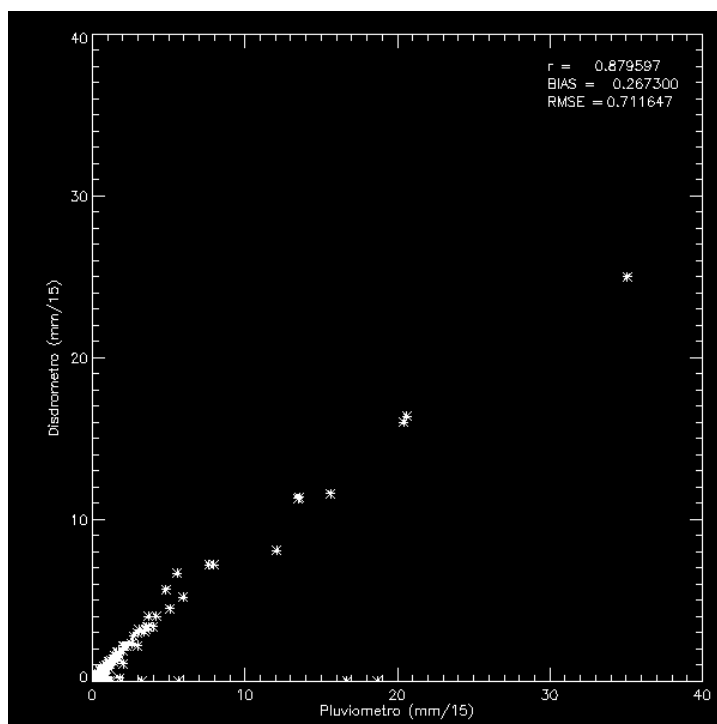


Figura 23: Gráfico de dispersão disdrômetro x pluviômetro

E) Gráfico de dispersão disdrômetro x pluviômetro. Acumulado de 120 minutos.

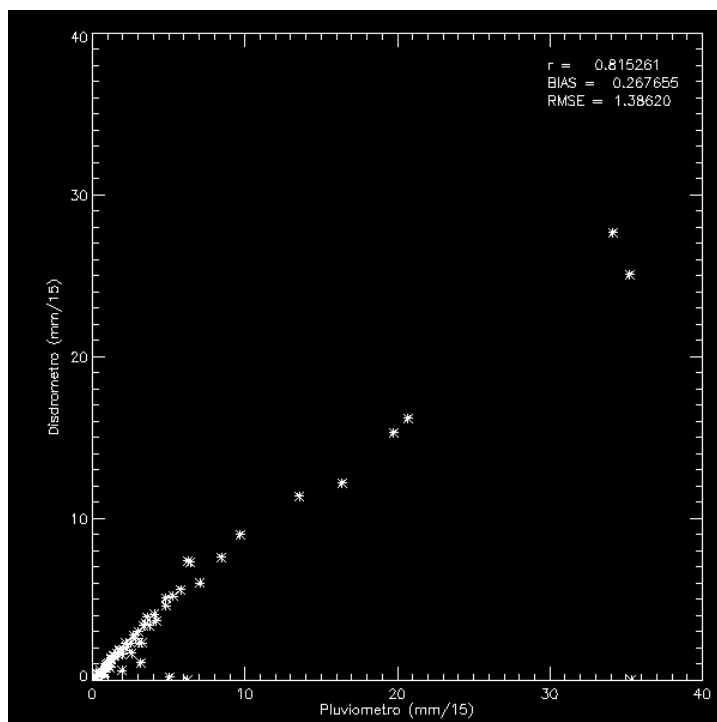


Figura 24: Gráfico de dispersão disdrômetro x pluviômetro

Relação ZR do disdrômetro

O disdrômetro através da distribuição e do diâmetro das partículas de precipitação gera uma relação ZR. Usaram-se os dados de precipitação de janeiro, fevereiro, março e abril para a determinação da relação ZR. A partir disso, estimaram-se precipitações pelas imagens do radar meteorológico de São Roque utilizando-se a relação ZR de Marshall e Palmer(1948) e da adquirida pelo disdrômetro. As precipitações inferiores a 1mm foram descartadas das análises. Recortou-se o pixel correspondente a localização do disdrômetro. Acumularam-se as precipitações horárias. Então compararam-se as precipitações estimadas pelas duas relações e estatísticas foram geradas.

O gráfico abaixo mostra a dispersão entre as precipitações estimadas pelo radar com uso da relação Z/R de Marshall e Palmer ($Z=200 R^{1.6}$).

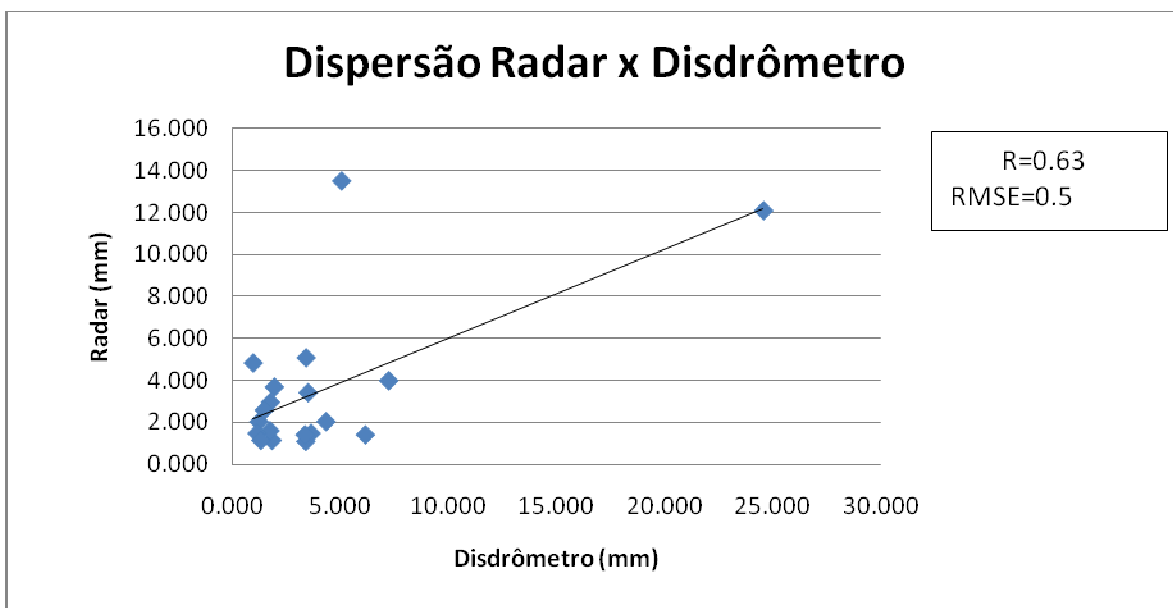


Figura 25: Gráfico de dispersão entre o radar e disdrômetro

O gráfico seguinte mostra a dispersão entre as precipitações estimadas pelo radar com uso da relação ZR do disdrômetro ($Z=181.17 R^{1.31}$)

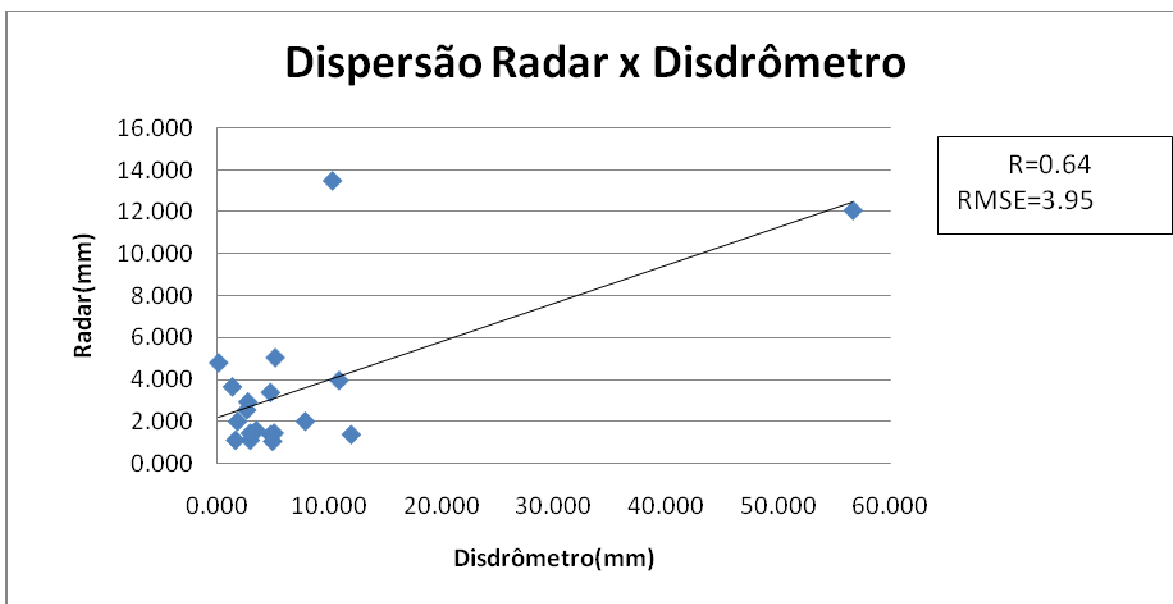


Figura 25: Gráfico de dispersão entre o radar e disdrômetro

Apesar de a série de dados do disdrômetro ser pequena, a relação Z/R obtida pelo disdrômetro apresentou desempenho satisfatório. Os coeficientes de correlação

ficaram bem próximos. Porém, a relação Z/R do disdrômetro apresentou um erro médio quadrático maior que a de Marshall e Palmer.

Conclusão

Os resultados do produto 1 confirmaram o bom desempenho do Modelo Hidroestimador em estimar chuvas para a Bacia do Paraíba do Sul. Em estudos anteriores, o Modelo apresentou bom desempenho na estação chuvosa e não satisfatório para a estação seca. Na região do Vale do Paraíba, as precipitações da estação chuvosa são geralmente convectivas; as da estação seca são produzidas por nuvens de topo quente e geralmente são baixas, o que não ocorre na região do complexo hidrelétrico de Antioquia. Nesta região, o ano todo, as precipitações são convectivas, motivo por que o Hidroestimador demonstrou bom desempenho para todas as estações do ano.

Quanto ao produto 2, os resultados revelaram o potencial do disdrômetro em gerar novas relações Z/R para uso em âmbito regional. É preciso uma série histórica de dados mais consistente para que se possa gerar uma nova relação que apresente melhor desempenho do que a do Marshall e Palmer. A estimativa de precipitação por radares meteorológicos tem vantagens sobre a estimativa por satélites. Pelo radar é possível estimar precipitações estratiformes e convectivas. Observe-se que são raras as falhas ou a falta de imageamento. Porém, sabe-se que a relação Z/R utilizada atualmente tende a superestimar as precipitações convectivas. Isso pode ser amenizado por meio da determinação de uma nova relação Z/R .

Os resultados preliminares do presente trabalho indicam que é viável a implantação de um sistema de monitoramento dos recursos hídricos da bacia do Paraíba do Sul, uma vez que já existem várias ferramentas disponibilizadas gratuitamente, 24 horas por dia, pela DSA, via internet. As limitações das ferramentas de monitoramento dos recursos hídricos podem ser supridas caso as várias técnicas existentes na DSA sejam usadas em conjunto. O HIDROBAP revela-se como uma oportunidade singular para o “Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul – CEIVAP”, órgão local de gestão e planejamento da bacia, que ainda não possui um sistema de monitoramento dos recursos hídricos da bacia do Rio Paraíba do Sul.

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.ufrj.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://mtem16.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.