

SISTEMA DE ALERTA DE CHEIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Luiz Paulo Viana¹; José Edson Falcão de Farias Júnior²; Camila Lopes de Oliveira³

RESUMO --- O objetivo deste trabalho é apresentar a implantação e operação do Sistema de Alerta de Cheias do Estado do Rio de Janeiro pelo Instituto Estadual do Ambiente -INEA. Este Sistema tem como meta alertar às populações ribeirinhas sobre riscos de ocorrência de inundações através da comunicação com as Defesas Civas Municipais. A implantação do Sistema iniciou-se em outubro de 2007 com a instalação de 10 estações telemétricas na Região da Baixada Fluminense e vem sendo expandido para a Região Serrana do Estado, com a instalação, em dezembro de 2008 de mais 6 estações telemétricas na bacia hidrográfica do rio Bengala, com o objetivo de proteger a cidade de Nova Friburgo. Em paralelo encontra-se em fase de aperfeiçoamento, na região da Baixada Fluminense, e em desenvolvimento, na Região Serrana, o modelo de previsão de cheias que visa representar o comportamento hidrológico das bacias dos rios em monitoramento. Tais ações vêm contribuindo como ferramenta no suporte à decisão de ações em eventos críticos, prevenindo e/ou mitigando danos materiais e humanos para a população das regiões abrangidas pelo Sistema de Alerta de Cheias.

ABSTRACT --- The main goal of this work is to present the implantation and operation of the INEA's Rio de Janeiro flood warning system. This flood warning system aims to alert the marginal populations on risks of occurrence of flooding through the communication with the respective Civil Defenses. The implantation of the System was initiated in October of 2007 with the installation of 10 telemetric stations in the Baixada Fluminense and it is being expanded for the Serrana Region. With the objective of protecting the city of Nova Friburgo, the expansion begun in December of 2008 with the installation, of 6 more telemetric stations in the basin of river Bengala. Furthermore, the model of forecast of floods has been carried out to represent the hydrologic behavior of the monitored Rivers. This model is being improved in the Baixada Fluminense, and it is still in development phase in the Serrana Region. Such efforts have been contributed to the decision support for critical events, preventing and/or mitigating material and human damages for the population of the regions enclosed for the flood warning system.

Palavras Chave: Sistema de Alerta, Baixada Fluminense e Nova Friburgo.

¹ Consultor do INEA – e-mail: lpviana@ig.com.br, telefone: (21) 2332-4606

² Engenheiro Civil, Msc. em Recursos Hídricos do INEA – e-mail: jedson-al@bol.com.br, telefone: (21) 3891-3333/3891-3324

³ Engenheiro Civil, Msc. em Recursos Hídricos do INEA – e-mail: engcamilaufrij@gmail.com

INTRODUÇÃO

O Instituto Estadual do Ambiente – INEA, preocupado com os freqüentes problemas de enchentes em diversas regiões do Estado do Rio de Janeiro, ocasionando perdas de vidas humanas e elevados prejuízos financeiros às comunidades atingidas, tem se empenhado em desenvolver medidas que possibilitem reduzir os efeitos danosos desses eventos meteorológicos extremos.

A ação do INEA para o controle das cheias e mitigação dos seus efeitos danosos se dá sob a forma da implementação de medidas estruturais e não estruturais. As medidas estruturais são aquelas que modificam o sistema fluvial, através da implantação de obras hidráulicas que reduzam o pico da cheia ou a escoem de forma apropriada, evitando o prejuízo decorrente das enchentes, enquanto que as não estruturais são aquelas em que os prejuízos são reduzidos pela melhor convivência da população com as enchentes. Entre as medidas não estruturais encontra-se a implantação de Sistemas de Previsão e Alerta de Cheias, com a utilização de modelos matemáticos para simular a formação e propagação da cheia através dos cursos d'água monitorados.

Assim, o INEA decidiu, em parceria com as Defesas Civas Municipais e Estadual, com o apoio financeiro do Fundo Especial de Controle Ambiental (FECAM), e em conjunto com outras entidades que operam redes de observação hidrometeorológica no Estado (INMET, CPRM e GEORIO), implantar e operar um Sistema de Alerta de Cheias para as áreas sujeitas à inundação no Estado do Rio de Janeiro, iniciando pela implantação e operação de estações telemétricas, na Região da Baixada Fluminense e expandindo, em seguida, essa rede de monitoramento para a Região Serrana do Estado.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Baixada Fluminense situa-se na região Oeste da Baía de Guanabara abrangendo os municípios: Duque de Caxias, Nova Iguaçu, São João de Meriti, Nilópolis, Belford Roxo e Mesquita. Em 2007 sua população era estimada em torno de 3,5 milhões de habitantes distribuídos em uma área aproximada de 2.800 km² [CIDE, 2005].

A região encontra-se dividida em 3 bacias hidrográficas, a saber: bacia do Rio São João de Meriti, formada pelas sub-bacias dos rios Pavuna e Acari; bacia do Rio Iguaçu, formada pela pelas sub-bacias dos rios Botas, Capivari e Sarapui; e bacia do Rio Estrela, formada pelas sub-bacias dos rios Saracuruna e Inhomirim.

A região, devido às suas características topográficas, apresenta contrastes entre zonas montanhosas (como o Maciço da Tijuca, o Maciço do Gericinó-Mendanha e as vertentes litorâneas da Serra dos Órgãos) e extensas áreas planas de baixadas, restingas e manguezais. Os cursos d'água

da bacia têm como característica comum elevada declividade e um regime fluvial torrencial, em seus cursos superiores, mudando bruscamente essas características, em um curso inferior, ao longo do qual atravessa extensa planície litorânea, para um regime de baixa velocidade e escoamento sobre influência de maré. Esta configuração de relevo e hidrografia dá origem a áreas sujeitas a enchentes provocadas por chuvas convectivas (mais comumente) e frontais, observando-se também uma forte influência de chuvas orográficas nas áreas próximas a encostas.

A industrialização do Estado e a migração, entre outros fatores, fomentaram um intenso processo de ocupação territorial da Baixada Fluminense, de forma desordenada, principalmente nas planícies litorâneas situadas entre o mar e a montanha. Essa ocupação dos vales dos rios, aliada as suas próprias características de escoamento, fazem com que, quando sujeitos a eventos pluviométricos extremos esses cursos d'água extravasem de sua calha normal e inundem extensas áreas de baixada, causando grandes prejuízos à população aí residente.

Com o passar do tempo, a ocupação regular e irregular das planícies de inundação se consolidou, aumentando as áreas impermeabilizadas e o assoreamento dos rios e conseqüentemente elevando os níveis das inundações. Ocorreu então o agravamento das conseqüências dos eventos pluviométricos extremos. O desmatamento e impermeabilização das bacias geraram um maior volume de cheia a ser escoado pela rede fluvial, aumentando fortemente as manchas de alagamento, fazendo-as chegar a níveis historicamente, até então, não atingidos, aumentando as lâminas de água e os tempos de permanência.

A Região Serrana, também objeto de monitoramento do Sistema de Alerta de Cheias, abrange os municípios de Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis. A implementação do Sistema nessa região iniciou-se pela instalação de uma rede de monitoramento hidrometeorológico, em tempo real, na bacia do Rio Bengala, no município de Nova Friburgo.

O rio Bengala é formado pela confluência dos rios Santo Antônio e Cônego, dentro do distrito de Nova Friburgo, e desenvolve-se ainda pelos distritos de Conselheiro Paulino (onde recebe o seu afluente Córrego D'Antas) e Riograndina. Mais a jusante, nas proximidades do limite do município de Nova Friburgo com o município de Bom Jardim, deságua no rio Grande.

A bacia do Rio Bengala tem como principais formadores os rios Cônego e Santo Antônio totalizando uma área de drenagem de 191,36 km² e uma extensão total, no seu curso principal, de 12,3 km.

A bacia do rio Bengala, por estar inserida na área mais urbanizada do município de Nova Friburgo e com trechos onde ocorre forte ocupação humana, de forma desordenada, compreende a região onde ocorre o maior número de eventos de enchentes ou inundações, causando sérios transtornos à população local.

A topografia da bacia é bastante acidentada o que faz com que os rios apresentem trechos com declividade acentuada e sinuosidade. Entretanto, cabe ressaltar que no trecho em que o rio Bengala atravessa o centro da cidade de Nova Friburgo esse se encontra retificado e canalizado. A retificação do rio Bengala e o revestimento das paredes do canal resultaram em aumento da velocidade e, conseqüente aumento de vazão transportada nesse trecho, mas não no trecho de jusante, em que atravessa o distrito de Conselheiro Paulino, o que causa, quando da ocorrência de chuvas intensas, inundações, com prejuízos à população e à municipalidade.

IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE ALERTA DE CHEIAS

A implementação do sistema de alerta teve seu início após contatos com as Defesas Civis Municipais das regiões afetadas, com o intuito de garantir a imprescindível integração e interação entre os órgãos públicos envolvidos com a problemática das enchentes.

Inicialmente, foi feita a identificação, junto aos principais interlocutores por parte das defesas civis municipais da Baixada Fluminense e de Nova Friburgo, das regiões sujeitas a inundações. A identificação das áreas inundáveis tem importância fundamental para a implantação do sistema de alerta, pois além de fornecer os elementos de direcionamento das informações aos órgãos municipais, influirá diretamente na análise da cobertura da rede telemétrica.

As primeiras informações foram obtidas a partir do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica da Baía de Guanabara (PDBG), no caso da Baixada Fluminense, e do Plano de Águas Pluviais de Nova Friburgo, na Região Serrana, cujas indicações serviram de ponto de partida para início da busca de informações mais detalhadas junto aos órgãos municipais da região de interesse.

As principais áreas suscetíveis de alagamento pelo transbordamento dos rios foram localizadas em campo e plotadas, em base cartográfica, em escala adequada.

Em seguida foi feita a identificação dos locais para monitoramento, a partir dos mapas de localização das áreas inundáveis e da rede hidrográfica da região. A escolha dos locais de instalação das estações, a montante das áreas inundáveis, foi realizada a partir da análise das condições de monitoramento e segurança dos equipamentos. Na definição dos pontos foram considerados também os requisitos de monitoramento necessários à modelagem hidrológica.

Uma vez que os locais para monitoramento foram identificados, a equipe de campo iniciou a sua preparação para receber os equipamentos e sensores que compõem as estações telemétricas da rede de monitoramento da chuva e nível dos rios, em tempo real. A implantação da rede telemétrica foi conduzida considerando a importância que a coleta de dados com qualidade e pontualidade tem para o adequado funcionamento do Sistema de Alerta.

Com o início do monitoramento os dados passaram a ser disponibilizados para uso interno através de um site de Internet desenvolvido especificamente para o sistema de alerta. Atualmente, os *website* do Sistema de Alerta de Cheias da Baixada Fluminense e do Sistema de Alerta de Nova Friburgo estão disponíveis para todos e o *link* se encontra no *website* do INEA (<http://www.inea.rj.gov.br>). Os usuários podem acompanhar os eventos e ainda acessar o banco de dados através de tabelas e gráficos.

Foi então, desenvolvido um modelo hidrológico de previsão de cheias em tempo real, baseado nas informações hidrológicas coletadas pela rede telemétrica, o qual se encontra implantado para a região da Baixada Fluminense e em fase inicial de ajuste para a região de Nova Friburgo e servirá como ferramenta de apoio para a emissão de alertas com maior antecedência.

O modelo de previsão ajustado é do tipo hidrológico, composto por um algoritmo chuva-vazão calibrado com base nos dados das estações telemétricas em operação nas bacias e complementado por equações de translação de volumes para as seções de interesse (áreas inundáveis).

Instalação da Rede de Monitoramento do Sistema de Alerta de Cheias

Foram instaladas 10 estações automáticas telemétricas na região da Baixada Fluminense, sendo 8 pluvio-fluviométricas e 2 pluviométricas, e 6 estações na região de Nova Friburgo, sendo 5 pluvio-fluviométricas e 1 pluviométrica, que compõem a rede de monitoramento, em tempo real, do Sistema de Alerta de Cheias do Estado do Rio de Janeiro, até então implantado.

A Figura 01 apresenta a localização das manchas de inundação da região da Baixada Fluminense e das estações da rede de monitoramento relacionadas na Tabela 01.

A Figura 02 apresenta as manchas de inundação e as estações do sistema de alerta de Nova Friburgo, localizadas nos principais cursos d'água da bacia do rio Bengala e relacionadas na Tabela 02.



Figura 01: Áreas Inundáveis localizadas na Baixada Fluminense e estações telemétricas do Sistema de Alerta de Cheias

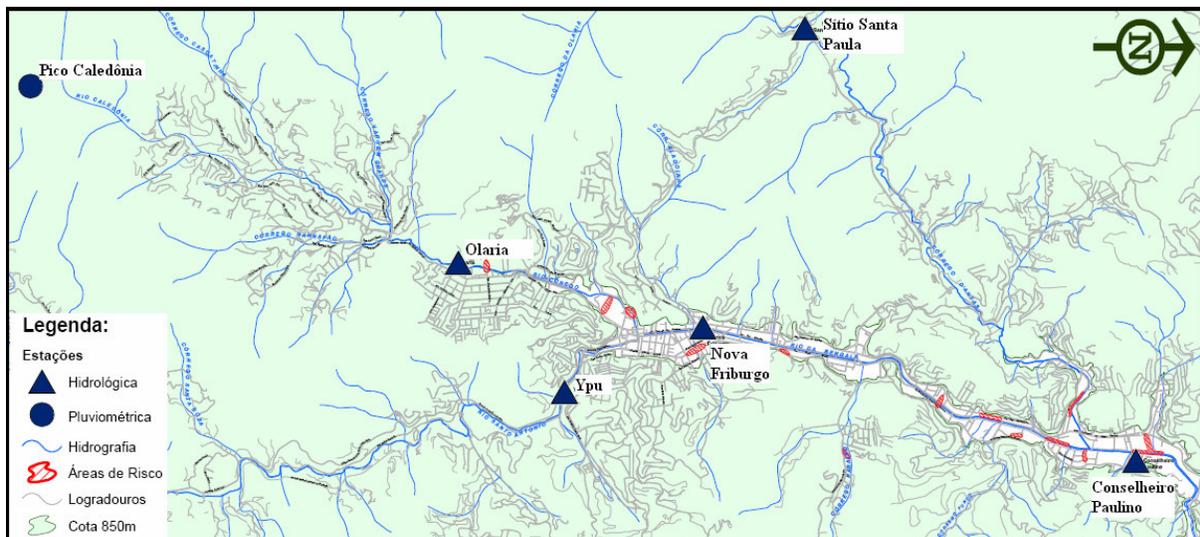


Figura 02: Áreas Inundáveis localizadas em Nova Friburgo e estações telemétricas do Sistema de Alerta de Cheias

Tabela 01: Estações da rede de monitoramento do Sistema de Alerta de Cheias da Baixada Fluminense

Estação	Coordenadas		Tipo	Bacia	Rio	Município
Guadalupe	22°50'54"S	43°22'09"W	Fluviométrica e Pluviométrica	Acari	Acari	Rio de Janeiro
CET Meriti	22°48'24"S	43°22'18"W	Fluviométrica e Pluviométrica	Pavuna/Meriti	Pavuna	S. João de Meriti
Clube XV	22°48'31"S	43°26'12"W	Fluviométrica e Pluviométrica	Sarapuí	Sarapuí	Nilópolis/Mesquita
GBM Nova Iguaçu	22°44'56"S	43°27'25"W	Fluviométrica e Pluviométrica	Iguaçu	Bota	Nova Iguaçu
Clube Catavento	22°39'01"S	43°24'49"W	Fluviométrica e Pluviométrica	Iguaçu	Iguaçu	Nova Iguaçu
Ponte Ferro Capivari	22°40'03"S	43°20'03"W	Fluviométrica e Pluviométrica	Iguaçu	Capivari	Duque de Caxias
Santa Cruz da Serra	22°38'35"S	43°17'28"W	Fluviométrica e Pluviométrica	Saracuruna	Saracuruna	Duque de Caxias
Ponte Ferro Piabetá	22°37'27"S	43°09'17"W	Fluviométrica e Pluviométrica	Inhomirim/Estrela	Inhomirim	Magé
Xerém-Mantiqueira	22°35'06"S	43°18'20"W	Pluviométrica	-	-	Duque de Caxias
Raiz da Serra	22°34'36"S	43°11'13"W	Pluviométrica	-	-	Magé

Tabela 02: Estações da rede de monitoramento do Sistema de Alerta de Cheias da Região Serrana

Estação	Coordenadas		Tipo	Rio	Município
Nova Friburgo	22° 16' 46,3"	42° 32' 05,6"	Fluviométrica e Pluviométrica	Bengala	Nova Friburgo
Olaria	22° 18' 31,3"	42° 32' 32,1"	Fluviométrica e Pluviométrica	Cônego	Nova Friburgo
Sítio Santa Paula	22° 16' 05"	42° 34' 21,6"	Fluviométrica e Pluviométrica	Córrego d'Antas	Nova Friburgo
Ypu	22° 17' 44,2"	42° 31' 36,9"	Fluviométrica e Pluviométrica	Sto Antônio	Nova Friburgo
Conselheiro Paulino	22° 13' 42,3"	42° 31' 12,5"	Fluviométrica e Pluviométrica	Bengala	Nova Friburgo
Pico Caledônia	22° 21' 33,1"	42° 33' 53,3"	Pluviométrica	-	Nova Friburgo

As estações telemétricas foram equipadas com datalogger e modem celular com capacidade de transmissão pelo sistema GSM/GPRS. Neste sistema, as estações transmitem para o servidor da Estação Central do INEA, localizada no bairro São Cristóvão no Rio de Janeiro. Os dados são enviados em pacotes a cada 15 minutos, passam por uma avaliação objetiva da qualidade e são imediatamente disponibilizados na Internet, na página corporativa do INEA.

As estações foram equipadas com sensores de nível marca Sitron, com faixa de medição de 0 a 20 metros e pluviômetros de balança marca Davis, a exceção das Estações de Xerem e Raiz da Serra, na Baixada Fluminense, e Pico Caledônia, em Nova Friburgo, que foram equipadas apenas com pluviômetro. Antecedendo os trabalhos de instalação dos sensores, os mesmos foram testados e calibrados em laboratório.

O sistema de alimentação de energia das estações é composto de painel solar de 10W, controlador de carga e bateria de 12Ah/12 Volts.

Operação da Rede de Monitoramento do Sistema de Alerta de Cheias

A operação das estações telemétricas, em apoio à implementação do sistema de alerta, incluindo a sua manutenção, bem como a aferição dos equipamentos e a orientação dos observadores, vem sendo executada por equipes de hidrometria e de manutenção da INFOPER, empresa contratada para implementação do projeto.

As atividades da equipe de manutenção englobam ações preventivas e corretivas na rede de estações do sistema. As ações preventivas são realizadas com a finalidade de aumentar a vida útil dos equipamentos e incluem a revisão dos equipamentos com limpeza, ajuste, aferição e teste das estações associadas com a verificação das funcionalidades de coleta, armazenamento e transmissão de dados. As ações corretivas são realizadas para restabelecer o funcionamento das estações que porventura apresentem quaisquer problemas.

As avaliações de desempenho realizadas nos sensores seguem a norma existente no manual de operação do *datalogger*. São verificados todos os parâmetros de controle dos sensores, indicando em planilha de inspeção todas as ocorrências.

Testes de campo e de laboratórios para aferição e calibração dos equipamentos das estações são realizados periodicamente e/ou por solicitação específica.

Um Percentual de Operacionalidade Mínimo (P.O.M.) da atual rede telemétrica deve ser de 97% (noventa e sete por cento). O P.O.M. é definido pela equação:

$$\text{P.O. M.} = (\text{Rf} / \text{Re}) \times 100 \quad (1)$$

onde,

Rf = Total de registros efetivamente enviados - em tempo real* - por todas as estações telemétricas para a estação central;

Re = Total de registros esperados no mês.

* Tempo Real aqui entendido como intervalo máximo de 15 minutos após o registro do dado.

Implantação da Central de Operação do Sistema de Alerta de Cheias

O Sistema de Alerta de Cheias é operado visando o acompanhamento das condições meteorológicas e a vigilância ininterrupta para detecção de possíveis situações de alerta e transmitir a informação às autoridades competentes. Para tal acompanhamento, foi disponibilizada uma equipe de técnicos em meteorologia e de meteorologistas, que trabalham de forma ininterrupta para o acompanhamento e disseminação de informações meteorológicas.

A escala de trabalho foi definida de tal forma que haja sempre um meteorologista de plantão remotamente supervisionando um técnico em meteorologia presente 24 horas na sala da Estação Central localizada no INEA.

A equipe de meteorologistas tem a seu encargo preparar e divulgar as previsões do tempo, em conjunto com o envio de Boletins Hidrometeorológicos Diários, e autorizar mudanças de estágio de alerta para a região da Baixada Fluminense e de Nova Friburgo.

A equipe de técnicos em meteorologia é composta de cinco profissionais se revezando em plantões. No período diurno foram determinados plantões de 07h às 19h, divididos em dois com horário de 07h às 13h e de 13h às 19h, e no período noturno de 19h às 07h.

Uma equipe de informática trabalha na manutenção das ferramentas computacionais instaladas na estação central do sistema, bem como no desenvolvimento e implementação de programas computacionais, banco de dados e na página de visualização dos dados e informações do sistema de alerta disponibilizados através da internet.

O monitoramento meteorológico acompanha as mudanças na atmosfera local através das informações atualizadas a cada 15 minutos da rede de estações do sistema, bem como utilizando imagens de satélite, imagens do Radar do Pico do Couto (Aeronáutica), imagens da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT), sondagem atmosférica do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro Galeão – Antonio Carlos Jobim, além de informações de redes de observação de outros centros de meteorologia disponibilizadas na internet. Em caso de formação de núcleos de chuva moderada a forte, na região monitorada, nas próximas horas, a equipe de meteorologia emite um alerta de chuva para os responsáveis pela tomada de decisões nos órgãos de Defesa Civil, via SMS, contato telefônico e e-mail, informando a possibilidade de ocorrência de chuvas, nos respectivos municípios monitorados.

Os boletins hidrometeorológicos são emitidos diariamente para as Defesas Cíveis do Estado e Municipais e para os engenheiros do INEA, via e-mail, após análise realizada pelos meteorologistas das variáveis meteorológicas relevantes sobre a região monitorada. Estes boletins informam as condições atuais do tempo, a previsão para as próximas 24 horas e o prognóstico para as 72 horas, visando antecipar o planejamento dos órgãos de Defesa Civil em casos de previsão de entrada de frentes frias ou melhora de tempo após vários dias de chuva.

A inserção de dados foi automatizada para receber os dados a cada 15 minutos e imediatamente repassá-los para o banco de dados. A automação da coleta foi implementada através de um programa desenvolvido em Java.

O banco de dados é um componente da maior importância para o bom funcionamento da Estação Central. O módulo de armazenamento da Estação Central foi implementado tendo como base um Sistema Gerenciador de Banco de Dados Post Gres, modelado e preparado para receber os

dados e eventos gerados pelas estações telemétricas e ainda informações de natureza gerencial que precisam estar à disposição dos técnicos e administrador do sistema.

Além disso, o Banco de Dados foi estruturado para integrar um sistema de avaliação da qualidade de dados e um aplicativo de supervisão do sistema. A migração dos dados históricos para o Banco de Dados poderá ser realizada de forma a possibilitar o acesso rápido e as análises importantes para parametrização do programa de avaliação da qualidade dos dados.

Outras informações, como o registro de eventos de tempo severo e conseqüentes inundações, desabamentos e outras ocorrências extremas na região, fazem parte da coleta de dados da rotina de trabalho da equipe de monitoramento, mantendo constante contato com os órgãos de Defesa Civil, bem como através da pesquisa na mídia, contribuindo para o enriquecimento do banco de dados climatológico e do sistema de alerta de cheias do Estado do Rio de Janeiro.

MODELO HIDROLÓGICO DE PREVISÃO DE CHEIAS

Para a estimativa das inundações resultantes de um evento chuvoso extremo, previsto de ocorrer na região, foi desenvolvido um modelo matemático de simulação hidrológica que busca representar as bacias hidrográficas dos rios que são monitorados pelo Sistema de Alerta de Cheias. O modelo pretende reproduzir a forma como as bacias reagem a um determinado evento chuvoso e como as cheias se deslocam ao longo do curso d'água até atingir as áreas inundáveis.

Assim, a ferramenta de simulação desenvolvida deverá estar apta a receber e processar as informações coletadas pela rede de monitoramento e responder gerando previsões. Trata-se de um modelo matemático que após passar por procedimentos de ajuste e calibração, com base nas informações hidrológicas existentes nas bacias, será capaz de gerar respostas como as cotas de inundação nas áreas protegidas.

Tendo em vista que as condições hidrológicas críticas na área de estudo advêm da ocorrência de chuvas de alta intensidade e curta duração e salientando-se a magnitude do tempo de concentração da bacia ser de ordem inferior a uma hora, a escolha do modelo recai sobre o tipo concentrado, hidrológico – hidráulico, composto por um algoritmo chuva-vazão e complementado por equações de translação de volumes.

Metodologia

Dados os condicionantes acima, optou-se por utilizar o modelo de transformação chuva-vazão IPHII, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O IPHII tem como características, ser um modelo simples, com a manipulação de um número mínimo de parâmetros, e baseado em metodologias bem difundidas. Possui códigos fonte

abertos, sendo seu algoritmo de fácil compreensão e de amplo suporte. Adicionalmente, tem sido bastante utilizado na simulação de processos chuva-vazão em bacias urbanas.

A modelagem das bacias para utilização do modelo IPHII requer dados fisiográficos, hidrometeorológicos e socioeconômicos, tais como topografia, uso e ocupação solo, séries históricas de precipitação, evaporação e escoamento superficial, e dados de densidade populacional.

A base dos dados topográficos utilizada foi o modelo digital do terreno, obtido da EMBRAPA (Sistema de Coordenadas Geográficas e *Datum* WGS84). A partir dele foram extraídos os dados fisiográficos da bacia hidrográfica no seu exutório e nas estações de monitoramento, pela aplicação do software ARCVIEW. Outros dados utilizados foram obtidos diretamente de levantamentos de campo, como a topobatimetria das seções transversais nas estações de monitoramento e nas seções de previsão.

Estimativas sobre o uso e ocupação do solo foram obtidas do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica da Baía de Guanabara – PDRH-BG. Informações de densidade populacional, utilizadas na determinação da taxa de impermeabilização e do tempo de concentração da bacia, foram obtidas do Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro - CIDE e do Centro de Informação da Baía da Guanabara - CIBG.

Dentre os parâmetros fisiográficos levantados, necessários para desenvolvimento do modelo de previsão de cheias, citam-se: a taxa de impermeabilização do solo, a curva número (CN) do método do *Soil Conservation Service*, o valor do coeficiente de retardo (c) de Kerby, o tempo de retardo do escoamento superficial do modelo IPHII (Ks) e o tempo de concentração das bacias (Tc).

Para a estimativa da parcela impermeável das sub-bacias tomou-se como base a relação densidade populacional–área impermeável, conforme definida por CAMPANA e TUCCI (1994), a partir das seguintes equações de ajuste:

$$AI = -3,86 + 0,55*DP \text{ (para } 7,02 < DP < 115 \text{ hab/ha)} \quad (2)$$

$$AI = 53,2 + 0,054*DP \text{ (para } DP > 115 \text{ hab/ha)} \quad (3)$$

Onde,

AI = área impermeável (%)

DP = densidade populacional (habitantes/hectares)

Para determinação do CN (curva número do método do *Soil Conservation Service*) partiu-se das características fisiográficas e do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica. Segundo TASSI (2005), as relações a seguir, adaptadas de CHOW (1959), fornecem o valor de CN sendo conhecido o tipo hidrológico do solo e a porcentagem de área impermeável:

$$CN = 0,5751*AI + 39,527 \text{ Solo A} \quad (4)$$

$$CN = 0,3762*AI + 60,606 \text{ Solo B} \quad (5)$$

$$CN = 0,2475*AI + 73,788 \text{ Solo C} \quad (6)$$

$$CN = 0,1755 * AI + 80,553 \text{ Solo D} \quad (7)$$

Onde,

AI = parcela da área impermeável da bacia (%)

O tempo de retardo do escoamento superficial (parâmetro Ks do modelo IPHII) foi calculado a partir da equação a seguir, conforme apresentado em Germano *et al* (1998):

$$Ks = L^{1,063} / S^{0,126} AI^{0,549} \quad (8)$$

Onde,

Ks = tempo de retardo (min)

L = talvegue (km)

S = declividade do curso d'água (m/100m)

AI = taxa de impermeabilização da bacia (%)

Estabelecidos os parâmetros básicos, é possível calcular o tempo de concentração das bacias (Tc), definido como o intervalo de tempo necessário, a partir do início da precipitação, para que toda a bacia passe a contribuir na seção em estudo. Para fins de avaliação dos resultados, as equações de cálculo do Tc foram divididas em três classes: bacias urbanas, bacias rurais e mistas (aplicáveis tanto a bacias urbanas quanto rurais).

O tempo de concentração foi calculado a partir de fórmulas empíricas como uma estimativa preliminar deste valor, a ser utilizada no modelo como amplitude de variação do parâmetro. Mas seu valor final foi obtido durante o próprio processo de calibração. Por definição, tempo de concentração considera a precipitação, assim como as características físicas da bacia, como uniformes no espaço. Como isso não ocorre na prática, há que se encontrar durante o processo de calibração dos eventos escolhidos um valor médio para o parâmetro que permita o melhor ajuste entre hidrograma observado e simulado, considerando tempo e vazão de pico e volume total escoado. Este será o tempo de concentração a ser adotado.

Para a calibração do modelo foram selecionados os parâmetros da equação de Horton (Io, Ib e h) e os parâmetros Ks e Ksub e Rmax.

Io, Ib e h, são parâmetros da fase de separação dos escoamentos. O parâmetro Io define a capacidade máxima de umidade do solo, Ib define a capacidade mínima de infiltração, enquanto h depende do tipo de solo. Segundo Tucci (1979), os parâmetros Io e Ib, variam com o valor de h. O aumento de Io, Ib e h, produzem a redução do volume escoado superficialmente. A influência de Io diminui à medida que diminui a o valor de h, aumentando a influência de Ib.

Os parâmetros Ks e Tc determinam a propagação superficial. O parâmetro Ks, que é o tempo de retardo do escoamento superficial, depende do tempo de concentração da bacia, do armazenamento e da celeridade da onda, que é função da vazão de pico. O tempo de concentração define o histograma tempo-área e pode ser estimado previamente por expressões adequadas ao

sistema. O parâmetro K_{sub} representa o tempo médio de esvaziamento do reservatório de escoamento subterrâneo. Este parâmetro pode ser estimado a partir da recessão dos hidrogramas observados [GERMANO *et al.*, 1998].

Complementando a modelagem para previsão das enchentes nas áreas inundáveis, é necessário implementar um algoritmo de translação do hidrograma de cheia, do ponto de monitoramento até a área a proteger.

Idealmente, trata-se da aplicação das equações completas de Saint-Venant, que consideram condições de contorno de montante e de jusante, além do efeito de maré. No entanto, considerando-se as questões relativas à disponibilidade de informações, custos de desenvolvimento ou aquisição de software e investimentos em calibração e operação, optou-se pela aplicação de um modelo simplificado tipo armazenamento. Segundo Tucci (1986), um modelo tipo armazenamento, com pequenas modificações, pode ser utilizado com sucesso na previsão antecipada de cheias.

O modelo tipo armazenamento denominado Muskingun-Cunge demonstrou ser satisfatório nestas condições, devido ao pequeno conjunto de dados requeridos, bem como à formulação matemática de fácil programação e processamento.

O fundamento deste modelo é a relação biunívoca entre armazenamento e vazão, que para uma seção é a relação entre a área e a vazão, ou seja, o princípio do modelo de onda cinemática.

Para utilizar o método de Muskingun-Cunge linear, os dados a serem fornecidos são: o comprimento do trecho de propagação, a cota de fundo de montante, a cota de fundo de jusante, a altura do canal, a largura do canal e a rugosidade do trecho. A vazão de referência, o número de sub-trechos e o intervalo de cálculo são calculados automaticamente pelo programa.

Tanto o modelo de transformação chuva-vazão IPHII quanto o modelo hidráulico de translação de volumes Muskingun-Cunge fazem parte do pacote de modelação IPHS1, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH). Este *software* foi customizado para aplicação em tempo real nas 3 bacias que compõem a região da Baixada Fluminense, a saber: Bacia do rio São João de Meriti, Bacia do Rio Iguaçu e Bacia do Rio Estrela.

Aplicação

A seguir serão apresentados os resultados da simulação de um evento chuvoso nas estações de monitoramento da bacia do Rio São João de Meriti.

Como citado anteriormente, a bacia do rio São João de Meriti localiza-se no Estado do Rio de Janeiro, ocupando parcialmente os territórios dos municípios de Nilópolis, São João de Meriti e Rio de Janeiro, sendo formada pelas sub-bacias dos rios Pavuna e Acari. O rio São João do Meriti deságua diretamente na Baía de Guanabara totalizando uma área de drenagem de aproximadamente

171 km². O rio Pavuna nasce no pântano do Sítio do Retiro, serra de Bangu, no município do Rio de Janeiro.

A sub-bacia do Acari localiza-se na zona norte do município do Rio de Janeiro, e está entre as que mais produzem eventos de cheias, observando-se nestas ocorrências uma área alagada superior a 3 km², com lâminas de alagamento que variam de 0,20m a 2m. O rio Acari atravessa importantes vias de tráfego como as avenidas Brasil e Automóvel Clube e a rodovia Presidente Dutra. Os bairros mais atingidos por inundações são os de Jardim América, Acari, Parque Colúmbia, Coelho Neto, Barros Filho e Pavuna.

Nesta bacia encontram-se instaladas duas estações telemétricas de monitoramento da precipitação pluviométrica e dos níveis d'água dos rios, a estação de CET Meriti, no rio Pavuna e Guadalupe no rio Acari. No rio Pavuna foi instalada uma régua limnimétrica de apoio, a 1,89 km a jusante da estação telemétrica de CET Meriti, na localidade de Frei Francisco. Cerca de 2 km após a junção dos rios Acari e Pavuna, localizada no rio São João de Meriti, foi instalada outra régua de apoio, na seção denominada EBAMAG. A Tabela 03 resume os dados básicos das bacias nesses pontos de controle e medição:

Tabela 03 – Dados básicos da bacia de rio São João de Meriti

Sub-Bacias		Pavuna			Acari		SJM*
Estações / Pontos de Controle		CET Meriti	Frei Francisco +	Foz Pavuna+	Guadalupe	Foz Acari+	EBAMAG+
Coordenadas	Latitude	22°44'22"	22°48'15"	-	22°50'53"	-	22°48'1,2"
	Longitude	43°22'17"	43°21'15"	-	43°22'17"	-	43°18'27,1"
Área (km ²)		32,18	5,09	8,90	51,47	51,60	9,64
Perímetro (km)		29,43	-	41,35	35,47	59,12	-
Elevação (m)	Máxima	38,59	9,59	7,06	842,14		5,66
	Mínima	9,59	7,06	5,66	15,07		5,60
Talvegue (m)		11878	+ 1890	+ 2817	13485		+ 2220
Declividade da bacia (%)		0,244	0,134	0,0406	6,13		0,0027
Altitude do fundo (m)		0,870	-0,230	-	-		-3,106
Declividade do canal (%)		0,0582		0,0571			
Densidade populacional (hab/ha)		77	79	80	78	80	80
Taxa de impermeabilização (%)		38	39	40	39		40
Coeficiente Ks (1)		54	8	14	41		16
Tempo de concentração (min) (2)		45	15	15	45		15

*São João de Meriti

(1) parâmetro do modelo IPHII, Ks (tempo de retardo do escoamento superficial)

(2) obtido por simulação no modelo IPHS1

As áreas de interesse para previsão de cheias neste estudo correspondem às seções de Frei Francisco no rio Pavuna, e EBAMAG no rio São João de Meriti.

Para obtenção do hidrograma de cheia resultante da ocorrência de uma ou várias tormentas sobre a bacia do rio São João de Meriti, nas seções de interesse, foi necessário proceder à modulação desta bacia através da combinação de algoritmos matemáticos de transformação de chuva-vazão, soma de hidrogramas e propagação de volumes.

Assim a bacia do Rio São João de Meriti foi dividida em cinco sub-bacias que aportam ao curso principal: sub-bacia 1, rio Pavuna, da sua nascente até a estação telemétrica de CET Meriti; sub-bacia 2, rio Pavuna, de CET Meriti até a estação fluviométrica de Frei Francisco (seção de previsão); sub-bacia 3, rio Pavuna, da estação de Frei Francisco até a junção do rio Pavuna com o rio Acari; sub-bacia 4 correspondente a bacia do Acari até a sua foz na junção com o rio Pavuna e sub-bacia 5, rio São João de Meriti, desde da junção dos rios Pavuna e Acari até a estação telemétrica (seção de previsão) de EBAMAG, como mostrado na Figura 03.

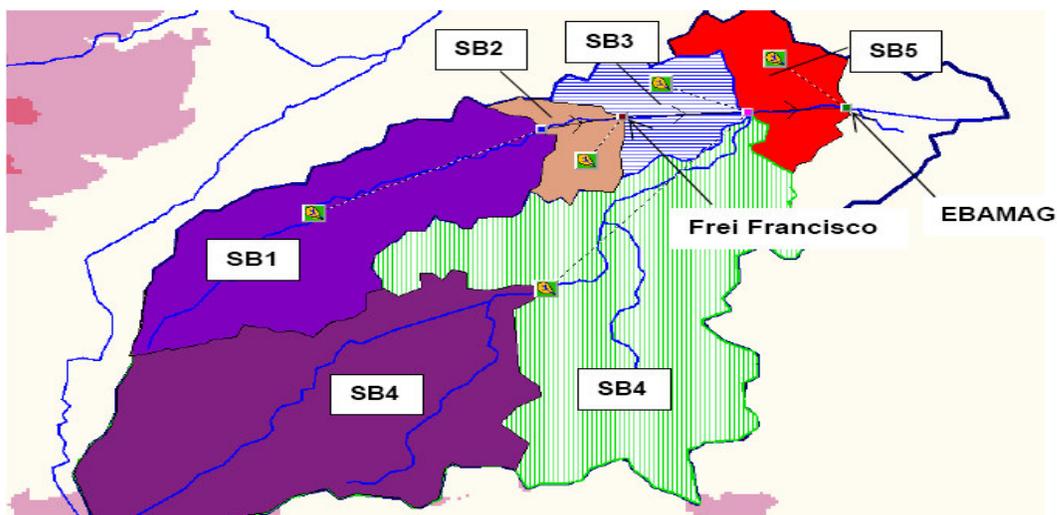


Figura 03 – Modelagem da Bacia do rio São João de Meriti

A Tabela a seguir resume a seqüência de cálculo e as operações hidrológicas programadas para o cálculo dos hidrogramas de projeto nas seções de interesse (Frei Francisco e EBAMAG). As condições hidrológicas das bacias hidrográficas, em geral, envolvidas são de áreas com precipitações intensas e de curta duração que geram hidrogramas de cheias com tempo de concentração inferior a uma hora.

Tabela 04 – Operações Hidrológicas da bacia do Rio São João de Meriti

Hidrograma Resultante	Operação Hidrológica	Elemento da Bacia	Dados de Entrada
1	Transf. Chuva - Vazão	SB1	Precipitação sobre SB1
2	Propagação Rio	SB2	Hidrograma 1
3	Transf. Chuva - Vazão	SB2	Precipitação sobre SB2
4	Soma de Hidrogramas	Seção Frei Francisco (exutória SB2)	Hidrograma 2 + Hidrograma 3
5	Propagação Rio	SB3	Hidrograma 4
6	Transf. Chuva - Vazão	SB4	Precipitação sobre SB4
7	Transf. Chuva - Vazão	SB3	Precipitação sobre SB3
8	Soma de Hidrogramas	Junção Pavuna e Acari (exutória SB3 e SB4)	Hidrograma 5 + Hidrograma 6 + Hidrograma 7
9	Propagação Rio	SB5	Hidrograma 8
10	Transf. Chuva - Vazão	SB5	Precipitação sobre SB5
11	Soma de Hidrogramas	Seção EBAMAG (exutória SB5)	Hidrograma 9 + Hidrograma 10

Resultados

A Tabela 05 apresenta o resultado da simulação da cheia causada no Rio São João de Meriti por de um evento chuvoso de 21,8 mm com 75 minutos de duração, observado nas estações telemétricas de previsão de CET Meriti e Guadalupe, utilizando o modelo IPHS1 e os valores de calibração validados com o IPHII em ambas estações da bacia.

Tabela 05 - Resultados da simulação

ΔT	Hidrogramas										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	3,10	3,10	0,49	3,59	3,59	6,52	2,85	12,96	12,97	2,86	15,83
2	3,25	3,14	0,55	3,69	3,60	6,99	2,78	13,37	13,10	2,80	15,90
3	13,96	6,30	6,82	13,12	4,12	16,25	13,85	34,22	20,52	14,81	35,33
4	32,61	16,34	7,38	23,72	8,17	33,56	14,70	56,43	37,32	15,75	53,07
5	46,79	30,33	8,63	38,96	15,01	57,98	16,79	89,78	61,58	18,03	79,61
6	49,39	41,09	7,53	48,62	24,83	86,48	14,68	125,99	92,85	15,77	108,62
7	45,45	45,00	5,78	50,78	34,19	112,45	11,43	158,07	125,96	12,25	138,21
8	36,35	42,65	4,38	47,03	40,45	130,45	8,82	179,72	154,76	9,44	164,20
9	27,78	36,34	3,36	39,70	42,63	138,25	6,89	187,77	174,10	7,36	181,46
10	21,32	29,27	2,61	31,88	41,09	133,17	5,47	179,73	180,36	5,83	186,19
11	16,60	23,07	2,07	25,14	37,16	115,17	4,41	156,74	171,95	4,69	176,64
12	13,15	18,14	1,67	19,81	32,21	94,47	3,63	130,31	152,68	3,85	156,53
13	10,64	14,38	1,38	15,76	27,17	73,74	3,04	103,95	128,69	3,23	131,92
14	8,80	11,58	1,17	12,75	22,58	56,98	2,61	82,17	104,73	2,76	107,49
15	7,46	9,50	1,01	10,51	18,64	44,58	2,28	65,50	83,98	2,41	86,39
16	6,49	7,98	0,9	8,88	15,39	35,53	2,03	52,95	67,37	2,15	69,52
17	5,78	6,87	0,82	7,69	12,80	28,93	1,84	43,57	54,56	1,95	56,51
18	5,26	6,06	0,76	6,82	10,77	24,12	1,70	36,59	44,85	1,79	46,64
19	4,89	5,47	0,72	6,19	9,20	20,62	1,58	31,40	37,57	1,68	39,25
20	4,62	5,04	0,69	5,73	8,00	18,07	1,50	27,57	32,15	1,59	33,74

ΔT = intervalo de discretização

A vazão máxima prevista em EBAMAG, no rio São João de Meriti de 186,19m³/s corresponde a leitura de régua de 1,80m, não chegando a acarretar inundação na área.

CONCLUSÕES

A implantação e operação do Sistema de Alerta de Cheias da Baixada Fluminense e de Nova Friburgo tem tornado possível uma maior integração entre o INEA, as Defesas Civas Municipais e a Sociedade Civil, uma vez que, através dos “Avisos de Alerta” emitidos pelo INEA para as Defesas Civas, a população tem acesso à informações sobre riscos que possam vir a ocorrer em suas localidades, viabilizando a mitigação dos danos materiais e humanos causados pelas enchentes.

A operação do Sistema de Alerta de Cheias na Baixada Fluminense iniciou-se em janeiro de 2008 e em Nova Friburgo em janeiro de 2009, e desde então tem possibilitado a vigilância

constante dos eventos chuvosos que ocorrem nessas regiões e a emissão de “Avisos de Alerta” quando da possibilidade de ocorrência de inundações.

Além do monitoramento em tempo real, a emissão de boletins diários que fornecem informações sobre a previsão do tempo para as próximas 24, 48 e 72 horas vem auxiliando as Defesas Civas a criarem previamente planos de ações de emergências e geram novas ferramentas de suporte à decisão em caso de desastres naturais.

O modelo hidrológico desenvolvido é de suma importância para o INEA, como órgão gestor de recursos hídricos, e para as Defesas Civas Municipais, visto que, serve como ferramenta no suporte à decisão de ações em eventos críticos, prevenindo ou mitigando danos materiais e humanos para a população das regiões abrangidas pelo Sistema de Alerta de Cheias.

Como condição inicial de implantação do Sistema de Alerta foi determinado que esse deveria permitir que entre o tempo de previsão da chuva e a ocorrência da enchente correspondente haveria um intervalo de tempo suficiente para a tomada de providências no sentido de minimizar os impactos decorrentes de um provável alagamento. Outra condição dizia respeito a que o modelo de simulação a ser desenvolvido deveria estar adequado a receber alterações e complementações futuras, a medida que se dispusesse de mais informações, sem requerer uma reestruturação completa, desde que mantida sua tipologia.

Tais condições foram satisfeitas no modelo desenvolvido, devendo, no entanto, ser considerado os seus resultados com ressalvas, dado às restrições do curto período de monitoramento realizado, que forneceu poucos dados para calibração do modelo. O monitoramento implantado pelo INEA ainda não concluiu um ciclo hidrológico anual completo e quando da ocorrência do período úmido de 2009, o modelo ainda não se encontrava totalmente estruturado, o que gerou restrições para seleção dos eventos a serem utilizados na calibração e validação do modelo.

Embora, de modo geral, tenham sido obtidos bons resultados, as incertezas no ajuste dos hidrogramas de cheia analisados estão relacionados a uma série de fatores, entre os quais destaca-se:

- Deficiência na representação dos processos hidrológicos pelo modelo IPHII;
- Incertezas relacionadas à curva-chave, especialmente nos seus extremos, onde normalmente não se têm pontos observados;
- Variação espacial da precipitação, considerada uniformemente distribuída bacia;
- Abordagem concentrada na modelagem, e conseqüentemente, utilização de parâmetros médios para toda a bacia;
- Curto período de observação, o que restringe as possibilidades de ajuste dos parâmetros à ocorrência de eventos talvez pouco representativos.

Um maior prazo de monitoramento, investimentos em levantamentos topobatimétricos e consistência dos dados em tempo real terão efeitos determinantes sobre a confiabilidade dos resultados do modelo e conseqüentemente da valorização do Sistema de Alerta junto aos setores responsáveis pelas ações de defesa civil nas áreas de risco.

BIBLIOGRAFIA

CAMPANA, N.; TUCCI, C. E. M. (1994). **Estimativa da Área Impermeável de Macrobacias Urbanas**. RBE, Caderno de Recursos Hídricos, V12, N2, p. 79-94.

COSTA, Helder (2001). **Enchentes no Estado do Rio de Janeiro – Uma Abordagem Geral**. ISBN 85-87206-08-7, SEMADS, Rio de Janeiro, 2001.

ECOLOGUS-AGRAR (2005). **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica da Baía de Guanabara**. Relatório Síntese.

FUNDAÇÃO CIDE (2005). <http://www.cide.rj.gov.br/cide/secao.php?secao=4.1.1> . Acesso em 29/07/2008.

GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. (1998). **Estimativa dos Parâmetros do Modelo IPH II para Algumas Bacias Urbanas Brasileiras**. RBRH, V3, N4, p. 103-120.

TUCCI, C. E. M. (1979). **Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Algoritmo de Infiltração**. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia, 3, Brasília.

TUCCI, C. E. M. (1986). **Modelos Matemáticos em Hidrologia e Hidráulica**. RBE – Revista Brasileira de Engenharia, Tomos 1 a 3. Rio de Janeiro, RJ.

TUCCI, C. E. M. (1993). **Hidrologia. Ciência e Aplicação**. ABRH, p. 459-476. Editora da Universidade, Porto Alegre, RS.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. (1995). **Drenagem Urbana**. ABRH, p. 277– 348. Editora da Universidade, Porto Alegre, RS.