

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

MODELAGEM PARA PREVISÃO DE INUNDAÇÕES UTILIZANDO
CORRELAÇÃO CHUVA – VAZÃO

Renan Gonçalves Ribeiro

Itajubá-MG, outubro de 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Renan Gonçalves Ribeiro

MODELAGEM PARA PREVISÃO DE INUNDAÇÕES UTILIZANDO
CORRELAÇÃO CHUVA – VAZÃO

Dissertação de Mestrado apresentada
como requisito à obtenção do grau de
Mestre em Meio Ambiente e Recursos
Hídricos pela Universidade Federal de
Itajubá.

Orientador: Prof. Alexandre Augusto
Barbosa.

Outubro de 2012
Itajubá – MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

Renan Gonçalves Ribeiro

MODELAGEM PARA PREVISÃO DE INUNDAÇÕES UTILIZANDO
CORRELAÇÃO CHUVA – VAZÃO

Dissertação aprovada por banca examinadora em 04 de outubro de 2012, conferindo ao autor o título de ***Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.***

Banca Examinadora:

Prof. Alexandre Augusto Barbosa

Prof. Frederico Fábio Mauad

Prof. James Lacerda Maia

Itajubá

2012

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, que me ensinou o caminho do conhecimento, da sabedoria e da felicidade.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, grande inspiração da minha vida, aos meus pais, por serem o meu grande referencial, às minhas irmãs, pelo companheirismo e amor, aos demais familiares por serem o meu lar, meus amigos, pelo apoio e alegria, aos meus colegas de estudo pela união nesta jornada, ao meu orientador Prof. Alexandre Barbosa e à Prof.^a Ana Moni pela simplicidade e profundidade com que me compartilharam um pouco dos seus conhecimentos, ao técnico Alexandre pela valiosa ajuda e amizade e a Deus por me dar sentido, direção, conselho e vida.

EPÍGRAFE

“E as águas foram minguando até o décimo mês, em cujo primeiro dia
apareceram os cimos dos montes”

Gênesis 8:5

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo estabelecer um modelo estatístico de previsão de cotas altimétricas do Rio Sapucaí no início da área urbana do município de Itajubá-MG, a partir de registros em tempo real de precipitações ocorridas nas estações de monitoramento localizadas à montante do município. O modelo se baseia nas equações de regressão linear obtidas através das séries de dados de precipitação e cota altimétrica registradas pelo Sistema de Monitoramento de Enchentes do Rio Sapucaí.

Para obtenção do modelo de previsão (equação de regressão) aplicou-se o método estatístico da correlação linear. Sendo assim, fez-se um tratamento rigoroso da massa de dados de precipitação média e cota altimétrica de forma a permitir a aplicação do método. A precipitação média na bacia foi calculada através do método dos polígonos de Thiessen para obtenção do par ordenado “precipitação média” e “cota altimétrica do rio Sapucaí na estação Santa Rosa”. Na série de dados obtida foram identificados picos de precipitação média na bacia que exercessem efeito na cota altimétrica na estação Santa Rosa, nos picos identificados foi calculada a precipitação média acumulada naquele período com o objetivo de obter correlações significativas e melhor aplicabilidade do modelo de previsão. Finalmente, foram obtidos os coeficientes de correlação e equações de regressão para cada pico identificado graficamente, os quais foram avaliados comparativamente e submetidos a testes estatísticos de significância.

Os resultados obtidos neste trabalho confirmam a aplicabilidade do método de correlação linear e indicam uma considerável similaridade entre os dados reais e aqueles processados pelo modelo estatístico obtido. Algumas restrições tais como uso de precipitações médias, limites de previsão do modelo e a variabilidade da ocorrência das chuvas na bacia conferem limitações e fragilidades ao modelo. Entretanto, concluiu-se que o principal foco de desenvolvimento da previsão de cotas deve ser a qualidade e quantidade dos dados de precipitação e cotas altimétricas.

Palavras chave: Precipitação, inundação, modelos de previsão de enchentes, correlação linear, regressão linear.

ABSTRACT

The present research objective is to build a statistic forecast model of altimetric elevations of Sapucaí River in the initiation of Itajubá city urban area, using on line records of rainfall occurred in the monitoring stations located upstream of the city. The forecast model its based in regression equations obtained by data series of rainfall and altimetric elevations collected by Sapucaí River Monitoring System.

To obtain the forecast model (regression equations) applied the statistic method of linear correlation. Thus, was made strict treatment of dada series of rainfall e elevation altimétrica to permit the method application. The average rainfall was calculated by Thiessen Polygons Method to obtain the ordered pair “average rainfall” and “altimétrica elevation” of Sapucaí River in the Santa Rosa monitoring station. In the data series was identified peaks of average rainfall in the watershed which had a effect exercised in the altimétrica elevation of Santa Rosa station, in these identified peaks was calculated the accumulated average rainfall in that period to obtain significant correlations and better applicability of forecast model. Finally, was obtained the correlations coefficients and regression equations for which peak identified graphically, which were comparatively evaluated and tested by statistic significance.

The results obtain in the present paper claim the applicability of the linear correlation method and show a considerable similarity between real data and data process by the statistic model obtained. Some restrictions as use average rainfall, predictions limits and rainfall variability occurrence in the watershed confer limitations and weakness to the model. However, it follows that the main objective of forecast altimetric elevations development has to be the quality and amount of rainfall and altimétrica elevations data.

Keywords: Rainfall, flooding, flooding forecast model, linear correlation, linear regression.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Registro de inundação do Rio Sapucaí no município de Itajubá – MG ocorrida em janeiro de 2000. Fonte: Acervo Unifei	16
Figura 2 - Eleva�o do nível de um rio e intera�o nas suas margens. Fonte: Adaptado Goerl e Kobiyama (2005) apud Andrade (2006)	23
Figura 3 - Municípios atingidos por inunda�es no período de 1998 a 1999. Fonte: ANA – Agência Nacional das águas apud Mendes et. al. (2004)	25
Figura 4 - Características dos sistemas de alerta. Fonte: Tucci e Collischonn (2002).....	35
Figura 5 - Metodologia esquemática para o presente estudo	38
Figura 6 - Bacia do Alto, Médio e Baixo Sapucaí. Fonte: Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, 2010 (adaptado)	40
Figura 7 - Localiza�o do município de Itajubá. Fonte: Matos (2007).....	42
Figura 8 - Paginal inicial do Sistema de Monitoramento de Enchentes. Fonte: www.enchentes.unifei.edu.br	44
Figura 9 - Funcionalidades do domínio do Sistema de Monitoramento de Enchentes. Fonte: www.enchentes.unifei.edu.br	45
Figura 10 - Exemplo de dados brutos de cota altimétrica e precipita�o para algumas esta�es de monitoramento.....	47
Figura 11 - Dados sincronizados de cota altimétrica e precipita�o para algumas esta�es de monitoramento.....	49
Figura 12 - Exclusão de linhas nas quais existam dados incompletos.....	50
Figura 13 - Dados finais de cota e precipita�o após sincroniza�o e tratamento dos dados brutos	51
Figura 14 - C�culo da precipita�o média na bacia através do método do Thiessen.....	51
Figura 15 - C�culo da precipita�o média acumulada.....	53
Figura 16 - Localiza�o das esta�es de monitoramento utilizadas no presente estudo	55
Figura 17 - Delimita�o dos polígonos de Thiessen.....	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação da precipitação na Estação Canta Galo e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Jan/2009 a Fev/2012.	56
Gráfico 2 - Variação da precipitação na Água Limpa e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Jan/2009 a Fev/2012.	56
Gráfico 3 - Variação da precipitação na Estação Borges e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Jan/2009 a Fev/2012.	57
Gráfico 4 - Variação da precipitação em Delfim Moreira e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Jan/2009 a Fev/2012.	57
Gráfico 5 - Variação da precipitação na Estação Santana e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Jan/2009 a Fev/2012.	58
Gráfico 6 - Variação da precipitação média (Thiessen) e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Jan/2009 a Mar/2010.	63
Gráfico 7 - Variação da precipitação média (Thiessen) e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Dez/2010 a Fev/2012.	63
Gráfico 8 - Identificação de Picos de precipitação média e respectiva resposta no nível do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa no período de Jan/2009 a Mar/2009.	66
Gráfico 9 - Pico 1: 28/01/2009 21:00hs a 29/02/2009 17:00hs (período de Jan/2009 a Mar/2009)	66
Gráfico 10 - Pico 2: 12/02/2009 10:20hs a 13/02/2009 4:00hs (período de Jan/2009 a Mar/2009)	67
Gráfico 11 - Pico 3: 14/02/2009 13:30hs a 15/02/2009 20:00hs (período de Jan/2009 a Mar/2009)	67
Gráfico 12 - Pico 4: 24/02/2009 16:30hs a 25/02/2009 5:20hs (período de Jan/2009 a Mar/2009)	68
Gráfico 13 - Identificação de Picos de precipitação média e respectiva resposta no Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa no período de Dez/2009 a Mar/2010	69
Gráfico 14 - Pico 1: 07/12/2009 14:30hs a 08/12/2009 23:50hs (período de Dez/2009 a Mar/2010).....	69

Gráfico 15 - Pico 2: 30/12/2009 4:00hs a 31/12/2009 2:50hs (período de Dez/2009 a Mar/2010).....	70
Gráfico 16 - Pico 3: 01/01/2010 4:10hs a 01/01/2010 20:30hs (período de Dez/2009 a Mar/2010).....	70
Gráfico 17 - Pico 4: 01/03/2010 3:30hs a 02/03/2010 1:10hs (período de Dez/2009 a Mar/2010).....	71
Gráfico 18 - Pico obtido com cálculo incompleto de precipitação média e falsa resposta no nível do Rio Sapucaí na Est. Santa Rosa - período Dez/2010 a Mar/2011	72
Gráfico 19 - Identificação de Picos de precipitação média e respectiva resposta no nível do Rio Sapucaí na Est. Santa Rosa - período Dez/2011 a Fev/2012 .	73
Gráfico 20 - Pico 1: 19/01/2012 15:00hs a 20/01/2012 4:00hs (período de Dez/2011 a Fev/2012).....	73

SUMÁRIO

1) Introdução.....	14
1.1) Objetivos	15
1.1.1) Geral.....	15
1.1.2) Específicos	15
1.2) Justificativa.....	16
2) Revisão Bibliográfica	17
2.1) Precipitação	17
2.1.1) Generalidades	17
2.1.2) Formação e tipo de precipitações.....	17
2.1.3) Precipitação média na bacia.....	19
2.2) Inundações.....	21
2.2.1) Previsão de inundações	26
2.2.2) Modelos de Previsão	27
2.2.3) Modelos de correlação e regressão.....	28
2.2.4) Sistemas de alerta contra inundações.....	35
2.3) Inundações em Itajubá	37
3) Materiais e Métodos.....	38
3.1) Área de estudo.....	38
3.1.1) Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí	38
3.1.2) O município de Itajubá	41
3.1.3) O Rio Sapucaí	42
3.2) Coleta de dados hidráulicos e hidrológicos	43
3.3) Cálculo da precipitação média – Polígonos de Thiessen.....	46
3.4) Identificação de Picos de precipitação e cota-resposta no Rio Sapucaí e cálculo da precipitação acumulada	52
3.5) Análise estatística - correlação linear e equação de regressão linear	53
4) Análise dos Resultados	54
4.1) Compilação dos dados de precipitação e cota altimétrica do Rio Sapucaí.....	54
4.2) Determinação da precipitação média no trecho da bacia do Rio Sapucaí pelo método dos Polígonos de Thiessen	60

4.3) Localização de Picos de precipitação e sua respectiva resposta na cota do Rio Sapucaí	64
4.4) Análise estatística da relação linear entre as variáveis precipitação e cota altimétrica	74
4.5) Conclusões	116
4.6) Perspectivas futuras.....	118
5) Referências.....	118
ANEXO A - Tabela de Distribuição t.....	122
ANEXO B – Valores críticos de r_c	123

1) Introdução

A humanidade no século XXI, transformada profundamente pela incrível capacidade tecnológica de superar distâncias, limitações, adversidades e desconfortos não pode negar o fato de que, assim como nossos antepassados mais distantes, não superou a deliberada força da natureza e seus efeitos diversos, dentre eles, a água na forma de inundações. O impacto destes fenômenos foi analisado por Lobster (1999), e citado no trabalho de Candido (2007), que constatou que um terço das catástrofes naturais ocorridas no mundo no período de 1988 a 1998 foi causada por inundações. A mensuração destes danos é possivelmente subestimada uma vez que as perdas são diversas e perduram no tempo. Mendes *et. al.* (2004) citando Gerhard Berz (2000) afirma que mais de 250 bilhões de dólares, nos últimos dez anos, foram empregados na mitigação dos efeitos das inundações no mundo. Desta forma o investimento em tecnologias de previsão de grandes eventos de precipitação e inundações se justifica, em última instância, pelos prejuízos materiais decorrentes.

As previsões destes eventos severos existem e são constantemente aplicadas e testadas com bons resultados. Castilho & Oliveira (1999) citam a existência do sistema de alerta contra enchentes na bacia do Rio Doce, operado pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil), que forneceu os parâmetros da bacia de estudo para uma previsão hidrológica na cidade de Governador Valadares que pode atingir 12 horas de antecedência na informação de eventos de inundação. Cita-se ainda o Sistema de Monitoramento de Enchentes, projeto elaborado em parceria entre Unifei (Universidade Federal de Itajubá) e Copasa (Companhia de Saneamento de Minas Gerais), que monitora toda a bacia do Alto e Médio Sapucaí e subsidia informações de eminência de inundações à órgãos de defesa social para importantes municípios como Itajubá, Santa Rita do Sapucaí e Pouso Alegre. Este sistema de informações fornecerá todos os dados utilizados neste trabalho.

De fato, tem-se neste trabalho, uma aplicação das informações obtidas pelo Sistema de Monitoramento de Enchentes do Rio Sapucaí através de um estudo de modelagem estatística por correlação, provendo assim um modelo

simples que auxilie na tomada de decisão para minimização dos impactos das inundações tão recorrentes no município de Itajubá.

1.1) Objetivos

1.1.1) Geral

Elaborar um modelo de previsão para cotas altimétricas do Rio Sapucaí no início da área urbana do município de Itajubá-MG, tendo-se como dados de entrada as precipitações ocorridas em tempo real em pontos à montante do município e dados de saída a cota a ser atingida na estação Santa Rosa em resposta à precipitação ocorrida. O modelo estatístico gerado consiste em um conjunto de equações de regressão linear obtido através do tratamento dos registros de precipitação e cota altimétrica obtidos pelo Sistema de Monitoramento de Enchentes do Rio Sapucaí.

1.1.2) Específicos

- Compilar os dados de precipitação em cinco estações de monitoramento e dados de cota altimétrica do Rio Sapucaí na estação Santa Rosa nos períodos chuvosos entre janeiro de 2009 e fevereiro de 2012;
- Estabelecer a precipitação média na bacia pelo método dos Polígonos de Thiessen para o mesmo período;
- Localizar Picos de precipitação média na série temporal de dados para o trecho de estudo da bacia do Alto Sapucaí e sua respectiva resposta na cota do Rio Sapucaí, na estação Santa Rosa, para o mesmo período;
- Estabelecer a correlação linear existente, e sua respectiva equação de regressão, entre precipitações de Pico no trecho de estudo e sua respectiva cota-resposta no Rio Sapucaí na estação Santa Rosa para o mesmo período;

- Realizar testes estatísticos de representatividade da correlação entre os dados e da equação de regressão obtida; bem como testes comparando resultados reais e aqueles fornecidos pelo modelo.

1.2) Justificativa

O município de Itajubá tem sofrido desde sua fundação com os impactos severos das inundações ao longo das margens do Rio Sapucaí. Segundo Moraes (2003) *apud* Pinheiro (2005), o município já registrou mais de cinco grandes inundações nos últimos 50 anos e outras demais anteriores a este período. Os dois últimos eventos ocorreram em 1991 e 2000, sendo este último o mais severo em no mínimo 50 anos (Pinheiro, 2005). Barbosa *et al.* (2000) afirmam que neste evento aproximadamente 80% da população itajubense foi atingida. A Figura 1 apresenta um foto do evento ocorrido em janeiro de 2000.



Figura 1 - Registro de inundação do Rio Sapucaí no município de Itajubá – MG ocorrida em janeiro de 2000. Fonte: Acervo Unifei

Distante dos registros formais e acadêmicos, milhares de cidadãos foram surpreendidos pelas águas que, devido às características da bacia, se elevam muito rapidamente e atingem ruas, escolas, fábricas, lojas e

residências com pouco tempo para que se possa salvaguardar bens materiais e vidas. Assim, a intenção de se obter um modelo que forneça uma cota próxima àquela que as águas do rio atingirão poderá significar a preservação de grande quantidade de bens e de pessoas, bem como uma maior segurança da população e entidades públicas.

A grande quantidade de informações fornecidas pelas estações de coleta de dados do Sistema de Monitoramento do Rio Sapucaí provê uma base de dados consistente e viabiliza diversos estudos sobre o comportamento da bacia. Assim, o uso da modelagem estatística pela equação de regressão visa corroborar a qualidade dos dados coletados, bem como aplicá-los de forma a fornecer informações de qualidade e precisão estatística à população.

2) Revisão Bibliográfica

2.1) Precipitação

2.1.1) Generalidades

A quantificação do volume de água incidente em uma determinada bacia hidrográfica num intervalo de tempo desejado é determinante para realizar-se qualquer atividade de gestão de recursos hídricos e em especial na previsão e alerta de inundações. De acordo com Tucci (2002), a água proveniente da atmosfera que atinge a superfície terrestre é denominada, em Hidrologia, como precipitação. Esta pode ocorrer de diferentes formas tais como neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve. A chuva, devido à sua capacidade de produzir escoamento e contribuir para o aumento da vazão de rios, é o tipo de precipitação mais importante para a Hidrologia.

2.1.2) Formação e tipo de precipitações

A condensação do vapor d'água contido na atmosfera, fenômeno este que possibilita a precipitação, ocorre através de processos de ascensão de massas de ar úmido e processos de formação e crescimento de gotas de

chuva. Segundo Villela e Matos (1975) a formação da precipitação ocorre inicialmente com o aquecimento por condução do ar úmido presente nas camadas baixas da atmosfera, esta parcela de ar sofre ascensão de forma adiabática, expandindo-se e resfriando-se até atingir o nível de condensação. Neste instante, existindo partículas na atmosfera circundante tais como sais, cristais de gelo ou compostos químicos diversos, ocorre a formação gotas de chuva em torno destas partículas chamadas de núcleos higroscópicos ou núcleos de condensação. Posteriormente as gotículas de chuva aumentam de tamanho; a precipitação ocorre quando o peso da gota de chuva é maior que a resistência do ar e suas componentes verticais ascendentes.

As precipitações se diferenciam através dos processos responsáveis pela movimentação vertical das massas de ar que por sua vez irão permitir a condensação do ar úmido. A seguir são citados os tipos de precipitação (Tucci, 2002 & Villela, Matos, 1975 & Wanielista, Kersten, Eaglin, 1997):

- a) **Precipitações Convectivas:** são aquelas em que o ar próximo à superfície é aquecido criando uma estratificação térmica ao longo da vertical que se mantém em um equilíbrio instável. Perturbado este equilíbrio (ventos, superaquecimento), o ar aquecido e mais leve se eleva bruscamente até atingir seu nível de condensação com formação de nuvens, e na maioria dos casos, chuvas de grande intensidade, pequena duração e extensão variável. Ocorrem frequentemente em regiões equatoriais, pode ocorrer também em regiões tropicais por ocasião de verões ou dias com altas temperaturas. Estas precipitações podem causar inundações consideráveis em pequenas bacias, sobretudo em virtude de problemas de drenagem urbana;

- b) **Precipitações Orográficas:** são aquelas formadas por ventos quentes e úmidos vindos geralmente do oceano para o continente que se deparam com alguma barreira de altitude elevada, forçando o movimento ascendente da massa de ar. Atingido o nível de condensação ocorre a formação de chuvas de pequena intensidade, grande duração e pequena extensão. Quando a massa de ar ultrapassa a barreira montanhosa tendo já atingido seu nível de condensação, toda a

umidade que fora despejada na face frontal da montanha agora induz a formação de áreas secas ou semi-áridas na face oposta do terreno, que recebe a massa de ar sem umidade. As chuvas na Serra do Mar (Litoral Sudeste do Brasil) e aquelas nas áreas costeiras do Oceano Pacífico (Litoral Oeste da América do Norte) são exemplos típicos deste tipo de chuva.

- c) **Precipitações Ciclônicas:** são aquelas provenientes de interações entre massas de ar quentes e frias, ocorridas nas extremidades das massas de ar com diferentes pressões, as chamadas frentes. Estas associações ocorrem sempre em regiões de baixa pressão e podem ser classificadas segundo Villela e Matos (1975) como frontais e não frontais. A precipitação ciclônica não frontal ocorre quando a massa de ar é elevada devido a uma convergência horizontal em áreas de baixa pressão. A precipitação ciclônica frontal é resultado da ascensão do ar quente sobre o ar frio na zona de encontro entre duas massas. Estas precipitações produzem chuvas de grande duração, intensidade média e grades extensões. Elas podem produzir cheias em grandes bacias.

2.1.3) Precipitação média na bacia

O volume de água precipitado em uma bacia pode apresentar grande variabilidade temporal e espacial, sendo regido por variáveis como movimentos de massas de ar, topografia, tipo de cobertura do solo e outros fatores que conferem à precipitação um caráter dinâmico (Wanielista, Kersten, Eaglin, 1997). Esta variabilidade é conhecida através da boa disposição no terreno dos pluviômetros e pluviógrafos, permitindo assim inferir a precipitação média ocorrida na área de estudo. A seguir são descritos os métodos frequentemente utilizados:

- I. **Método da média aritmética:** este método é o mais simples a ser aplicado, uma vez que a precipitação média na bacia será a média aritmética dos valores de precipitação de cada estação, de acordo com a equação (1) a seguir:

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (1)$$

Onde:

- P_m é a precipitação média na bacia;
- n é o número de estações;
- P_i é o valor de precipitação na estação i .

Este método não considera distribuição espacial irregular dos postos de registro de precipitação e não considera as variações geográficas da precipitação, sendo aplicável para regiões planas e com boa densidade de postos de medição (Tucci, 2002).

- II. Método das isoietas:** segundo Villela e Matos (1975) o método das isoietas é o método mais preciso para determinação da precipitação média. Neste método, são construídas curvas de igual precipitação (isoietas) na bacia a partir dos dados pontuais obtidos pelos pluviômetros, obtendo-se assim um mapa que represente a variabilidade da precipitação. O valor médio é obtido através da ponderação da precipitação média entre isoietas sucessivas pela área entre as isoietas, dividindo-se esse produto pela área total da bacia ou, segundo a equação (2) a seguir:

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{p_i + p_{i+1}}{2} \right) A_i}{A} \quad (2)$$

Onde:

- P_m é a precipitação média na bacia;
- n é o número de estações;
- p_i é o valor da isoietas de ordem i ;
- A_i é a área entre as duas isoietas;
- A é a área total da bacia.

III. Método de Thiessen: o método de Thiessen considera a não-uniformidade da distribuição espacial dos postos de registro de precipitação, entretanto não leva em conta o relevo da bacia. Este método atribui pesos relativos a cada estação de medição em função da área de influência desta, determinada pelas mediatrizes que unem dois postos adjacentes. Sendo assim, assume-se que determinada estação represente em média a precipitação ocorrida em toda sua área adjacente. Tucci (2002) afirma que o cálculo da precipitação média pode ser automatizado, já que uma vez estabelecida da rede de pluviômetros, os valores de suas áreas de influência permanecem os mesmos, variando apenas as precipitações obtidas. Este fato permite o cálculo instantâneo da precipitação média na bacia, valor essencial para sistemas de previsão de inundações. Gomig, Lindner & Kobiyama (2007) realizaram a delimitação dos polígonos de Thiessen para a bacia do rio do Peixe/SC, a partir de imagens de satélite Landsat 7/ETM+ e ferramentas SIG, o proporcionou celeridade e precisão aos resultados. O cálculo da precipitação média é realizado pela equação (3) a seguir:

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times P_i}{A} \quad (3)$$

Onde:

- P_m é a precipitação média na bacia;
- A_i é área de influência da estação i ;
- P_i é o valor de precipitação na estação i ;
- A é a área total da bacia

2.2) Inundações

De forma geral, o termo “inundação” é comumente utilizado para denominar a ocorrência de enchentes, alagamentos e transbordamentos. Entretanto, segundo Ferreira (1988) *apud* Candido (2007) os termos “enchente” e “inundação” se referem a fenômenos distintos uma vez que o verbo “encher”,

raiz da palavra enchente, denota segundo o dicionário “Aurélio” “*ocupar o vão, a capacidade ou a superfície de; tornar cheio ou repleto*”. Já o verbo “inundar”, raiz da palavra inundação, denota “*cobrir de água; submergir; alagar; transbordar; extravasar*”. Sendo assim, cabe determinar qual é a delimitação da superfície (leito) ocupada pelo volume de água escoada por um corpo d’água e assim definir a ocorrência de destes dois fenômenos distintos. Christofolletti (1981) define quatro tipos de leitos distintos:

- **Leito de vazante:** é o espaço ocupado pelo escoamento das águas baixas acompanhando a linha de maior profundidade do canal (talvegue);
- **Leito menor:** é um espaço bem delimitado, com margens geralmente bem definidas, e no qual a frequência de escoamento é suficiente para impedir o estabelecimento de vegetação;
- **Leito maior sazonal e leito maior excepcional:** o critério de classificação é exatamente a periodicidade das cheias. No caso do leito sazonal, as cheias ocorrem regularmente, pelo menos uma vez no ano. Por sua vez, o leito excepcional compreende o espaço ocupado pelas águas com frequência irregular, e com períodos não inferiores a um ano.

Segundo Goerl e Kobiyama (2005) *apud* Andrade (2006) há ainda uma definição para o termo “alagamento” que se refere ao acúmulo de água pluvial na superfície devido a deficiências nas obras de drenagem. Assim, o processo de ocorrência de uma inundação sempre é precedido de uma enchente, uma vez que o rio atinge seu nível máximo de drenagem de sua calha ou leito menor, em seguida este nível pode ser ultrapassado e as águas atingem a planície de inundação ou leito maior, ocorrendo assim uma inundação. A Figura 1 apresentada pelo mesmo autor ilustra mais claramente estas diferenças:

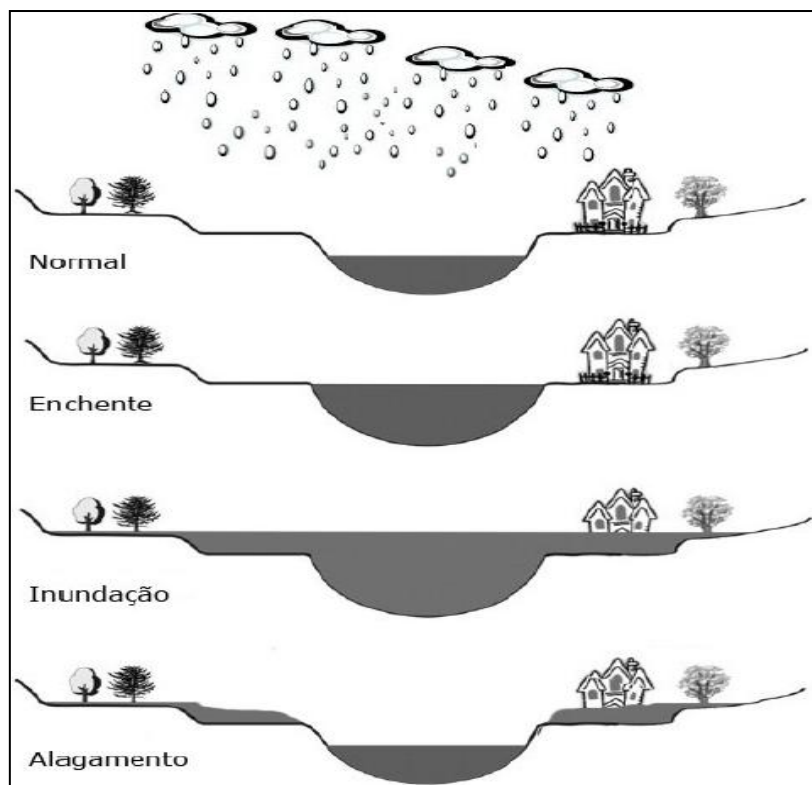


Figura 2 -Elevação do nível de um rio e interação nas suas margens. Fonte:
Adaptado Goerl e Kobiyama (2005) apud Andrade (2006)

As interações ocorridas nas margens dos rios entre o volume de água que extravasa para suas margens ou planícies de inundação e a ocupação destas áreas representam os maiores agravantes dos impactos advindos de grandes chuvas. A ocupação antrópica de áreas sazonalmente ocupadas pelos rios é o principal fator que agrava os diversos danos decorrentes de inundações; entretanto, esta problemática remonta às antigas civilizações como a egípcia que convivia com as inundações constantes do Rio Nilo e sua ocupação conflituosa (Gore, 1993; Simmons, 1996; Fagan, 2000 *apud* Candido, 2007). Entretanto, o problema nos dias atuais é proporcional à imensa população mundial que exerce enorme pressão nas áreas próximas aos cursos d'água, trazendo problemas como:

- Aumento da impermeabilização devido à urbanização e o consequente aumento de alagamentos;
- Ocupação de áreas de preservação permanente que funcionam como zona amortecimento das águas dos rios;

- Supressão de vegetação na bacia aumentando o escoamento superficial e o maior aporte de água aos rios;
- Canalização de córregos e a retificação de rios aumentando a velocidade de escoamento e diminuição da atenuação de ondas de cheia;
- Assoreamento de rios diminuindo sua capacidade de armazenamento.

Por todo o mundo as inundações, via de regra, provocam em maior ou menor grau, efeitos desastrosos para diversas populações. No rio Mekong, importante provedor para países com imensas dificuldades sociais, econômicas e ambientais como Laos, Camboja, Vietnam e Tailândia, as inundações ocorridas no ano 2000 causaram aproximadamente US\$ 400 milhões em perdas econômicas e 800 mortes, na maioria crianças (Manusthiparom; Apirumanekul; Mahaxay, 2006).

Mendes *et. al.* (2004) citando o trabalho de Berz (2000) afirma os seguintes dados sobre os efeitos das inundações no mundo no período de 1985 a 1999:

- As inundações corresponderam a aproximadamente 29% das ocorrências registradas catástrofes naturais;
- As inundações respondem por 53% das mortes causadas por catástrofes naturais, o que corresponde a 382.085 mortes;
- As inundações são responsáveis por 29% das perdas econômicas causadas pelas catástrofes naturais, o que corresponde a US\$ 275 bilhões.
- Apenas 10% do total de perdas relacionadas às inundações eram seguradas.

Um bom exemplo de boa gestão pública em políticas e sistemas de controle de inundações é apresentado por Brouwe e Van EK (2004), em estudos realizados na Holanda. Os autores avaliam a adoção de medidas alternativas de controle de inundações além dos tradicionais monitoramentos e obras estruturais. O estudo conclui que medidas alternativas como mudança no

uso da terra, restauração da planície de inundação e demais medidas, quando associadas a medidas corroboradas como monitoramento e construção de diques, podem levar a bons resultados.

No Brasil, a maior concentração de inundações ocorre nas regiões Sul e Sudeste segundo a ANA (Agência Nacional das Águas) com observações entre 1998 e 1999, conforme apresentado por Mendes *et. al.* (2004) na Figura 2:

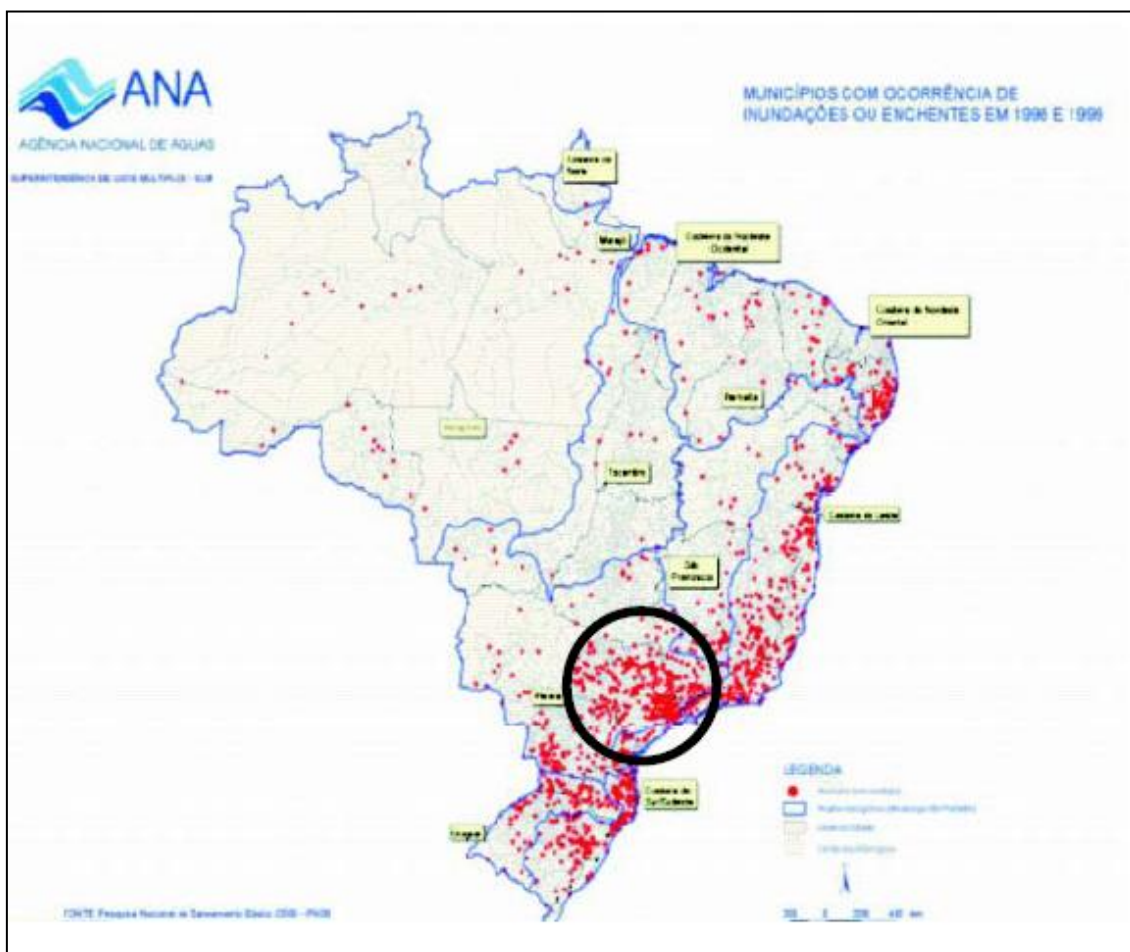


Figura 3 -Municípios atingidos por inundações no período de 1998 a 1999.

Fonte: ANA – Agência Nacional das Águas *apud* Mendes *et. al.* (2004)

Os danos causados pelas inundações serão dificilmente evitados, uma vez que permeiam diversos aspectos, entretanto algumas medidas permitem a minimização destes efeitos. Tucci (2002) afirma que as medidas para controle de inundações podem ser de dois tipos:

- **Medidas estruturais:** são aquelas medidas que atuam diretamente sobre o corpo d'água como: diques, reservatórios, bacias de amortecimento, canais de desvio, etc. Estas medidas procuram alterar as características físicas da bacia (Andrade, 2006), e podem também alterar os mecanismos entre precipitação e vazão, como por exemplo, recuperar a cobertura do solo na cabeceira da bacia, controlando a erosão, aumentando a permeabilidade do solo, diminuindo o escoamento superficial, acarretando em uma diminuição dos Picos de hidrogramas de cheia. Em geral estas medidas são caras, dispendiosas e podem provocar impactos ambientais negativos consideráveis.
- **Medidas não-estruturais:** são aquelas que atuam na adaptabilidade da população que vive em áreas sujeitas às inundações e não alteram o meio físico. Podem-se citar medidas como edificações à prova de inundações, seguro de inundações, zoneamento de áreas inundáveis, retirada de populações de áreas de risco e sistemas de monitoramento, previsão e alerta de eventos extremos. Estas medidas estão relacionadas à melhoria da gestão de políticas de ocupação na planície de inundação e podem também auxiliar decisões na eminência destes eventos. De forma geral as medidas não-estruturais apresentam menor custo e maior aplicabilidade.

Vale ressaltar que um bom gerenciamento de riscos de inundações deve combinar ambas as medidas de modo a potencializar melhores resultados e contrabalancear os benefícios e as limitações de cada tipo de medida.

2.2.1) Previsão de inundações

O convívio com as inundações, que na maior parte dos casos não pode ser evitada, permite a evolução de diversas medidas de previsão ou antecipação do dano eminente. Estimar a magnitude deste dano significa atenuá-lo, assim a engenharia se concentrou na árdua tarefa de quantificar a vazão de cheia de determinado corpo d'água. A dificuldade em se obter a vazão de cheia, parâmetro de grande importância para diversas outras

medidas estruturais e não estruturais, tem motivado desde o século XVIII o desenvolvimento de métodos que estimam a vazão de Pico a partir de observações regulares de chuva e nível (Vianna, 2000).

Tucci e Collischonn (2002) afirmam que a previsão de vazão em tempo real ou curto prazo é aplicada para um melhor controle de inundações e operações de obras hidráulicas. As previsões de curto prazo, assim como as de longo prazo, utilizam-se de séries hidrológicas adotadas como estacionárias. Entretanto, as incertezas que podem alterar a estacionaridade das séries provocam erros e limitações de estimativa.

Ainda segundo o autor, a previsão de inundações é melhorada significativamente com a previsão de precipitação principalmente por meio de radares meteorológicos, de forma a minimizar os erros advindos da baixa resolução das redes telemétricas de medição de precipitação.

2.2.2) Modelos de Previsão

Segundo Rossi (1992) *apud* Vianna (2000), a primeira formulação para estimação de vazões de Pico foi feita em 1851 com a fórmula de Mulvaney, conhecida com “método racional”. Segundo o autor, os estudos hidrológicos na segunda metade do século XIX e nas primeiras décadas do século XX utilizaram métodos empíricos. Desde o início da década de 1940 foram abordados aspectos meteorológicos para os eventos de inundações. Já no início da década de 1970 intensificou-se o uso de modelos chuva-vazão para previsões instantâneas.

De acordo com Tucci e Collischonn (2000), a vazão de um rio é o resultado de variáveis como precipitação na bacia, balanço hídrico do solo, evapotranspiração e o escoamento superficial. Este processo é descrito por dois modelos matemáticos: modelos conceituais e modelos empíricos. Segundo Tucci (1998) *apud* Santos (2009) os modelos conceituais podem ser subclassificados em semiconceituais e físicos. Os modelos semiconceituais estão relacionados às características do processo, embora mantenham razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas, já os modelos físicos utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico para aproximar seus parâmetros da física do sistema. Santos (2009) pontua as

principais equações para representar os processos hidrológicos são as equações de conservação da massa, energia e quantidade de movimento (equações de Saint Venant). De acordo com Riguetto (1998), estes modelos construídos a partir de uma abordagem física do processo hidrológico são denominados modelos hidráulico-hidrológicos.

De acordo com Tucci e Collischonn (2000), os modelos conceituais para previsão da vazão a partir da precipitação são denominados “precipitação-vazão”. Estes modelos, segundo Vianna (2000) representam a parcela do ciclo hidrológico entre a precipitação e o escoamento superficial, permitindo assim a determinação da vazão ou o hidrograma na seção escolhida a partir dos dados de precipitação.

Os modelos empíricos introduzem variáveis de entrada como precipitação e vazões e se valem de equações matemáticas para obtenção de vazões de saída, sem que representem de forma direta o comportamento hidrológico da bacia. Frequentemente são utilizadas técnicas de regressão múltipla, média móvel, redes neurais (Tucci e Collischonn, 2000) e métodos de correlação e análise de regressão (Santos, 2009). O estudo aqui apresentado é um modelo empírico.

2.2.3) Modelos de correlação e regressão

Segundo Triola (2008), o termo *correlação* denota a existência de uma relação qualquer entre duas variáveis. Este relacionamento entre os dados pode ser observado graficamente através de diagrama de dispersão que pode, ou não, apresentar um padrão de disposição. Quando este padrão de dispersão dos dados das duas variáveis se assemelha ao padrão de uma reta, têm-se relações lineares, ou correlação linear. A força da relação entre as duas variáveis é estabelecida através do coeficiente de correlação linear r , este coeficiente quantifica a intensidade da relação linear entre dados emparelhados x e y de uma amostra. Segundo o autor, originalmente este coeficiente foi desenvolvido por Karl Pearson (1857-1936), deste fato comumente utiliza-se também o termo *coeficiente de correlação do produto de momentos de Pearson*.

Triola (2008) afirma que, como o coeficiente de correlação linear r é calculado a partir de dados amostrais, é necessário considerar-se alguns requisitos para que o coeficiente possa ser calculado. São eles:

- A amostra de dados emparelhados (x,y) deve ser uma amostra aleatória;
- O diagrama de dispersão obtido pelos dados deve apresentar um padrão de uma reta;
- Os *outliers* devem ser removidos no caso do ponto (x,y) se tratar de um erro de leitura. Não sendo o caso, deve-se calcular o valor de r com e sem o *outlier*.

O trabalho apresentado por Naghettini & Pinto (2007), que relaciona vazões médias anuais e alturas anuais de precipitação em determinada estação do Rio Paraopeba, conclui que a considerável dispersão entre os dados e a presença de *outliers* demonstra a aleatoriedade presente em y que não pode ser explicada unicamente pela variação em x . Esta variação se refere às demais variáveis como, por exemplo, evapotranspiração, infiltração, interceptação, variabilidade espacial etc., que podem aumentar ou reduzir o grau de dispersão dos dados. De fato, estatisticamente, pode-se comprovar tal constatação através dos parâmetros variação total, variação explicada e variação total não-explicada, que serão abordados mais a frente.

Conceitualmente, a medida da variação conjunta das variáveis (variância) ou co-variação (covariância) pode ser observada em um diagrama de dispersão que ilustra as observações simultâneas das variáveis X e Y e pode ser quantificado pelo coeficiente amostral de correlação (r), dado pela equação (4) (Naghettini & Pinto, 2007):

$$r = \frac{1}{n} \frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{s_x s_y} \quad (4)$$

Onde:

- n é o número de observações

- x_i é valor numérico da variável x na i -ésima observação;
- \bar{x} é o valor médio obtida através das n observações de x ;
- y_i é valor numérico da variável y na i -ésima observação;
- \bar{y} é o valor médio obtido através das n observações de y ;
- s_x é o desvio padrão amostral da variável x ;
- s_y é o desvio padrão amostral da variável y .

Triola (2008) apresenta uma equação simplificada para o coeficiente de correlação que facilita os cálculos manuais e com utilização de planilhas. Essa simplificação é mostrada na equação (5).

$$r = \frac{n(\sum xy - (\sum x)(\sum y))}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (5)$$

Tem-se que este coeficiente adimensional com variação entre -1 e 1 é o resultado da padronização da covariância amostral entre duas variáveis pelos seus respectivos desvios-padrão amostrais. Segundo Lira (2004) *apud* Callegari-Jacques (2003), existe correlação perfeita quando os coeficientes $|r| = 1$; entretanto, para valores práticos o coeficiente pode ser avaliado qualitativamente da seguinte forma:

- Correlação linear fraca: $0 < |r| < 0,3$;
- Correlação linear moderada: $0,3 < |r| < 0,6$;
- Correlação linear forte: $0,6 < |r| < 0,9$;
- Correlação linear muito forte: $0,9 < |r| < 1,0$.

De forma a assegurar a relevância e representatividade do coeficiente de correlação obtido, utiliza-se um teste de hipótese formal. Naghettini & Pinto (2007) afirmam que a estatística apropriada para este teste é a distribuição t de Student com $n-2$ graus de liberdade, apresentada na equação (6).

$$t_0 = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (6)$$

Onde:

- t_0 é a estatística do teste;
- r é o coeficiente de correlação obtido;
- n é o número de amostras.

Se o $|t_0|$ for maior que o valor de $t_{\text{crítico}}$ (Tabela de Distribuição t – Anexo A) para um teste bilateral, nível de significância α , com $(n-2)$ graus de liberdade, a hipótese de que o coeficiente de correlação obtido é nulo é rejeitada, assim adota-se a hipótese alternativa de que o valor obtido é diferente de zero, portanto significativo.

Segundo Triola (2008), o método do valor crítico do coeficiente de correlação de Pearson, também pode ser utilizado. Este método, aplicado no presente estudo, simplifica os cálculos e é amplamente utilizado. Neste método a estatística de teste é o próprio valor de r , os valores críticos são obtidos na tabela apresentada no Anexo A. Semelhantemente ao teste t , se $|r|$ for maior que o valor de $r_{\text{crítico}}$ (Valores Críticos de r_c – Anexo B), a hipótese de que o coeficiente de correlação obtido é nulo é rejeitada, conclui-se que a hipótese alternativa a correlação é diferente de zero, portanto significativa.

Detectando-se a existência de correlação linear entre as variáveis x e y , pode-se estabelecer uma equação, - equação de regressão - que expresse y em termos de x . Desta forma admite-se a existência uma função que explica em termos médios a variação de uma das variáveis com a variação da outra, considerando as distâncias entre os dados plotados em um diagrama de dispersão. Admitindo ser uma reta a linha teórica de regressão, a função que denota o relacionamento entre X e Y é representada pela equação (7):

$$Y = \alpha + \beta X + e \quad (7)$$

Onde:

- Y é a variável dependente,
- X é a variável independente,
- α e β são os coeficientes do modelo,
- e denota os erros da regressão.

Esses coeficientes podem ser estimados pelos coeficientes a e b obtendo-se uma reta estimativa pela equação (8) abaixo:

$$\hat{y}_i = a + bx_i \quad (8)$$

A estimativa destes coeficientes a e b pode ser feita de várias maneiras. Naghettini & Pinto (2007) afirma que o um dos procedimentos mais adequados é a aplicação do método dos mínimos quadrados, no qual objetiva-se minimizar a soma dos quadrados dos erros da regressão, ou resíduos. Sendo assim os valores de a e b são obtidos pelas equações (9) e (10).

$$b_1 = \frac{(n \times \sum xy) - (\sum x \times \sum y)}{(n \times \sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (9)$$

$$b_0 = (\bar{y} - (b_1 \times \bar{x})) \quad (10)$$

O resíduo obtido pode ser chamado de *desvio não-explicado* e corresponde à distância vertical $y - \hat{y}$, que é a distância entre o ponto (x,y) e a reta de regressão. A distância vertical $\hat{y} - \bar{y}$, que é a distância entre o valor previsto de y e a reta horizontal que passa pela média amostral \bar{y} , é chamada de *desvio explicado*. A distância vertical $y - \bar{y}$, que é a distância entre o ponto (x,y) e a reta horizontal que passa pela média amostral \hat{y} , é chamada de *desvio total*. Se somar-se os quadrados dos desvios usando todos os pontos (x,y) obteremos quantidades de *variação*.

A **variação total** é a soma dos quadrados dos valores do desvio total, a **variação explicada** é a soma dos quadrados dos valores do desvio explicado, e a **variação não-explicada** é soma dos quadrados dos valores do desvio não-explicado, conforme apresentado nas equações (11,12,13):

$$\textit{Variação total} = \sum(y - \bar{y})^2 \quad (11)$$

$$\textit{Variação explicada} = \sum(\hat{y} - \bar{y})^2 \quad (12)$$

$$\textit{Variação não explicada} = \sum(y - \hat{y})^2 \quad (13)$$

Tendo-se os valores de variação, é possível encontrar a proporção da variação total em y que pode ser explicada pela relação linear entre x e y , ou seja, o **coeficiente de determinação (r^2)**, representado pela equação (14).

$$r^2 = \frac{\textit{variação explicada}}{\textit{variação total}} \quad (14)$$

Após obter-se uma estimativa amostral de y (\hat{y}), submetê-la a um teste de hipótese e quantificar as variações existentes na massa de dados, ainda assim vê-se que a estimativa pontual obtida não fornece qualquer informação sobre o nível de precisão que esta previsão pode ter. Sendo assim, Triola (2008) pontua que, para superar esta desvantagem, deve-se desenvolver um *intervalo de previsão* que corresponde a uma estimativa intervalar de um valor previsto de y . Para obtenção deste intervalo, estabelece-se um parâmetro de medida da dispersão dos pontos amostrais em torno da reta de regressão, chamado de **erro padrão da estimativa**, representado pela equação (15).

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{y})^2}{n-2}} \quad (15)$$

A estimativa do erro padrão da estimativa (s_e) determina a mesma informação obtida com a estimativa do desvio padrão, o qual quantifica a dispersão dos dados em torno da média. Sendo assim, este parâmetro foi usado por Santos *et. al.* (2009) como critério de classificação de ocorrência, ou não, de mudança climática significativa nos dados de precipitação no estado do Ceará. Neste estudo os autores avaliaram 6 índices climáticos derivados de precipitações e estabeleceram como possíveis mudanças climáticas aquelas em que o índice apresentava tendência linear (positiva ou negativa) superior ao erro padrão da estimativa. Back (2009) utilizou o erro padrão de estimativa

como comparativo das relações entre precipitações estimadas para diferentes tempos de duração e tempos de retorno em Urussanga – SC.

Após a obtenção do erro padrão da estimativa (s_e), é possível estabelecer uma estimativa intervalar que dará o conhecimento da confiabilidade do intervalo no qual o valor de y previsto se insere. Triola (2008) traz que o intervalo de precisão é determinado pela equação (16). Vale ressaltar que a estimativa intervalar se aplica a um valor individual de y , dado um valor de x_0 . Portanto, para o conhecimento geral do intervalo de confiança de todos os valores de y previstos, basta o cálculo da média de cada margem de erro (E) (equação 17) obtida para cada y individual.

$$\hat{y} - E < y < \hat{y} + E \quad (16)$$

Onde:

$$E = t_{\frac{\alpha}{2}} \times s_e \times \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n} + \frac{n(x_0 - \bar{x})^2}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}\right)} \quad (17)$$

Onde:

- $t_{\frac{\alpha}{2}}$, valor crítico para distribuição t com $(n-2)$ graus de liberdade;
- s_e é o erro padrão da estimativa;
- x_0 é o valor de x amostrado;
- \bar{x} é o valor médio amostral de x ;
- n é número de amostras.

De acordo por Tucci e Collischonn (2000) os modelos empíricos, dentre os quais se incluem os modelos de correlação/regressão, apresentam limitações quando os eventos ocorrem fora da faixa de ajuste de valores, não sendo assim recomendável sua extrapolação. Both *et al.* (2008) utilizaram o modelo matemático empírico de correlação linear simples do tipo cota-cota, no qual a ser constatada a elevação no nível do rio Taquari no ponto de monitoramento a montante, em Veranópolis – RS, estimaram os níveis a serem

alcançados à jusante, nos municípios de Encantado – RS e Estrela – RS. O autores afirmam que obtiveram previsões de até 10 horas de antecedência e concluíram que, apesar da considerável margem de erro das previsões, a aplicação da análise de correlação gerou bons resultados.

2.2.4) Sistemas de alerta contra inundações

De acordo com Andrade (2006), sistemas de alerta buscam informar a comunidade da eminência de um desastre natural. Krzystofowicz e Davis (1983), citados pelo autor, afirmam que os sistemas de alerta de inundações contemplam três elementos: monitoramento, previsão e decisão. O monitoramento fornece informações para previsão do hidrograma na seção de interesse e, assim, subsidia a tomada de decisões.

Tucci e Collischonn (2002) afirmam que sistemas de previsão de curto prazo têm os seguintes componentes ilustrados na Figura 3:

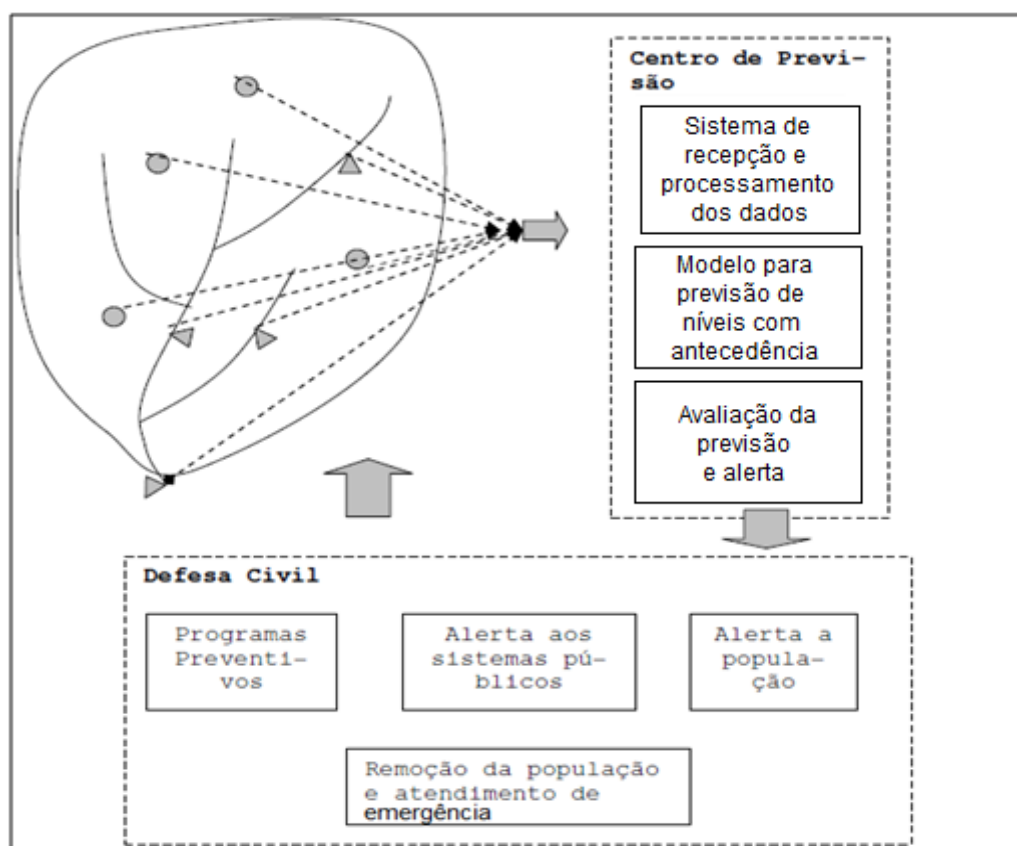


Figura 4 -Características dos sistemas de alerta. Fonte: Tucci e Collischonn (2002)

Andrade (2006) cita diversos sistemas de monitoramento em operação no Brasil com diferentes níveis de sofisticação e precisão:

- Bacia do Rio Itajaí: uso de telemetria, com previsão de até 8 horas;
- Cidade de Manaus: uso de correlação entre cota no dia e o Pico da cheia daquele ano. Previsão de vários dias devido a características da bacia.
- Pantanal: uso de correlação de cotas da série histórica. Previsão para quatro semanas seguintes.
- Bacia do Rio Doce: uso de correlação de vazões (Andrade, 2006) e demais modelos nos trabalhos de Castilho e Davis (2003), Castilho e Oliveira (1999). Previsão de 3 a 24 horas.
- Cidade de São Paulo: uso de telemetria e radar meteorológico, com boletins a cada cinco minutos.
- Cidade do Rio de Janeiro: uso de telemetria, radar meteorológico e imagens de satélite. Tempo de previsão não informado.

Além dos diversos exemplos citados, o presente estudo tem como base as informações obtidas pelo Sistema de Monitoramento de Enchentes do Rio Sapucaí, projeto este elaborado com a parceria entre a Universidade Federal de Itajubá (Unifei) e a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa). Este projeto monitora o nível do Rio Sapucaí e alguns afluentes através de dezoito estações de medição de precipitação e cota altimétrica com medição em tempo real por telemetria. O sistema opera desde 2004 e suas estações estão dispostas de forma a obter informações precisas para toda a bacia do Alto e Médio Sapucaí e suas cidades como Itajubá, Santa Rita do Sapucaí e Pouso Alegre. As funcionalidades do sistema serão detalhadas no item 3.2.

Matos (2007) utilizou em seu estudo de transladação de ondas de cheia no Rio Sapucaí, no município de Itajubá-MG o mesmo sistema de transmissão de dados por telemetria para obtenção de dados de cota altimétrica no local onde seria instalada a Estação Cantagalo. Pinheiro (2005) em seu estudo também para o município de Itajubá-MG estimou vazões máximas anuais

históricas e demais parâmetros hidrológicos com base em séries históricas de fluviômetros da região e os trasladou para uma seção de captação da Copasa - que se tornaria a Estação Santa Rosa de monitoramento.

2.3) Inundações em Itajubá

O estudo realizado por Pinheiro (2005) apresenta diversos eventos de inundação na história do município, inclusive com registros fotográficos de vários deles. De acordo com Moraes (2003) *apud* Pinheiro (2005), a maior cheia no município ocorreu em 1874, com maior nível de cheia de todos os registros obtidos pelo trabalho de Pinheiro (2005).

Recentemente duas cheias se destacaram: a ocorrida no ano de 1991 e a ocorrida em 2000, com tempos de recorrência de 33,1 e 588,9 anos, respectivamente. No evento de 1991, as chuvas ocorreram entre os dias 14 e 16 de janeiro, com precipitações nas estações de medição nos municípios de Delfim Moreira e Campos do Jordão, variando entre 90 mm e 160 mm. Já a cheia de 2000, ocorrida nos dias 2, 3 e 4 de janeiro atingiu precipitações máximas de 350 mm sobre as cabeceiras da bacia do Rio Sapucaí, sendo que seu nível ultrapassou a marca de 8 metros (Pinheiro, 2005). A partir do ano de 2005 não foram registradas inundações de grande magnitude, apenas no ano de 2007 o Rio Sapucaí transbordou em alguns pontos isolados.

No trabalho de Moni (2006) foram gerados, com auxílio do software de sistema de informação geográfica *Spring*, diversos cenários de inundação para o município de Itajubá variando-se a cota de inundação e tempo de recorrência associado. Foram modelados eventos com tempos de recorrência de 1, 10, 100, 500, 1000 e 1500 anos, tais quais ocorridos no passado como os eventos de 1929 (TR = 1.781 anos), 1945 (TR = 1.139 anos), 1957 (TR = 934,7 anos) e 2000 (588,9 anos).

3) Materiais e Métodos

Para a elaboração do presente estudo, foram percorridas as seguintes etapas apresentadas de forma sucinta na Figura 5 e posteriormente detalhada no texto:

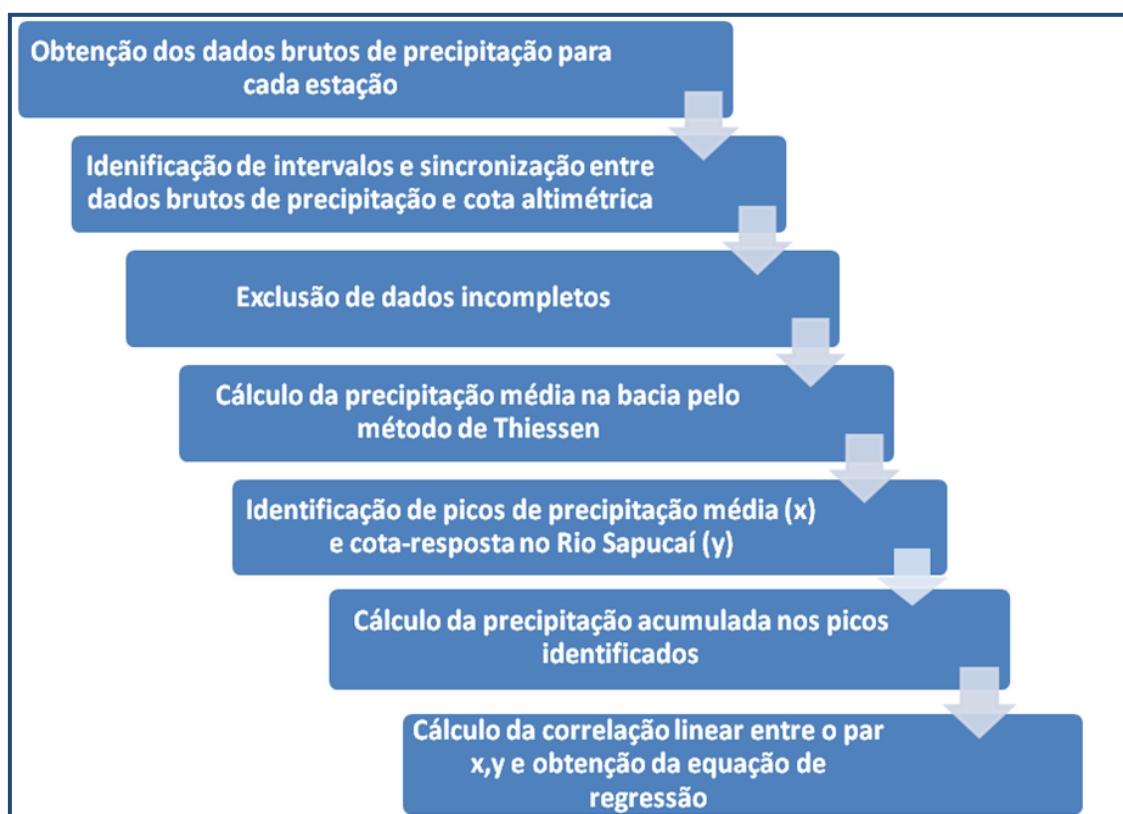


Figura 5 -Metodologia esquemática para o presente estudo

A seguir são apresentadas em detalhes as etapas de realização do estudo.

3.1) Área de estudo

3.1.1) Bacia Hidrográfica do Alto Sapucaí

Com uma extensão de aproximadamente 9.456 km² desde o alto da Serra da Mantiqueira no estado de São Paulo, até a foz no Lago da Represa de Furnas na região sul de Minas Gerais, a bacia hidrográfica do Rio Sapucaí é

composta de diferentes feições fisiográficas, apresentando desde escarpas, vertentes e colinas de grande altitude até grandes planícies de inundação (Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, 2010). Segundo o Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM) juntamente com o Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí a bacia é subdividida em Alto, Médio e Baixo Sapucaí, delimitando as seguintes regiões conforme a Figura 6 elaborada para o Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (2010):

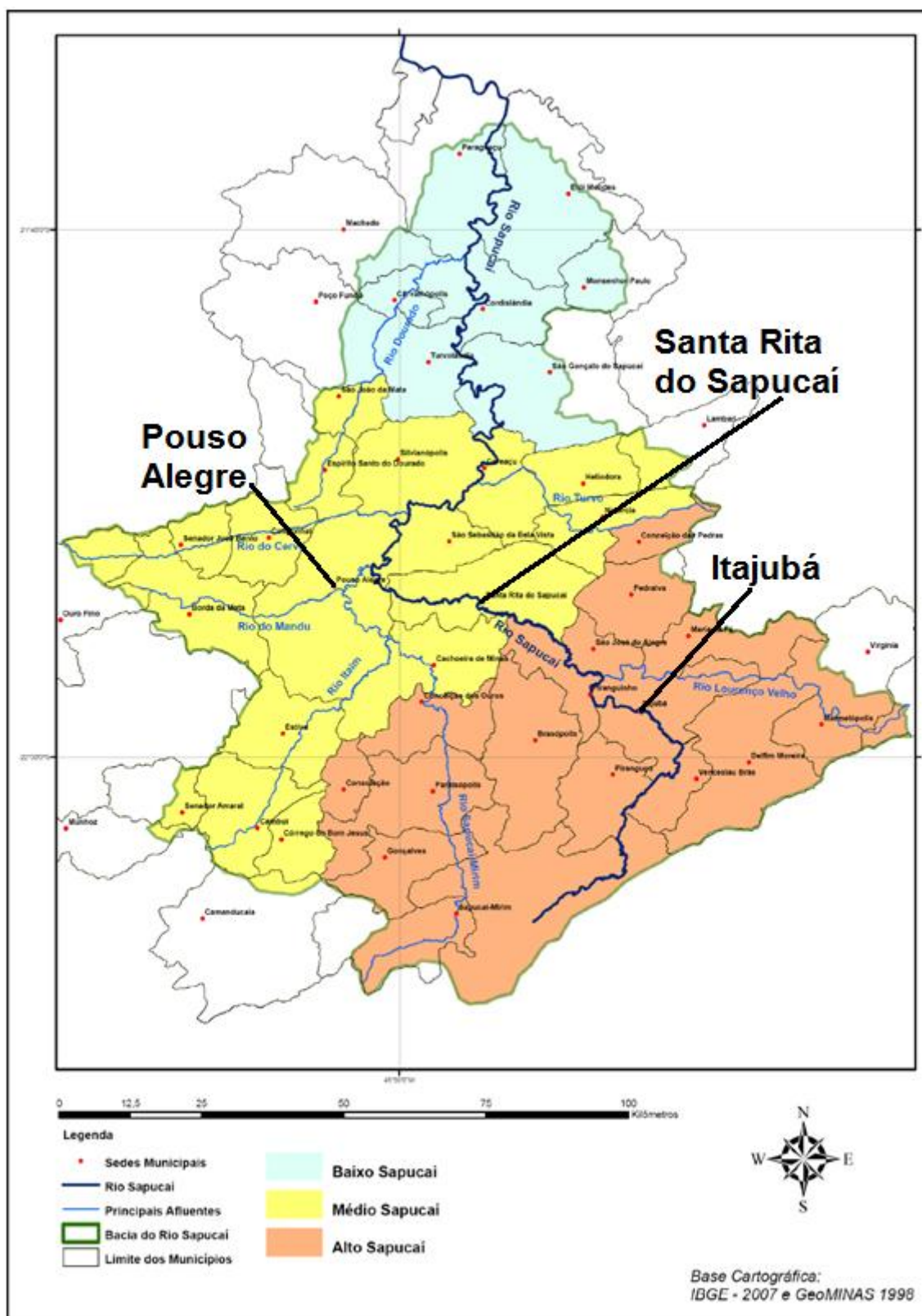


Figura 6 -Bacia do Alto, Médio e Baixo Sapucaí. Fonte: Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, 2010 (adaptado)

Em toda a bacia hidrografia do Alto Sapucaí são observadas diferentes tipos de uso e ocupação do solo tais quais se apresentam em todo restante da bacia como florestas e matas em diferentes estágios, pastagens, agricultura e áreas urbanizadas. A exemplo do que ocorre em todo o estado de Minas Gerais, onde segundo o Censo Agropecuário do IBGE (2006) o solo é ocupado por aproximadamente 19% de lavouras, 57% de pastagens e 24%, o trecho do Alto Sapucaí é composto por lavouras residentes na maior parte em planícies e terrenos suaves, pastagens ocupando tanto terrenos com alta e baixa declividade e matas presentes em diferentes estágios de sucessão ocupando relevos de altitude e margens de rios. O relevo do trecho é caracterizado em sua maior parte por morros e cadeias montanhosas, dentre as quais, a Serra da Mantiqueira, onde nasce o Rio Sapucaí.

Em relação aos aspectos sócio-econômicos da bacia do Alto Sapucaí, pode-se constatar uma população estimada de 284.980 habitantes nos 21 municípios que compõe este trecho (IBGE, Contagem da população, 2007) com um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) máximo nas cidades de Itajubá - IDH=0,815 - e Campos do Jordão (SP) - IDH=0,82 (PNUD, Atlas do Desenvolvimento Humano do Brasil, 2003 *apud* Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, 2010).

3.1.2) O município de Itajubá

O município está localizado pelas seguintes coordenadas: Latitude Sul – 22°25'36,55" e Longitude Oeste "Greenwich"- 45°27'33,42" (Igreja Matriz de Soledade), região sul do estado de Minas Gerias (Moni, 2005), conforme a Figura 7.



Figura 7 -Localização do município de Itajubá. Fonte: Matos (2007)

Segundo Pinheiro (2005) a cidade de Itajubá, ocupada originalmente por índios Puri-Coroados, foi fundada pelo padre Lourenço da Costa na manhã de 19 de Março de 1819 com a celebração da primeira missa no local onde atualmente se encontra a Igreja Matriz de Nossa Senhora da Soledade. Segundo dados de 2007 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, o município possui uma população de 90.658 habitantes e sua economia é baseada principalmente no setor de serviços e indústria e menor peso para agropecuária.

Em relação ao clima, o município se enquadra no clima Cwb, de acordo com a classificação de Köppen, denominado tropical de altitude com temperatura média inferior a 25°C porém com grande amplitude térmica e com pluviosidade média de 1350 mm/ano (LIH-UNIFEI).

3.1.3) O Rio Sapucaí

O Rio Sapucaí nasce a uma altitude de 1.620 metros no município de Campos do Jordão – SP onde recebe o nome de ribeirão Capivari. O rio percorre o estado de São Paulo em direção à divisa com o estado de Minas Gérias, onde recebe o nome de Rio Sapucaí a 5 km do limite interestadual. No

início do seu trecho mineiro o Rio Sapucaí delimita os municípios de Wenceslau Braz e Piranguçu, adentrando-se pela área urbana na do município de Itajubá. No seu trecho acima do município de Itajubá o Rio Sapucaí é caracterizado por corredeiras com elevada velocidade de escoamento e declividades de até 3 m/km no bairro dos Borges, a aproximadamente 25 km rio acima, zona rural do município de Piranguçu. No início da área urbana o rio apresenta menores velocidades de escoamento, menores declividades (em torno de 0,8 m/km), com , obviamente, maiores vazões. Estas características hidráulicas propiciam um cenário de inundações severas e com elevação rápida do nível do rio em eventos de grandes chuvas.

3.2) Coleta de dados hidráulicos e hidrológicos

Os dados obtidos para este estudo são provenientes de estações de coleta de dados pertencentes ao Sistema de Monitoramento de Enchentes. O sistema teve início no ano de 2002 através da assinatura de um convênio estabelecido entre a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e a Universidade Federal de Itajubá (Unifei), e vem desde então atuando na elaboração de soluções para a problemática das inundações em diversos municípios do Alto e Médio Sapucaí como Itajubá, Santa Rita do Sapucaí, Pouso Alegre e outros municípios próximos ao Rio Sapucaí seus afluentes. A operação do sistema é feita pelo Laboratório de Informações Hídricas (LIH), locado atualmente no Instituto de Recursos Naturais (IRN) no campus da Unifei em Itajubá, e suas principais atividades consistem na instalação, operação e manutenção de estações de monitoramento ao longo do Rio Sapucaí e alguns de seus afluentes. Tais estações monitoram o nível de chuvas e o nível topobatimétrico do Rio Sapucaí em diversos pontos ao longo de sua bacia com registro de informações em tempo real. As informações nas estações são transmitidas por telefonia celular instantaneamente para um computador central, nela são obtidas graficamente a variação do nível do Rio Sapucaí e o volume de chuva em determinada estação, além de permitir ajustes no intervalo de registro de dados para melhor acompanhamento do Rio Sapucaí na ocorrência de cenários severos. Atualmente existem dezoito estações de

monitoramento em operação na bacia e suas informações foram disponibilizadas, a partir do ano de 2011, no domínio www.enchentes.unifei.edu.br. Este portal foi elaborado com o objetivo de compartilhar as informações precipitação e cota altimétrica dos principais cursos d'água críticos da região. A Figura 8, página inicial do domínio, mostra o mapa com todas as dezoito estações de monitoramento contempladas no sistema.

Figura 8 -Página inicial do Sistema de Monitoramento de Enchentes. Fonte: www.enchentes.unifei.edu.br

Para cada estação de monitoramento é possível verificar informações em tempo real de cota altimétrica do cursos d'água e precipitação, plotadas em um gráfico com registros em intervalos de uma hora, para o dia atual e o dia anterior à consulta. São apresentadas ainda coordenadas geográficas (UTM), município, curso d'água monitorado, topobatimetria do curso d'água e fotos da estação de monitoramento, conforme apresentado na Figura 9:

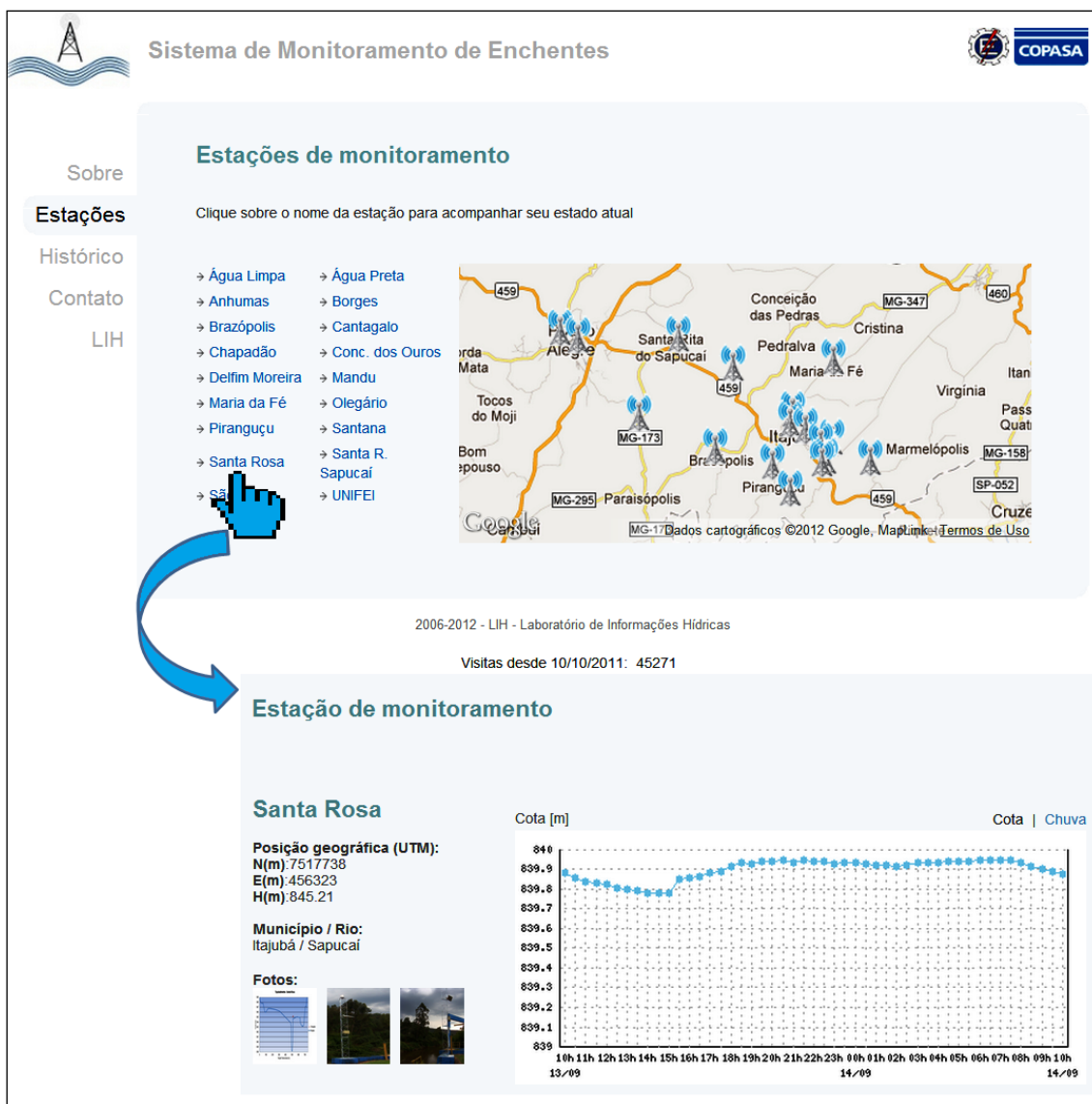


Figura 9 - Funcionalidades do domínio do Sistema de Monitoramento de Enchentes. Fonte: www.enchentes.unifei.edu.br

Dentre as dezoito estações existentes, seis estão alocadas à montante do município de Itajubá, são elas: Estação Santa Rosa, Estação Santa Galo, Estação Água Limpa, Estação Santana, Estação Delfim Moreira e Estação Borges. Todas essas estações apresentam dados de precipitação e cota altimétrica desde janeiro de 2009 até dados atuais. A Estação Santa Rosa será monitorada quanto à cota altimétrica do Rio Sapucaí, uma vez que esta estação se localiza no início da área urbana do município. Portanto, os dados obtidos desta estação serão considerados como variável dependente, uma vez que avalia-se o efeito de chuvas à montante do seu ponto de medição no nível do Rio Sapucaí. As demais cinco estações serão utilizadas para conhecimento

da precipitação ocorrida na bacia e portanto serão consideradas como variáveis independentes no modelo. A série temporal disponível para estas estações compreende o período de janeiro de 2009 a fevereiro de 2012, com leituras entre intervalos variando de cinco minutos a quatro horas em função da necessidade ou não de leituras menos espaçadas em eventos de elevação do nível do Rio Sapucaí. Em alguns instantes as leituras são interrompidas por intervalos maiores devido à manutenção das estações, testes, falhas de leitura do sensor e/ou panes dos mesmos.

3.3) Cálculo da precipitação média – Polígonos de Thiessen

Para o cálculo da precipitação média na bacia, utilizou-se o Método de Thiessen. A escolha deste método em detrimento de outros métodos consistentes como o Método das Isoietas se baseia no fato de que o cálculo da precipitação média na bacia pode ser atualizado instantaneamente através de planilhas que realizam as ponderações do método à medida que estas recebam novos dados de precipitação. Sendo assim, é possível obter uma precipitação média para cada instante de registro de dados.

Inicialmente coletou-se os dados de precipitação medidos na Estação Canta Galo, Estação Água Limpa, Estação Santana, Estação Delfim Moreira e Estação Borges no período de janeiro de 2009 a janeiro de 2012. Fez-se então uma minuciosa análise dos dados observando possíveis valores discrepantes, instantes de ausência de leituras ou possíveis erros de medição. Como as leituras de cada estação acontecem em intervalos não necessariamente iguais, uma vez que o intervalo de medição é escolhido remotamente para cada estação, cuidou-se sincronizar os dados coletados nos mesmos instantes de medição para a correta aplicação da correlação entre as séries de dados de precipitações médias e cotas, fato este que demandou o maior esforço computacional e de análise de todo o estudo. O processo de sincronização dos dados é dividido em quatro etapas e para melhor entendimento é apresentado abaixo através de um exemplo no qual foram sincronizados os dados das estações Borges, Delfim Moreira e Santana.

1ª Etapa – Obtenção dos dados brutos:

Nesta etapa são obtidos os dados fornecidos pelas estações escolhidas e estes são agrupados em uma planilha conforme exibido a seguir na Figura 10. No estudo foram obtidos dados de cota altimétrica do Rio Sapucaí para a Estação Santa Rosa e dados de precipitação para as demais estações. No exemplo abaixo são consideradas as estações Borges, Delfim Moreira e Santana; entretanto, o procedimento é o mesmo para todas as 5 estações utilizadas no estudo.

Estação Santa Rosa		Estação Borges		Estação Delfim Moreira		Estação Santana	
Tempo	Cota (m)	Tempo	Chuva (mm)	Tempo	Chuva (mm)	Tempo	Chuva (mm)
26/01/200901:00	841,52	26/01/200901:00	9,587	26/01/200901:00	7,660	26/01/200901:00	6,587
26/01/200902:00	841,53	26/01/200903:00	7,778	26/01/200903:00	6,780	26/01/200902:00	6,340
26/01/200903:00	841,62	26/01/200904:00	6,001	26/01/200905:00	4,230	26/01/200903:00	5,890
26/01/200904:00	841,66	26/01/200905:00	5,320	26/01/200907:00	1,980	26/01/200904:00	4,770
26/01/200905:00	841,71	26/01/200906:00	4,550	26/01/200909:00	0,210	26/01/200905:00	3,880
26/01/200906:00	841,76	26/01/200909:00	0,140	26/01/200911:00	0,180	26/01/200906:00	3,530
26/01/200907:00	841,81	26/01/200910:00	0,000	26/01/200913:00	0,111	26/01/200907:00	1,990
26/01/200908:00	842,86	26/01/200911:00	0,440	26/01/200915:00	0,300	26/01/200908:00	0,990
26/01/200909:00	843,90	26/01/200912:00	0,590	26/01/200917:00	0,000	26/01/200909:00	0,000
26/01/200910:00	844,30	26/01/200914:00	0,340			26/01/200912:00	0,000
26/01/200911:00	845,70	26/01/200916:00	0,120			26/01/200913:00	0,134
26/01/200912:00	844,00	26/01/200917:00	0,000			26/01/200914:00	0,900
26/01/200913:00	843,40					26/01/200915:00	0,180
26/01/200914:00	843,00					26/01/200916:00	0,000
26/01/200915:00	842,30					26/01/200917:00	0,000
26/01/200916:00	841,90						
26/01/200917:00	841,70						

Figura 10 - Exemplo de dados brutos de cota altimétrica e precipitação para algumas estações de monitoramento

Observando os dados acima, observa-se que ocorrem diferentes intervalos de medição de dados para cada estação. Neste caso, a estação Santa Rosa fornece dados com intervalos fixos de uma hora, já a estação Borges apresenta dados em intervalos de uma hora (com pausas de medição em alguns momentos), a estação Delfim Moreira fornece dados com intervalos fixos de duas horas e a estação Santana apresenta dados com intervalos de uma hora com pausas de medição em alguns instantes. A variação desses intervalos ocorre em função da decisão do operador do sistema que pode, remotamente, julgar desnecessário o registro de dados no mesmo intervalo em

todas as estações, uma vez que uma ou outra pode não estar registrando níveis de chuva ou cota significativos, ou seja, o operador pode determinar um menor intervalo de medição em uma estação que esteja apresentando valores críticos e seja necessário um acompanhamento mais detalhado e pode também determinar um intervalo maior de medição para outra estação que não apresente dados hidrológicos críticos. A escolha de um intervalo maior ou menor de medição obedece primeiramente um critério de necessidade de acompanhamento do cenário hidrológico, assegurada a não necessidade de este acompanhamento ser instantâneo, pode-se poupar custos financeiros com o registro de dados nas estações, haja vista que o registro é feito por telemetria e representa um importante custo da operação do sistema.

2ª Etapa – Sincronização dos dados:

Após a obtenção dos dados brutos oferecidos pelo sistema, é realizada uma varredura de toda a massa de dados obtida para todo o processo de modelagem. Esta varredura objetiva identificar diferenças de intervalos entre as leituras das estações e sincronizar os instantes de registro para todas elas. Sendo assim, conforme exemplificado na Figura 11, identificou-se as variações nos intervalos de medição e inseriu-se um espaço vazio que não tem como objetivo aferir um valor nulo na medição naquele instante, mas sim sincronizar a leitura dos dados e possibilitar a identificação de correlação entre os dados.

Estação Santa Rosa		Estação Borges		Estação Delfim Moreira		Estação Santana	
Tempo	Cota (m)	Tempo	Chuva (mm)	Tempo	Chuva (mm)	Tempo	Chuva (mm)
26/01/200901:00	841,52	26/01/200901:00	9,587	26/01/200901:00	7,660	26/01/200901:00	6,587
26/01/200902:00	841,53					26/01/200902:00	6,340
26/01/200903:00	841,62	26/01/200903:00	7,778	26/01/200903:00	6,780	26/01/200903:00	5,890
26/01/200904:00	841,66	26/01/200904:00	6,001			26/01/200904:00	4,770
26/01/200905:00	841,71	26/01/200905:00	5,320	26/01/200905:00	4,230	26/01/200905:00	3,880
26/01/200906:00	841,76	26/01/200906:00	4,550			26/01/200906:00	3,530
26/01/200907:00	841,81			26/01/200907:00	1,980	26/01/200907:00	1,990
26/01/200908:00	842,86					26/01/200908:00	0,990
26/01/200909:00	843,90	26/01/200909:00	0,140	26/01/200909:00	0,210	26/01/200909:00	0,000
26/01/200910:00	844,30	26/01/200910:00	0,000				
26/01/200911:00	845,70	26/01/200911:00	0,440	26/01/200911:00	0,180		
26/01/200912:00	844,00	26/01/200912:00	0,590			26/01/200912:00	0,000
26/01/200913:00	843,40			26/01/200913:00	0,111	26/01/200913:00	0,134
26/01/200914:00	843,00	26/01/200914:00	0,340			26/01/200914:00	0,900
26/01/200915:00	842,30			26/01/200915:00	0,300	26/01/200915:00	0,180
26/01/200916:00	841,90	26/01/200916:00	0,120			26/01/200916:00	0,000
26/01/200917:00	841,70	26/01/200917:00	0,000	26/01/200917:00	0,000	26/01/200917:00	0,000

Figura 11 - Dados sincronizados de cota altimétrica e precipitação para algumas estações de monitoramento

3ª Etapa – Exclusão de dados incompletos:

Tendo sido os dados organizados corretamente, passou-se para o próximo passo de exclusão dos registros de todos os dados de determinado instante no qual haja ausência de alguma leitura em alguma estação. Este procedimento se faz necessário uma vez que não é possível correlacionar um valor obtido em uma estação com um valor inexistente em outra estação. A Figura 12 exemplifica a continuação do processo de tratamento dos dados com a exclusão de dados incompletos da planilha.

Estação Santa Rosa		Estação Borges		Estação Delfim Moreira		Estação Santana	
Tempo	Cota (m)	Tempo	Chuva (mm)	Tempo	Chuva (mm)	Tempo	Chuva (mm)
26/01/200901:00	841,52	26/01/200901:00	9,587	26/01/200901:00	7,660	26/01/200901:00	6,587
26/01/200902:00	841,53					26/01/200902:00	6,340
26/01/200902:00	841,53	26/01/200902:00	7,778	26/01/200902:00	6,78	26/01/200902:00	6,340
26/01/200904:00	841,66	26/01/200904:00	6,001			26/01/200904:00	4,770
26/01/200905:00	841,71	26/01/200905:00	5,320	26/01/200905:00	4,230	26/01/200905:00	3,880
26/01/200906:00	841,76	26/01/200906:00	4,550			26/01/200906:00	3,530
26/01/200907:00	841,81			26/01/200907:00	1,380	26/01/200907:00	1,330
26/01/200908:00	842,86					26/01/200908:00	0,330
26/01/200909:00	843,90	26/01/200909:00	0,140	26/01/200909:00	0,210	26/01/200909:00	0,000
26/01/200910:00	844,30	26/01/200910:00	0,000				
26/01/200911:00	845,70	26/01/200911:00	0,440	26/01/200911:00	0,180		
26/01/200912:00	844,00	26/01/200912:00	0,530			26/01/200912:00	0,000
26/01/200913:00	843,40			26/01/200913:00	0,111	26/01/200913:00	0,134
26/01/200914:00	843,00	26/01/200914:00	0,340			26/01/200914:00	0,300
26/01/200915:00	842,30			26/01/200915:00	0,300	26/01/200915:00	0,180
26/01/200916:00	841,30	26/01/200916:00	0,120			26/01/200916:00	0,000
26/01/200917:00	841,70	26/01/200917:00	0,000	26/01/200917:00	0,000	26/01/200917:00	0,000

Figura 12 - Exclusão de linhas nas quais existam dados incompletos

Este procedimento provoca inevitavelmente a perda de informações que foram corretamente registradas, como pode-se observar no exemplo acima. Esta perda de informações acarreta em perda de eficiência da modelagem estatística do estudo, ou seja, a menor quantidade de dados disponíveis pode diminuir a relevância da correlação e da equação de regressão obtida. Entretanto, a utilização incorreta destas informações sem a exclusão destes dados incompletos, acarretaria um viés significativo no índice de correlação e na equação de regressão, podendo carregar cada vez mais erros ao modelo. Portanto, a despeito do prejuízo causado pela perda de dados, optou-se por utilizá-los com os menores erros evitáveis possíveis.

Após o tratamento e sincronização dos dados, obtêm-se uma planilha final com os dados de cota e precipitação dispostos corretamente a fim de realizar-se posteriormente o cálculo da precipitação média na bacia e correlação entre as variáveis cota e precipitação. A Figura 13 exemplifica a obtenção dos dados tratados.

Estação Santa Rosa		Estação Borges		Estação Delfim Moreira		Estação Santana	
Tempo	Cota (m)	Tempo	Chuva (mm)	Tempo	Chuva (mm)	Tempo	Chuva (mm)
26/01/200901:00	841,52	26/01/200901:00	9,587	26/01/200901:00	7,660	26/01/200901:00	6,587
26/01/200903:00	841,62	26/01/200903:00	7,778	26/01/200903:00	6,780	26/01/200903:00	5,890
26/01/200905:00	841,71	26/01/200905:00	5,320	26/01/200905:00	4,230	26/01/200905:00	3,880
26/01/200909:00	843,90	26/01/200909:00	0,140	26/01/200909:00	0,210	26/01/200909:00	0,000
26/01/200917:00	841,70	26/01/200917:00	0,000	26/01/200917:00	0,000	26/01/200917:00	0,000

Figura 13 - Dados finais de cota e precipitação após sincronização e tratamento dos dados brutos

Tendo então a série temporal de dados de precipitação de cada estação e cota altimétrica do Rio Sapucaí na estação Santa Rosa no intervalo de tempo adequado, passou-se para a etapa de cálculo da precipitação média na bacia através da delimitação dos polígonos utilizados no método de Thiessen, com auxílio do software AutoCad, versão 2009. Para tanto, traçou-se polígonos correspondentes à cada estação, onde as fronteiras são formadas pelas mediatrizes das linhas que unem dois postos adjacentes. Tendo-se os polígonos traçados, calculou-se a área de cada um no software AutoCad, versão 2009. Fez-se então a média das precipitações de cada estação somando-se o produto entre o valor de precipitação e a área do polígono da estação, dividindo-se o resultado pela área total dos polígonos. Portanto, tem-se uma nova série temporal com dados de precipitação média na bacia, conforme exemplificado na Figura 14.

Estação Santa Rosa		Estação Borges		Estação Delfim Moreira		Estação Santana		Thiessen
Tempo	Cota (m)	Tempo	Chuva (mm)	Tempo	Chuva (mm)	Tempo	Chuva (mm)	Chuva (mm)
26/01/200901:00	841,52	26/01/200901:00	9,587	26/01/200901:00	7,660	26/01/200901:00	6,587	8,739
26/01/200903:00	841,62	26/01/200903:00	7,778	26/01/200903:00	6,780	26/01/200903:00	5,890	7,302
26/01/200905:00	841,71	26/01/200905:00	5,320	26/01/200905:00	4,230	26/01/200905:00	3,880	4,868
26/01/200909:00	843,90	26/01/200909:00	0,140	26/01/200909:00	0,210	26/01/200909:00	0,000	0,143
26/01/200917:00	841,70	26/01/200917:00	0,000	26/01/200917:00	0,000	26/01/200917:00	0,000	0,000

Figura 14 - Cálculo da precipitação média na bacia através do método do Thiessen

3.4) Identificação de Picos de precipitação e cota-resposta no Rio Sapucaí e cálculo da precipitação acumulada

Para a aferição da cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa é necessário o levantamento dos Picos de precipitação registrados nas Estações ao longo da série temporal disponível e sua respectiva resposta no nível d'água no Rio Sapucaí. De posse dos dados de precipitação média em toda bacia por meio do método de Thiessen, foram construídos gráficos relacionando as variáveis: cota altimétrica do Rio Sapucaí e precipitação média na bacia calculada por Thiessen, com variação no tempo. Sendo assim foi possível identificar em quais intervalos de tempo existiram chuvas intensas e elevação considerável no nível do Rio Sapucaí. Para uma melhor organização da extensa série temporal, o conjunto de dados foi dividido nos seguintes períodos:

- Período 2009: Janeiro, Fevereiro e Março de 2009;
- Período 2009/2010: Dezembro de 2009, Janeiro, Fevereiro e Março de 2010;
- Período 2010/2011: Dezembro de 2010, Janeiro, Fevereiro e Março de 2011;
- Período 2011/2012: Dezembro de 2011, Janeiro e meados de Fevereiro de 2012.

Identificados os Picos de precipitação que causaram aumento significativo no nível do Rio Sapucaí e o intervalo de tempo entre o início da precipitação e o nível máximo atingido pelo Rio, calculou-se então a precipitação acumulada para cada instante de leitura neste período de Pico, condição necessária para encontrar-se a correlação entre as duas séries de dados. A Figura 15 exemplifica a operação do cálculo.

Estação Santa Rosa		Estação Borges	Estação Delfim Moreira	Estação Santana	Thiessen	Thiessen Acumulado
Tempo	Cota (m)	Chuva (mm)	Chuva (mm)	Chuva (mm)	Chuva (mm)	Chuva (mm)
26/01/200901:00	841,52	9,587	7,660	6,587	8,739	8,739
26/01/200903:00	841,62	7,778	6,780	5,890	7,302	8,739 + 7,302 = 16,041
26/01/200905:00	841,71	5,320	4,230	3,880	4,868	16,041 + 7,302 = 20,909
26/01/200909:00	843,90	0,140	0,210	0,000	0,143	20,909 + 4,868 = 21,052
26/01/200917:00	841,70	0,000	0,000	0,000	0,000	21,052 + 0,000 = 21,052

Figura 15 - Cálculo da precipitação média acumulada

3.5) Análise estatística - correlação linear e equação de regressão linear

Tendo-se identificado os diversos Picos de cota altimétrica do Rio Sapucaí e precipitação acumulada nestes períodos críticos, tem-se enfim um par de variáveis x e y que apresentam correlação linear, para cada Pico analisado, sendo “precipitação” a variável independente “ y ” e “cota” a variável dependente “ x ”.

Vale ressaltar que, para cada valor de precipitação média cuidou-se observar na série temporal um valor de cota altimétrica correspondente, podendo assim estabelecer-se uma covariância padronizada entre as duas séries de dados. Sendo assim, o grau de associação linear entre as duas variáveis “precipitação” e “cota altimétrica” foi calculado através das equações explicitadas no Capítulo 2 e pelo software Microsoft Excel, que possui uma função que realiza o cálculo utilizando as mesmas equações. A fim de obter-se uma análise estatística significativa, foram determinados além do coeficiente de correlação, os seguintes parâmetros estatísticos: teste de hipótese para correlação, coeficientes b_1 e b_0 da reta de regressão (equação de modelagem), variação total, variação explicada e variação não explicada, coeficiente de determinação, erro padrão da estimativa, intervalo de previsão individual/margem de erro médio, gráfico de dispersão e gráfico comparativo entre a cota altimétrica real na estação Santa Rosa e a cota altimétrica neste mesmo ponto modelada pela equação de regressão calculada.

4) Análise dos Resultados

4.1) Compilação dos dados de precipitação e cota altimétrica do Rio Sapucaí

Conforme proposto, inicialmente procedeu-se com a compilação dos dados de precipitação nas Estações Canta Galo, Água Limpa, Borges, Delfim Moreira e Santana, e dados de cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa, para o período entre janeiro de 2009 a fevereiro de 2012. Para tanto, a Tabela 1 a seguir apresenta a localização de cada Estação de Monitoramento utilizada neste estudo, o rio no qual é feito o monitoramento e sua distância ao longo do leito do corpo d'água até à estação-base (Estação Santa-Rosa). As informações foram obtidas através de coleta de dados em campo, com auxílio técnico do Laboratório de Informações Hídricas (LIH).

Tabela 1 – Localização das Estações de Monitoramento à montante de Itajubá

Estação de Monitoramento	Localização	Rio monitorado	Distância (km)
Santa Rosa	459.659,1E 7.514.339,7 N	Rio Sapucaí (início da área urbana)	0 (estação-base)
Canta Galo	459.653,7 E 7.514.325,3 N	Rio Sapucaí	5,37
Água Limpa	462.147,2 E 7.515.206,2 N	Rio Santo Antônio	8,40
Santana	460.692,4 E 7.511.041,6 N	Rio de Bicas	12,08
Delfim Moreira	470.561,9 E 7.510.734,7 N	Rio Santo Antônio	20,84
Borges	452659.8 E 7503655.2 N	Rio Sapucaí	23,66

A Figura 16 apresenta a bacia do Rio Sapucaí no trecho à montante da estação base Santa Rosa localizada no início da área urbana de Itajubá e as estações fornecedoras de dados para o presente estudo:

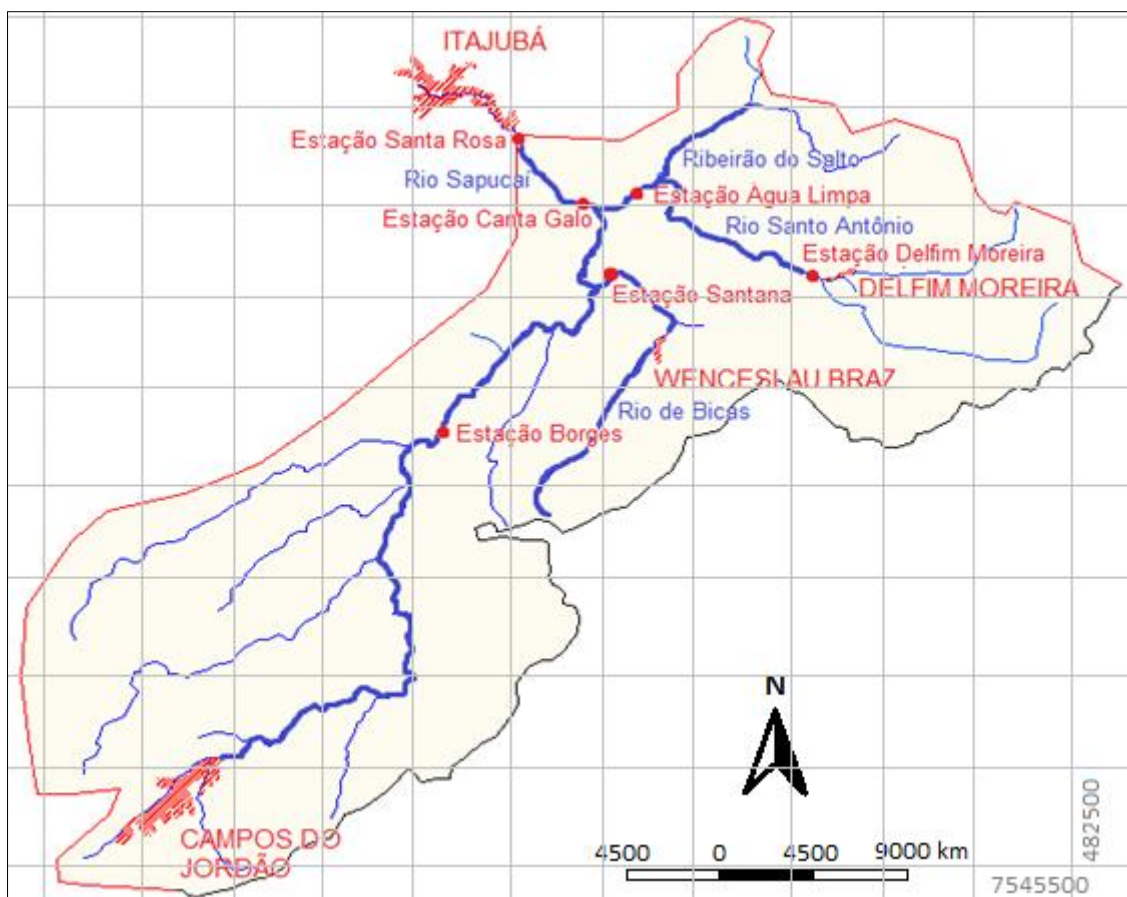


Figura 16 - Localização das estações de monitoramento utilizadas no presente estudo

A seguir são apresentadas nos gráficos 1 a 5 as informações obtidas para os períodos já citados no texto. Os gráficos foram agrupados por período para melhor visualização e plotados de forma a observar-se o efeito da precipitação no nível do Rio Sapucaí na estação Santa Rosa.

Gráfico 1 - Variação da precipitação na Estação Canta Galo e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Jan/2009 a Fev/2012.

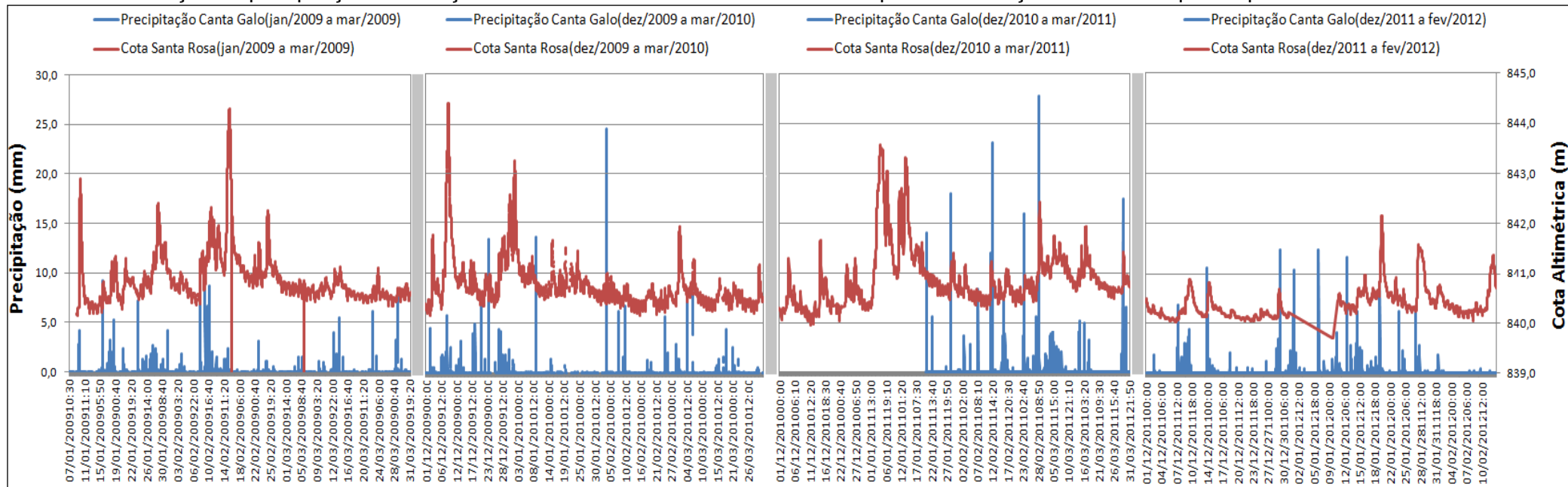


Gráfico 2 - Variação da precipitação na Água Limpa e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Jan/2009 a Fev/2012.

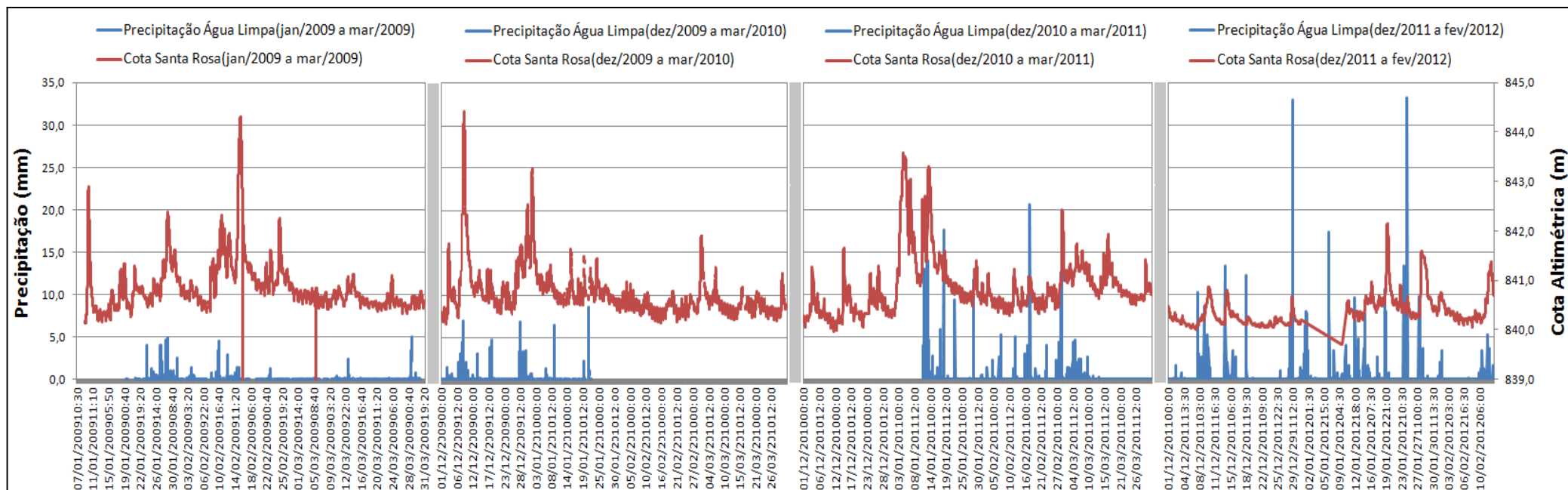


Gráfico 3 -Variação da precipitação na Estação Borges e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Jan/2009 a Fev/2012.

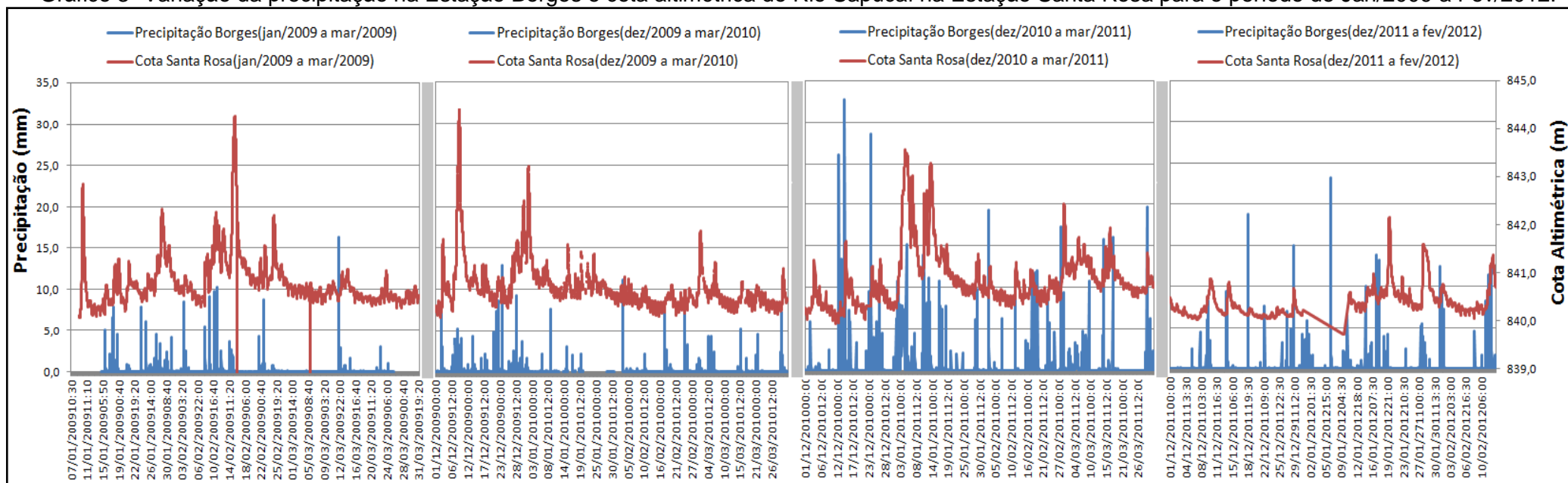


Gráfico 4 - Variação da precipitação em Delfim Moreira e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Jan/2009 a Fev/2012

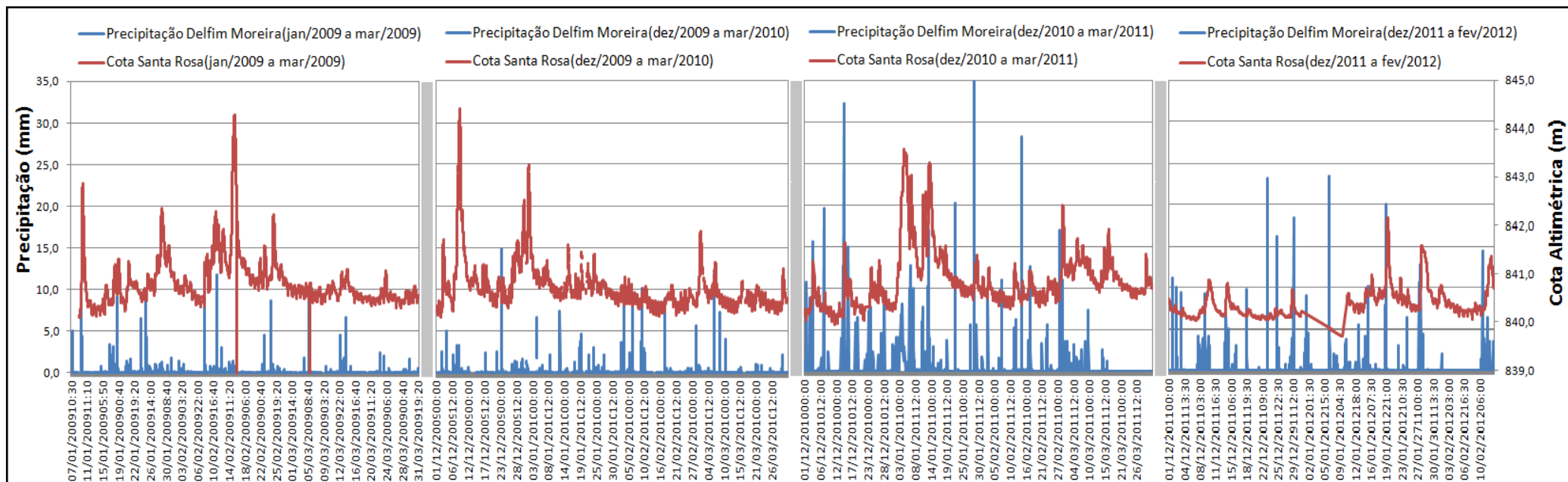
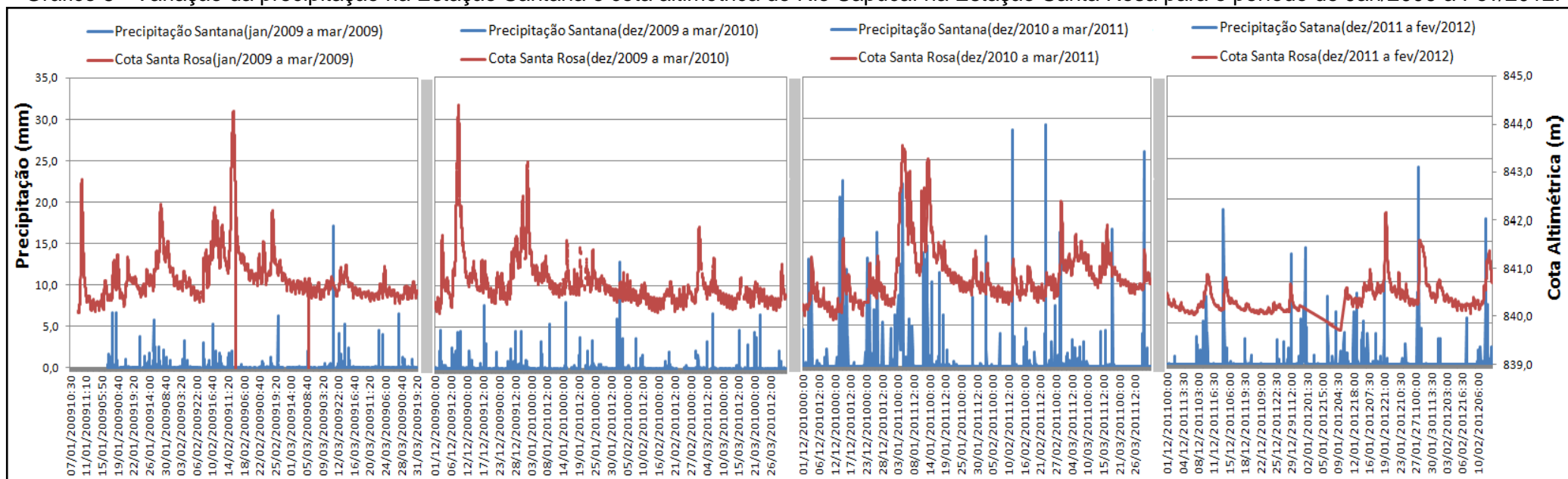


Gráfico 5 - Variação da precipitação na Estação Santana e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Jan/2009 a Fev/2012.



Os resultados obtidos revelam a considerável variabilidade nos volumes de chuva encontrados em cada estação de monitoramento, para um mesmo período de tempo. Observa-se graficamente o quão distinto pode ser o volume de chuva incidente em estações pouco distantes entre si, como é o caso das estações deste estudo. Esta constatação confirma a disposição estratégica das estações de monitoramento na área da bacia, as quais buscam reproduzir e capturar a variabilidade espacial da precipitação neste trecho da bacia do Alto Sapucaí. Devido ao fato dos dados não serem registrados em um intervalo contínuo, a variabilidade dos mesmos é ressaltada, uma vez que uma maior quantidade de informações em um menor intervalo de tempo para todas as estações tornaria a diferença de registros mais suave. Soma-se a esses aspectos o fato de que o número de estações existentes (5 estações) reproduz com limitações consideráveis o que ocorre na bacia em eventos de chuvas intensas.

A quantificação ou mensuração numérica e estatística desta variabilidade dos dados de precipitação entre as estações poderia ser realizada avaliando-se o volume de chuva de cada pluviômetro ocorrida em determinado período (dias, meses, anos hidrológicos). Entretanto, a atual configuração de operação das estações que não registra dados em intervalos constantes, torna a comparação enviesada uma vez que uma estação pode produzir mais dados de chuva do que outra.

Com base na observação gráfica, nota-se que os Picos de elevação de nível do Rio Sapucaí ocorrem tanto por chuvas intensas em toda a bacia, onde todas as estações registram níveis elevados de precipitação, como por chuvas intensas em apenas uma determinada estação, sendo o segundo cenário o mais frequente. Vê-se que o tempo de resposta entre a ocorrência das chuvas intensas e a elevação do Rio Sapucaí (formação da onda de cheia) varia na maioria dos casos entre 6 e 9 horas aproximadamente, em função de fatores como: intensidade da chuva, volume de chuva, estação onde foi registrado o maior valor de chuva e o nível do Rio Sapucaí instantes antes do início da formação da onda de cheia.

4.2) Determinação da precipitação média no trecho da bacia do Rio Sapucaí pelo método dos Polígonos de Thiessen

A Figura 17 apresenta a delimitação dos polígonos necessários para o cálculo da precipitação média no trecho de estudo da bacia do Rio Sapucaí pelo método de Thiessen. Este método pressupõe que os polígonos obtidos, diferenciados na figura por cores, possuam a mesma precipitação incidente daquela medida pela estação de monitoramento correspondente.

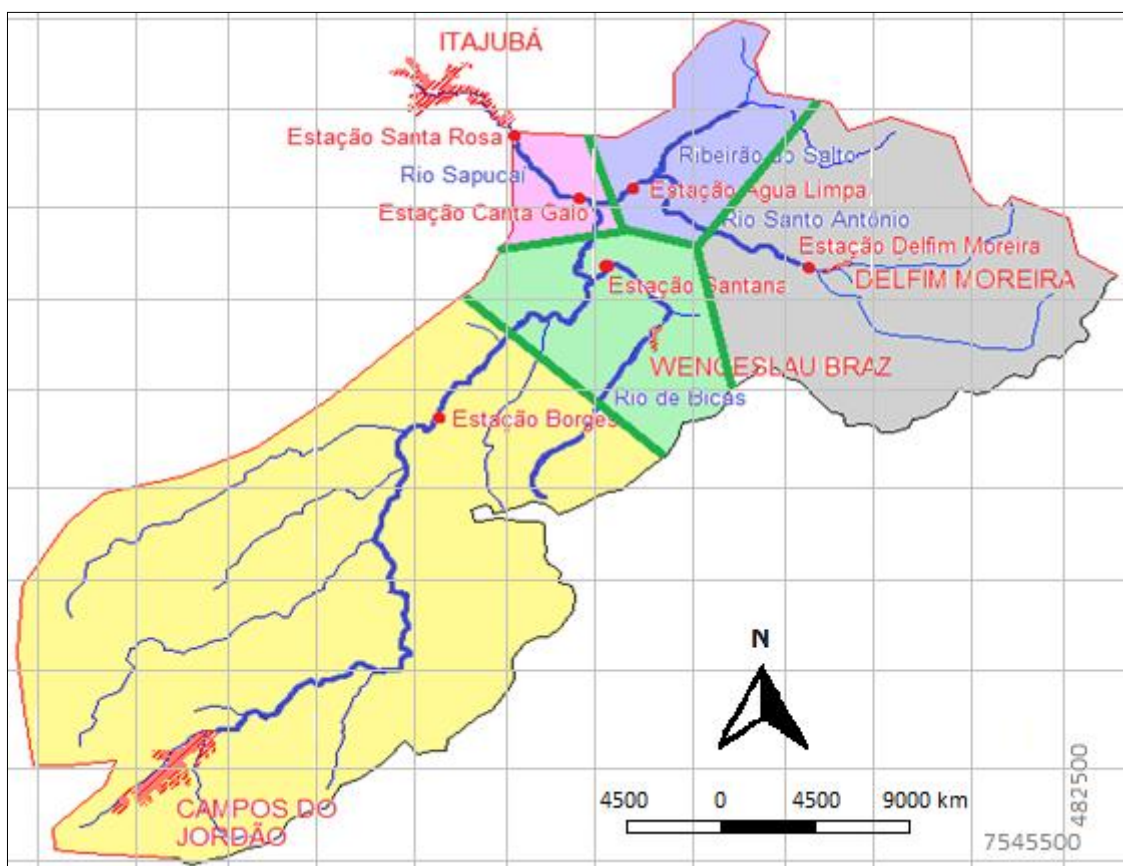


Figura 17 - Delimitação dos polígonos de Thiessen

As áreas calculadas para cada polígono obtido são apresentadas na Tabela 2 em valores aproximados:

Tabela 2 – Áreas dos polígonos de Thiessen para cada Estações de Monitoramento

Estação de Monitoramento	Área do Polígono (km²)	% da Área Total (Área Total = 845,4 km²)
Canta Galo (CG)	24,3	2,9
Água Limpa (AL)	59,5	7,0
Santana (SA)	83,8	9,9
Delfim Moreira (DM)	204,8	24,2
Borges (BO)	473,0	55,9

O cálculo da precipitação média, realizado através da ponderação dos dados obtidos com base nas áreas obtidas dos polígonos, obedece a equação (1), citada no Capítulo 2, expressa abaixo:

$$P_m \cong \frac{(24,3 \text{ CG} + 59,5 \text{ AL} + 83,8 \text{ SA} + 204,8 \text{ DM} + 473,0 \text{ BO})}{845,4}$$

As áreas obtidas para os polígonos de influência de cada estação de monitoramento apresentados anteriormente na Tabela 2, mostram que do total da área do trecho da bacia do Alto Sapucaí, mais da metade corresponde à Estação Borges, seguido pela Estação Delfim Moreira com aproximadamente 25% da área total, as demais estações contribuem com o restante do total calculado. Esta proporção existe devido ao fato de que a escolha da localização de cada estação se dá pela necessidade prioritária de monitoramento da cota altimétrica ou nível do Rio Sapucaí (para as Estações Canta Galo e Borges), Rio Santo Antônio (Estações Água Limpa e Delfim Moreira) e Rio de Bicas (Estação Santana).

São apresentados nos gráficos 6 e 7 os valores de precipitação média calculados pelo método de Thiessen ao longo dos períodos escolhidos e já citados no texto. Assim como apresentado no item 4.1, os valores de precipitação média são apresentados juntamente com o nível do Rio Sapucaí obtido na Estação Santa Rosa para observação do tempo de resposta da onda

de cheia resultante das precipitações ocorridas na bacia à montante da seção Santa Rosa.

Gráfico 6 - Variação da precipitação média (Thiessen) e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Jan/2009 a Mar/2010.

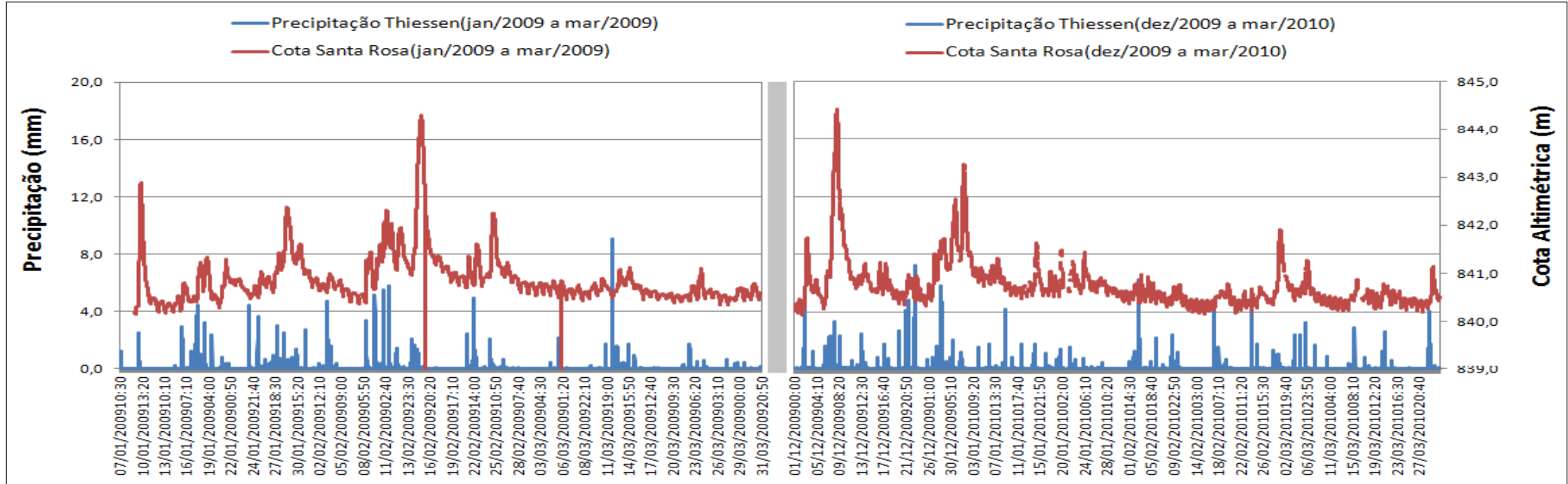
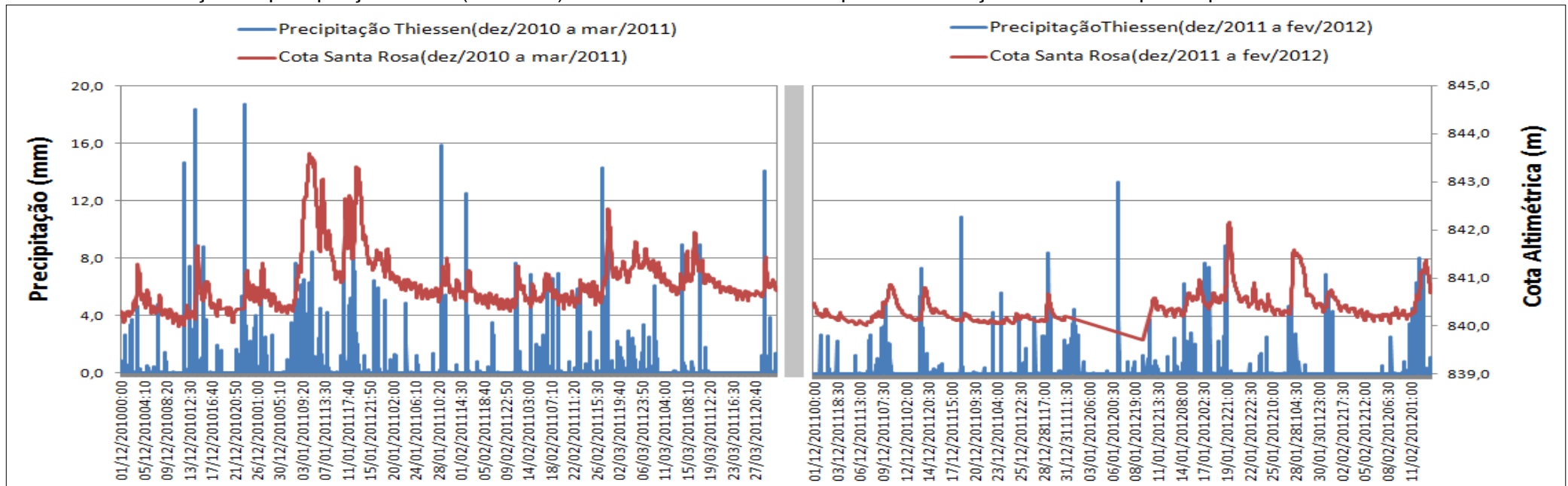


Gráfico 7 - Variação da precipitação média (Thiessen) e cota altimétrica do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o período de Dez/2010 a Fev/2012.



4.3) Localização de Picos de precipitação e sua respectiva resposta na cota do Rio Sapucaí

Conforme já citado, o conjunto de dados foi dividido em períodos. Abaixo são discriminados, por período, todos os Picos representativos encontrados na série:

- Período 2009: Janeiro, Fevereiro e Março de 2009
 - a) Pico 1: 28/01/2009 21:00hs a 29/02/2009 17:00hs;
 - b) Pico 2: 12/02/2009 10:20hs a 13/02/2009 4:00hs;
 - c) Pico 3: 14/02/2009 13:30hs a 15/02/2009 20:00hs;
 - d) Pico 4: 24/02/2009 16:30hs a 25/02/2009 5:20hs.

- Período 2009/2010: Dezembro de 2009, Janeiro, Fevereiro e Março de 2010
 - a) Pico 1: 07/12/2009 14:30hs a 08/12/2009 23:50hs;
 - b) Pico 2: 30/12/2009 4:00hs a 31/12/2009 2:50hs;
 - c) Pico 3: 01/01/2010 4:10hs a 01/01 2010 20:30hs;
 - d) Pico 4: 01/03/2010 3:30hs a 02/03/2010 1:10hs.

- Período 2010/2011: Dezembro de 2010, Janeiro, Fevereiro e Março de 2011

Para toda a série de dados deste período não foram identificados Picos com precipitação média representativa, ou seja, em todos os Picos encontrados os dados de precipitação estavam incompletos ou faltantes em determinada estação, este fato levou a um valor de precipitação média que não representa o que ocorre na bacia. Portanto, obedecendo ao critério de exclusão de dados incompletos apresentado no item 3.5 – 3ª etapa, não foram obtidos Picos significativos para este período.

- Período 2011/2012: Dezembro de 2011, Janeiro e meados de Fevereiro de 2012.
 - a) Pico 1: 19/01/2012 15:00hs a 20/01/2012 4:00hs.

A seguir, nos gráficos 8 a 20, são apresentados os Picos de precipitação média e precipitação média acumulada e suas respectivas respostas na elevação do nível do Rio Sapucaí.

• **PERÍODO 2009: JANEIRO, FEVEREIRO E MARÇO DE 2009**

Gráfico 8 - Identificação de Picos de precipitação média e respectiva resposta no nível do Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa no período de Jan/2009 a Mar/2009

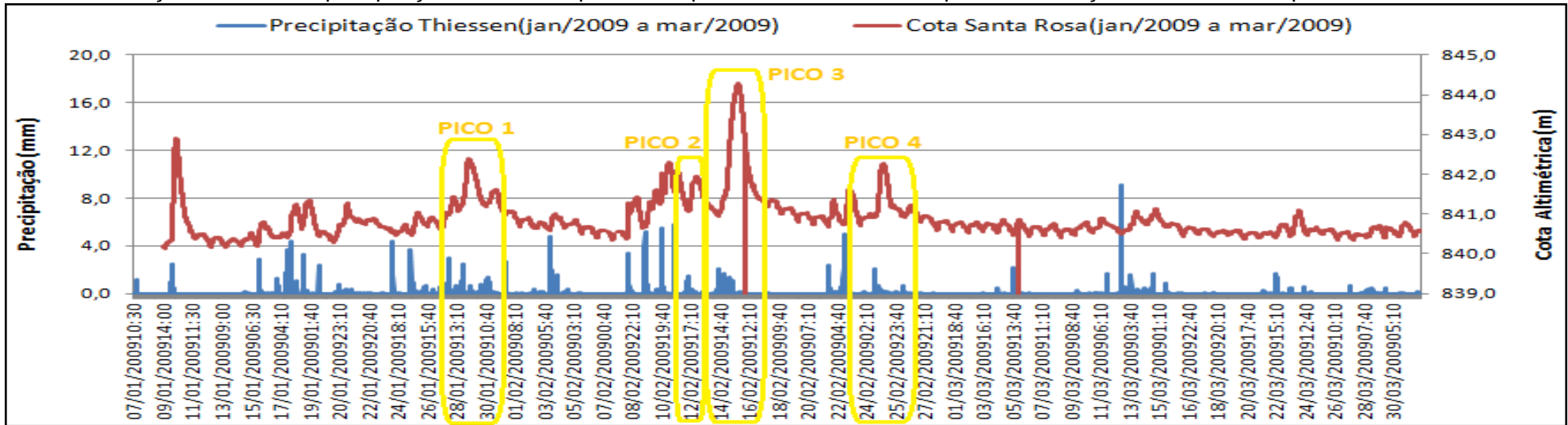


Gráfico 9 - Pico 1: 28/01/2009 21:00hs a 29/02/2009 17:00hs (período de Jan/2009 a Mar/2009)

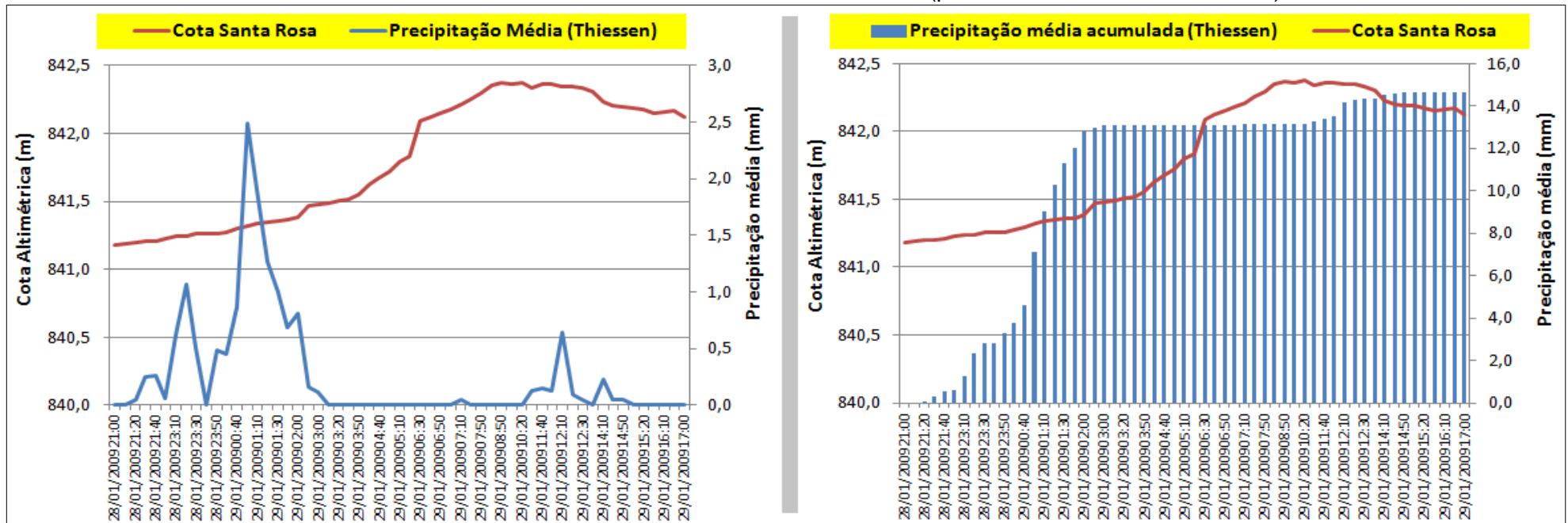


Gráfico 10 - Pico 2: 12/02/2009 10:20hs a 13/02/2009 4:00hs (período de Jan/2009 a Mar/2009)

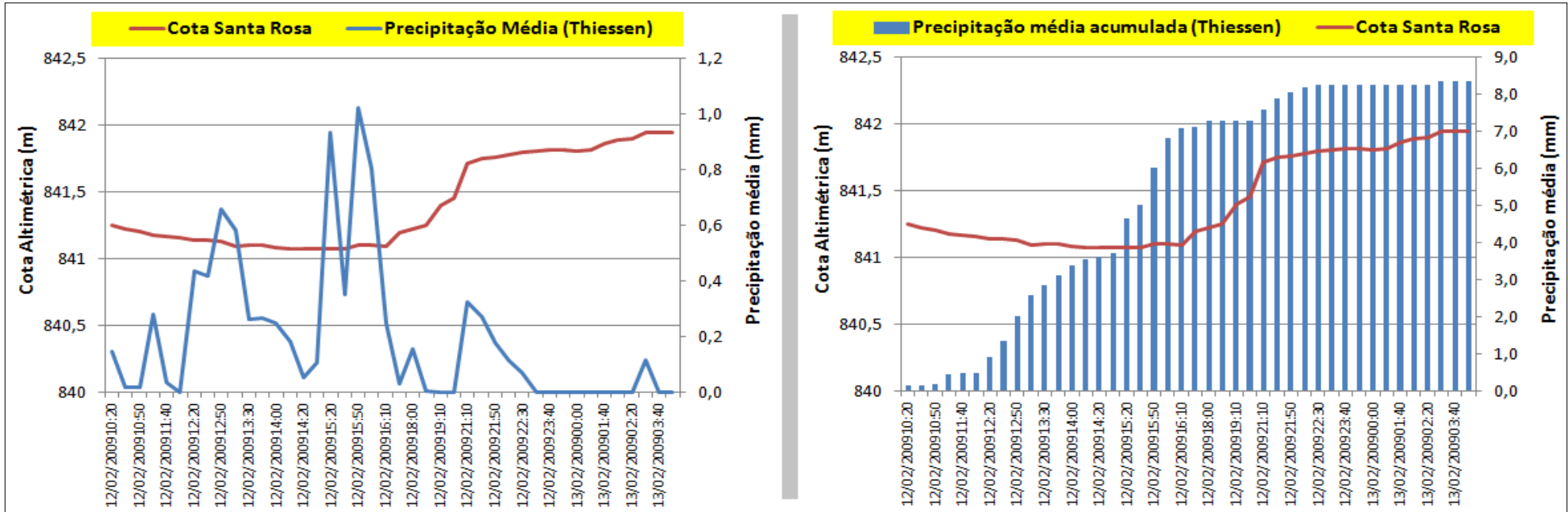


Gráfico 11 - Pico 3: 14/02/2009 13:30hs a 15/02/2009 20:00hs (período de Jan/2009 a Mar/2009)

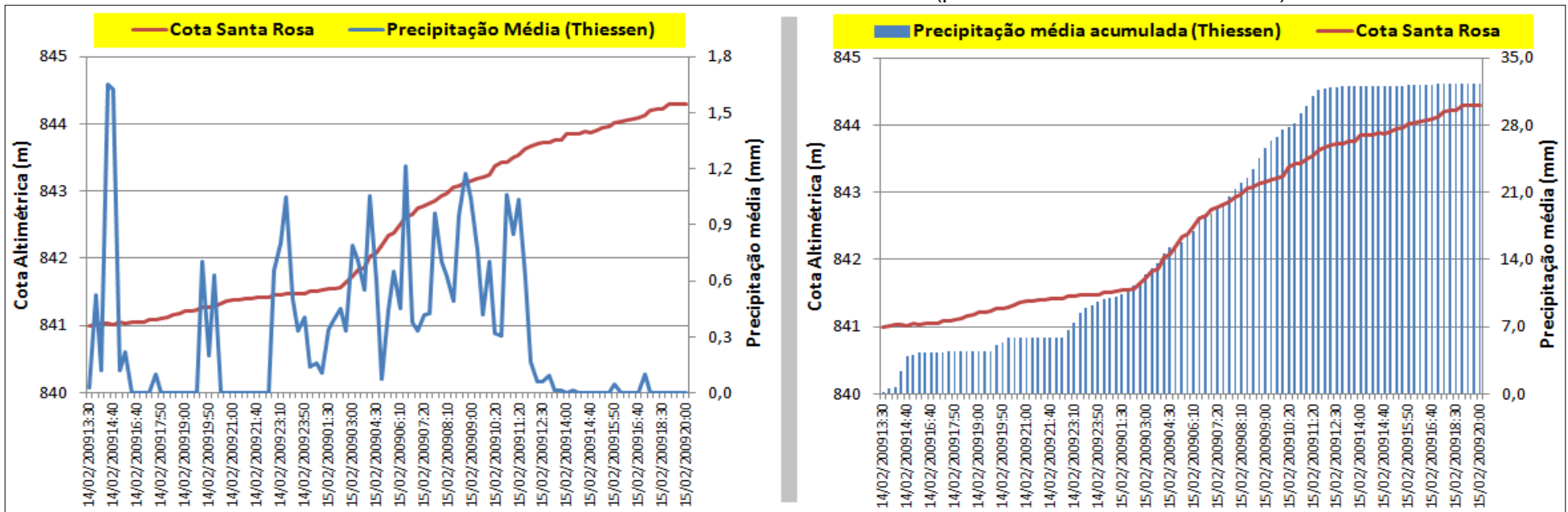
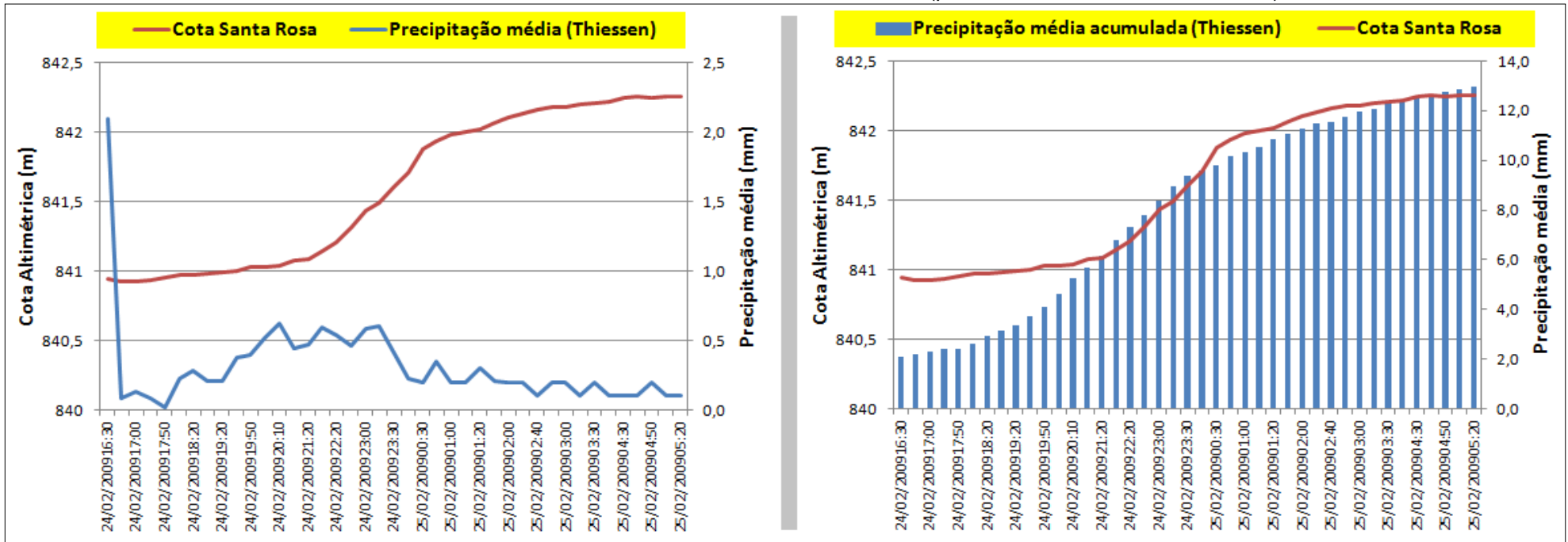


Gráfico 12 - Pico 4: 24/02/2009 16:30hs a 25/02/2009 5:20hs (período de Jan/2009 a Mar/2009)



• **PERÍODO 2009/2010: DEZEMBRO DE 2009, JANEIRO, FEVEREIRO E MARÇO DE 2010**

Gráfico 13 - Identificação de Picos de precipitação média e respectiva resposta no Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa no período de Dez/2009 a Mar/2010

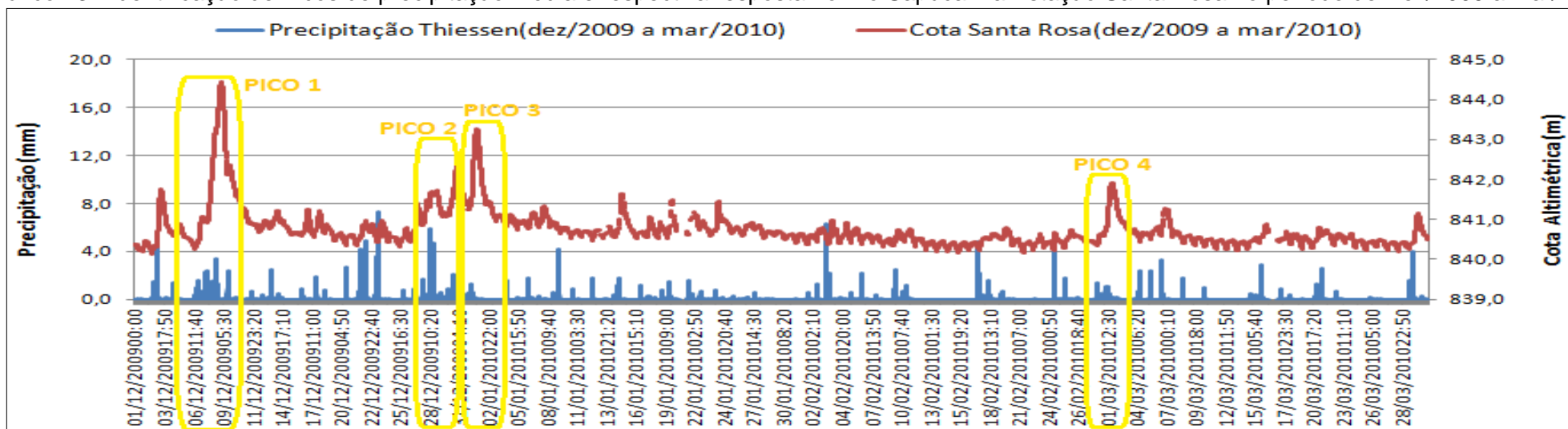


Gráfico 14 - Pico 1: 07/12/2009 14:30hs a 08/12/2009 23:50hs (período de Dez/2009 a Mar/2010)

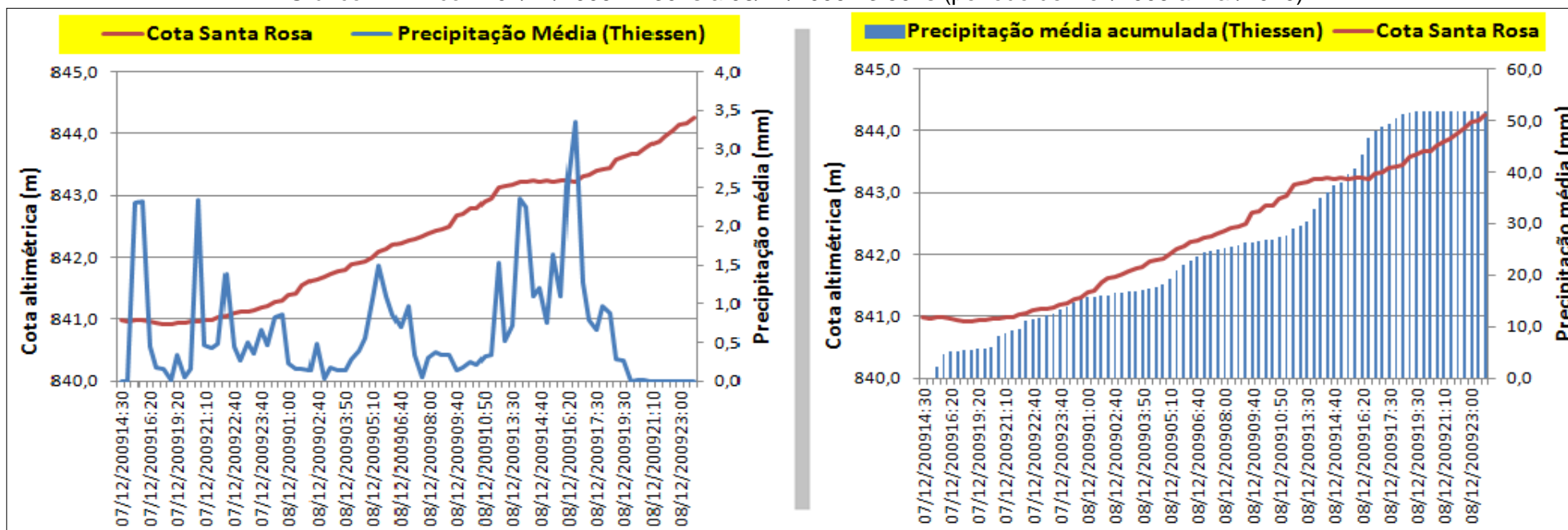


Gráfico 15 - Pico 2: 30/12/2009 4:00hs a 31/12/2009 2:50hs (período de Dez/2009 a Mar/2010)

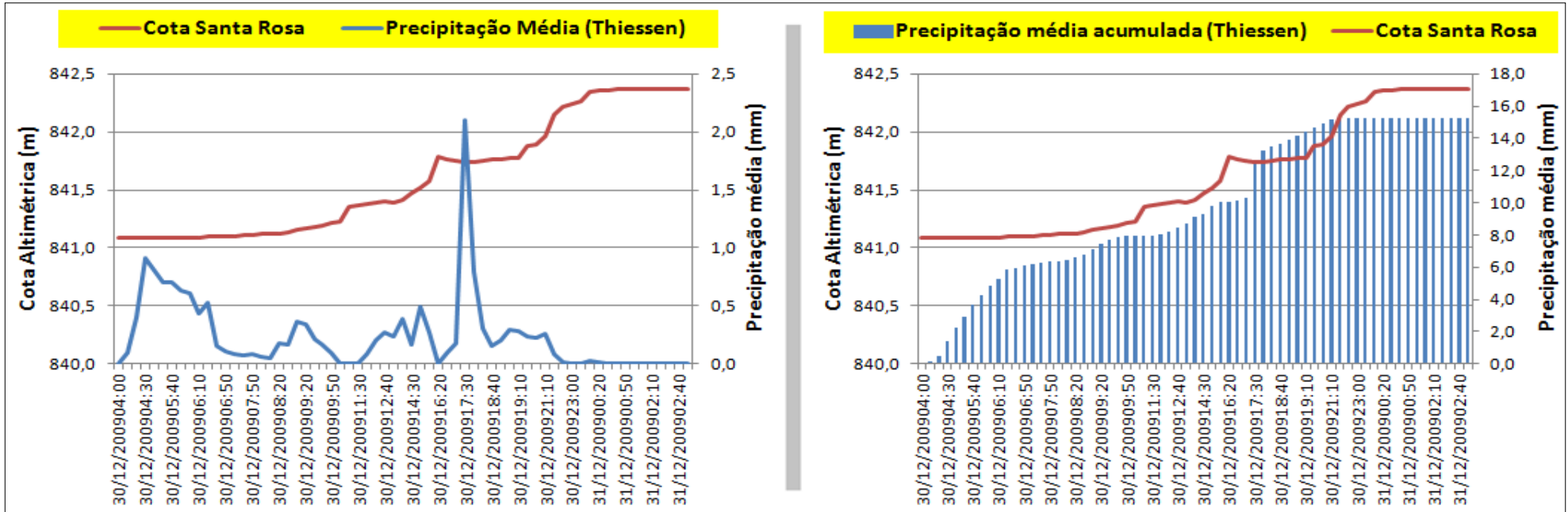


Gráfico 16 - Pico 3: 01/01/2010 4:10hs a 01/01/2010 20:30hs (período de Dez/2009 a Mar/2010)

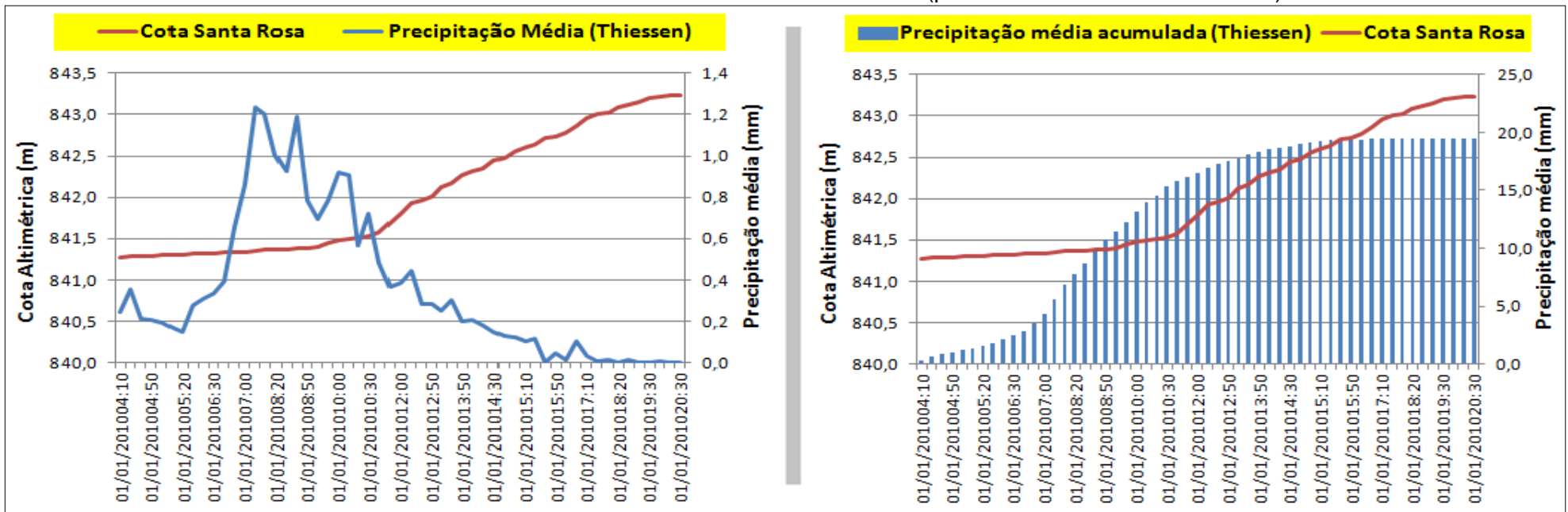
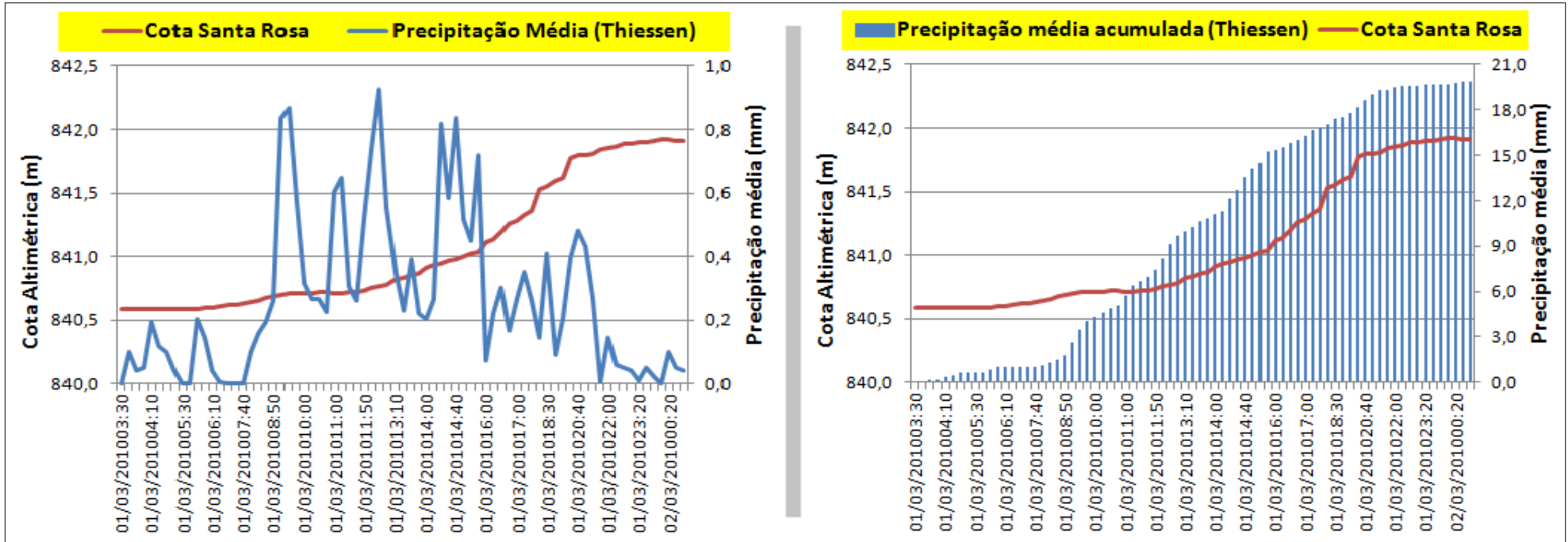


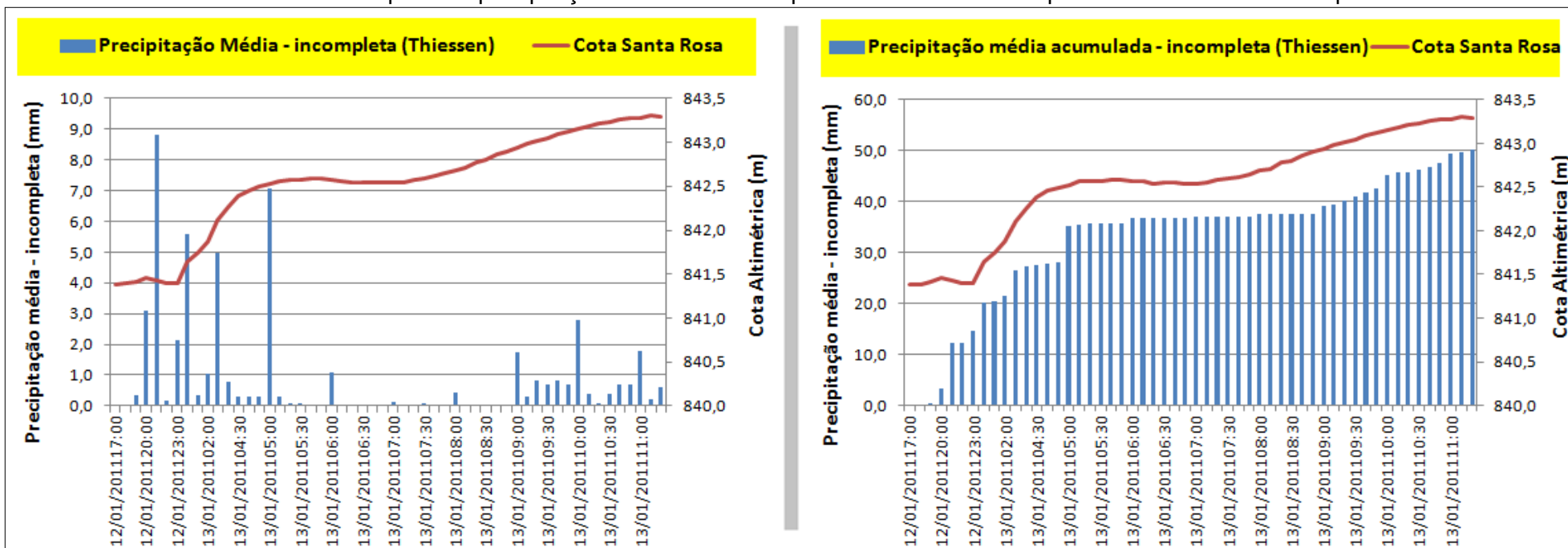
Gráfico 17 - Pico 4: 01/03/2010 3:30hs a 02/03/2010 1:10hs (período de Dez/2009 a Mar/2010)



• **PERÍODO 2010/2011: DEZEMBRO DE 2010, JANEIRO, FEVEREIRO E MARÇO DE 2011**

Conforme citado, neste período não foi possível elaborar uma série de precipitação e cota altimétrica de forma a obter Picos representativos. O Gráfico 12 foi elaborado para exemplificação dos erros e incoerências que o cálculo incompleto da precipitação média pode acarretar.

Gráfico 18 - Pico obtido com cálculo incompleto de precipitação média e falsa resposta no nível do Rio Sapucaí na Est. Santa Rosa - período Dez/2010 a Mar/2011



Observa-se no Pico exemplificado que o tempo de resposta no início da precipitação é de aproximadamente 3 horas, porém durante o decorrer do tempo este tempo de resposta apresenta redução. Vê-se a principal incoerência nos valores quando, por volta das 7:30hs do dia 13/01/2011, a cota altimétrica se eleva antes do incremento de precipitação registrado, que ocorre uma hora e meia depois.

• **PERÍODO 2011/2012: DEZEMBRO DE 2011, JANEIRO E MEADOS DE FEVEREIRO DE 2012**

Gráfico 19 - Identificação de Picos de precipitação média e respectiva resposta no nível do Rio Sapucaí na Est. Santa Rosa - período Dez/2011 a Fev/2012

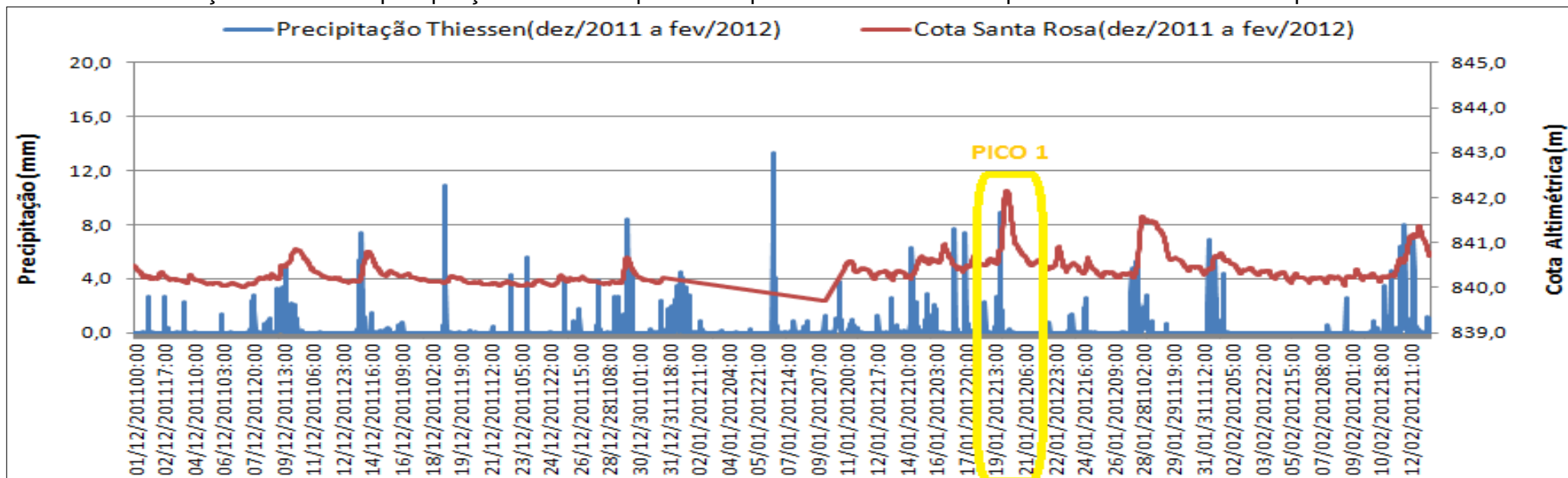
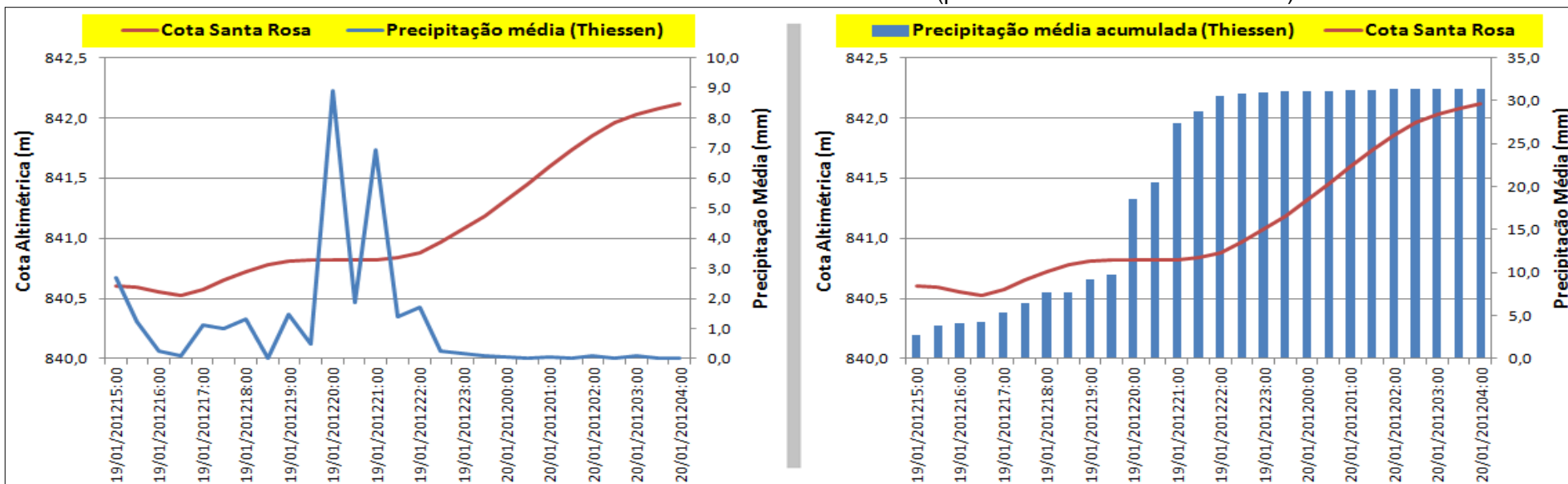


Gráfico 20 - Pico 1: 19/01/2012 15:00hs a 20/01/2012 4:00hs (período de Dez/2011 a Fev/2012)



4.4) Análise estatística da relação linear entre as variáveis precipitação e cota altimétrica

A seguir, a relação entre as variáveis “precipitação” e “cota altimétrica” é analisada estatisticamente através do coeficiente de correlação, teste de hipótese para correlação, coeficientes b_1 e b_0 da reta de regressão, variação total, variação explicada e variação não explicada, coeficiente de determinação, erro padrão da estimativa, intervalo de previsão individual/margem de erro médio, gráfico de dispersão e gráfico comparativo entre a cota altimétrica real na estação Santa Rosa e a cota altimétrica neste mesmo ponto modelada pela equação de regressão calculada. São apresentados graficamente os resultados obtidos pelo *software* Excel – coeficiente de determinação e equação de regressão; os cálculos intermediários destes coeficientes e os demais parâmetros citados são apresentados em detalhes. Vale ressaltar que os dados de cota altimétrica foram escolhidos de forma a considerar o tempo de resposta necessário para que a precipitação ocorrida tenha efeito no nível do Rio Sapucaí na estação Santa Rosa; este nível foi estabelecido graficamente.

- Período 2009: Janeiro, Fevereiro e Março de 2009

a) Pico 1: 28/01/2009 21:00hs a 29/02/2009 17:00hs;

I. Coeficiente de correlação:

De acordo com a equação (5) apresentada no item 2.2.3, têm-se:

$$n = 39;$$

$$\sum xy = 348.780,2; \sum x = 414,1; \sum y = 32.839,8;$$

$$\sum x^2 = 5484,4; \sum y^2 = 27.652.627,8.$$

Logo:

- **$r = 0,9555$**

II. Teste de hipótese:

Hipóteses:

- $H_0: \rho = 0$ (Não há correlação linear);
- $H_1: \rho \neq 0$ (Há correlação linear).

Nível de significância: $\alpha = 0,05$;

$n = 39$;

Estatística de teste = coeficiente de correlação = $r = 0,9555$;

Valores críticos de $r_c = \pm 0,312$ (Anexo B);

Logo:

$r > r_c \rightarrow$ Rejeita-se $H_0: \rho = 0 \rightarrow$ Deixa-se de rejeitar $H_1: \rho \neq 0$

Há evidência suficiente para apoiar a afirmativa de que existe correlação linear entre os registros de precipitação média acumulada na bacia e as cotas altimétricas atingidas no Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o Pico avaliado.

III. Coeficientes b_1 e b_0 da reta de regressão:

De acordo com as equações 9 e 10 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$n = 39$; $\bar{x} = 10,6$; $\bar{y} = 842,0$;

$\sum xy = 348.780,2$; $\sum x = 414,1$; $\sum y = 32.839,8$;

$\sum x^2 = 7.652.627,8$

Logo:

- **$b_1 = 0,0586$**
- **$b_0 = 841,42$**

Equação de regressão obtida:

- **$\hat{y} = 0,0586x + 841,42$**

IV. Variação total, Variação Explicada e Variação Não Explicada:

De acordo com as equações 11, 12 e 13 apresentadas no item 2.2.3 têm-se:

$$\Sigma(y - \bar{y})^2 = 4,081; \Sigma(\hat{y} - \bar{y})^2 = 3,726; \Sigma(y - \hat{y})^2 = 0,355$$

Logo:

- **Varição Total = 4,081**
- **Varição Explicada = 3,726**
- **Varição Não Explicada = 0,335**

V. Coeficiente de determinação:

De acordo com a equação 14 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

Varição Total = 4,081;

Varição Explicada = 3,726;

Logo:

- **$r^2 = 0,9131$** → Ou seja, 91,31% da variação total em y pode ser explicada pela reta de regressão obtida neste Pico.

VI. Erro padrão da estimativa:

De acordo com a equação 15 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\Sigma(y - \hat{y})^2 = 0,355;$$

n = 39;

Logo:

- **$s_e = 0,098$** → o valor obtido expressa uma medida das diferenças entre os valores amostrais de precipitação (y) observados e os valores de precipitação previstos (\hat{y}) pela reta de regressão obtida para o Pico.

VII. Intervalo de previsão individual/Margem de Erro (médio):

De acordo com a equação 17 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\alpha = 0,05;$$

$$t_{\alpha/2} = 2,026 \text{ (n-2 graus de liberdade; Anexo A);}$$

$$s_e = 0,098;$$

$$n = 39;$$

$$\sum x = 414,1; \sum x^2 = 5484,4;$$

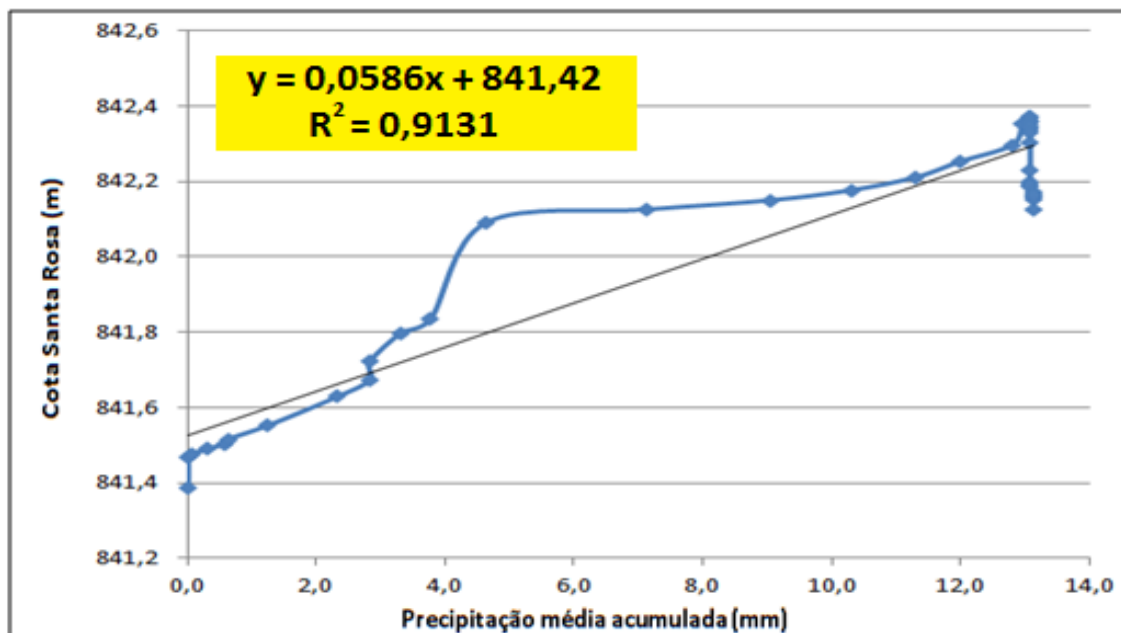
$$(x_0 - \bar{x})^2 = \text{variável para cada valor de } x_0;$$

Logo:

- **$E_{\text{médio}} = 0,203$ metros ou **20,3 centímetros****
- **Intervalo de previsão:**
 $\hat{y} - 0,203 < y < \hat{y} + 0,203 \rightarrow$ Isto é, para um valor de precipitação acumulada qualquer (x_0), estamos 95% certos de que a cota altimétrica encontrada pela equação de regressão, para este Pico, apresenta um erro médio de 20,3 centímetros.

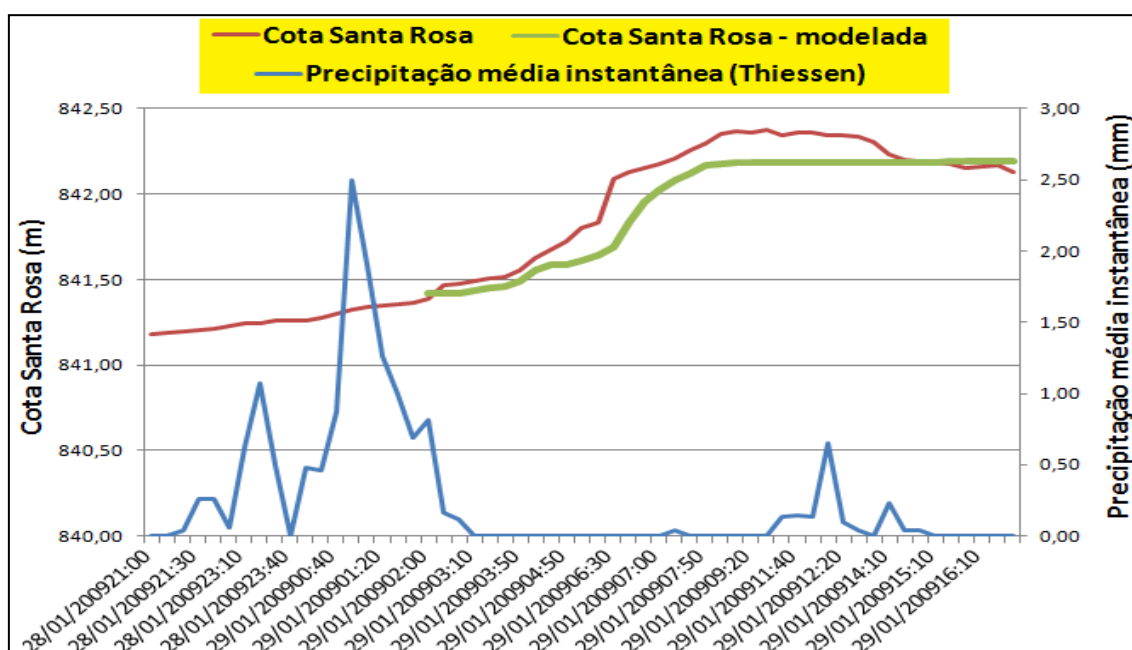
VIII. Gráfico de dispersão

Gráfico 21 - Gráfico de dispersão, equação de regressão e coeficiente de determinação para o Pico 1 (Período 2009)



IX. Gráfico comparativo – cota real e cota modelada entre a cota santa rosa real e a cota santa rosa modelada pela equação de regressão

Gráfico 22 - Gráfico comparativo entre a cota real na estação Santa Rosa e cota modelada pela equação de regressão para o Pico 1 (Período 2009)



b) Pico 2: 12/02/2009 10:20hs a 13/02/2009 4:00hs

I. Coeficiente de correlação:

De acordo com a equação (5) apresentada no item 2.2.3, têm-se:

$$n = 24;$$

$$\sum xy = 67744,7; \sum x = 80,5; \sum y = 20199,2;$$

$$\sum x^2 = 420,7; \sum y^2 = 17.000.386,9.$$

Logo:

- **$r = 0,8886$**

II. Teste de hipótese:

Hipóteses:

- $H_0: \rho = 0$ (Não há correlação linear);
- $H_1: \rho \neq 0$ (Há correlação linear).

Nível de significância: $\alpha = 0,05$;

$$N = 24;$$

Estatística de teste = coeficiente de correlação = $r = 0,8886$;

Valores críticos de $r_c = \pm 0,396$ (Anexo B);

Logo:

$$r > r_c \rightarrow \text{Rejeita-se } H_0: \rho = 0 \rightarrow \text{Deixa-se de rejeitar } H_1: \rho \neq 0$$

Há evidência suficiente para apoiar a afirmativa de que existe correlação linear entre os registros de precipitação média acumulada na bacia e as cotas altimétricas atingidas no Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o Pico avaliado.

III. Coeficientes b_1 e b_0 da reta de regressão:

De acordo com as equações 9 e 10 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$n = 24; \bar{x} = 3,35; \bar{y} = 841,63$$

$$\sum xy = 67744,7; \sum x = 80,5; \sum y = 20199,2;$$

$$\sum x^2 = 420,7$$

Logo:

- **$b_1 = 0,1068$**
- **$b_0 = 841,28$**

Equação de regressão obtida:

- **$y = 0,1068x + 841,28$**

IV. Variação total, Variação Explicada e Variação Não Explicada:

De acordo com as equações 11, 12 e 13 apresentadas no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \bar{y})^2 = 2,121; \sum(\hat{y} - \bar{y})^2 = 1,722; \sum(y - \hat{y})^2 = 0,459$$

Logo:

- **Variação Total = 2,121**
- **Variação Explicada = 1,722**
- **Variação Não Explicada = 0,459**

V. Coeficiente de determinação:

De acordo com a equação 14 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\text{Variação Total} = 2,121$$

$$\text{Variação Explicada} = 1,722$$

Logo:

- **$r^2 = 0,7896$** → *Ou seja, 78,96% da variação total em y pode ser explicada pela reta de regressão obtida neste Pico.*

VI. Erro padrão da estimativa:

De acordo com a equação 15 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \hat{y})^2 = 0,459;$$

$$n = 24;$$

Logo:

- **$s_e = 0,144$** → o valor obtido expressa uma medida das diferenças entre os valores amostrais de precipitação (y) observados e os valores de precipitação previstos (\hat{y}) pela reta de regressão obtida para o Pico.

VII. Intervalo de previsão individual/Margem de Erro (médio):

De acordo com a equação 17 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\alpha = 0,05;$$

$$t_{\alpha/2} = 2,074 \text{ (n-2 graus de liberdade; Anexo A);}$$

$$s_e = 0,144;$$

$$n = 24;$$

$$\sum x = 80,5; \sum x^2 = 420,7;$$

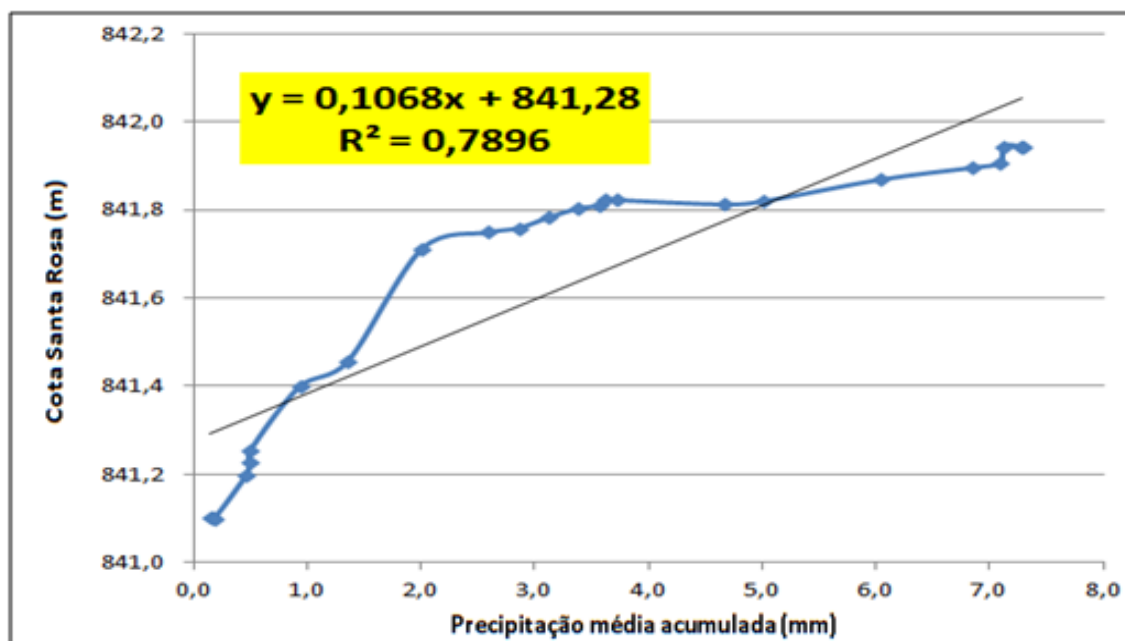
$$(x_0 - \bar{x})^2 = \text{variável para cada valor de } x_0;$$

Logo:

- **$E_{\text{médio}} = 0,312$ metros ou 31,2 centímetros**
- **Intervalo de previsão:**
 $\hat{y} - 0,312 < y < \hat{y} + 0,312$ → Isto é, para um valor de precipitação acumulada qualquer (x_0), estamos 95% certos de que a cota altimétrica encontrada pela equação de regressão, para este Pico, apresenta um erro médio de 31,2 centímetros.

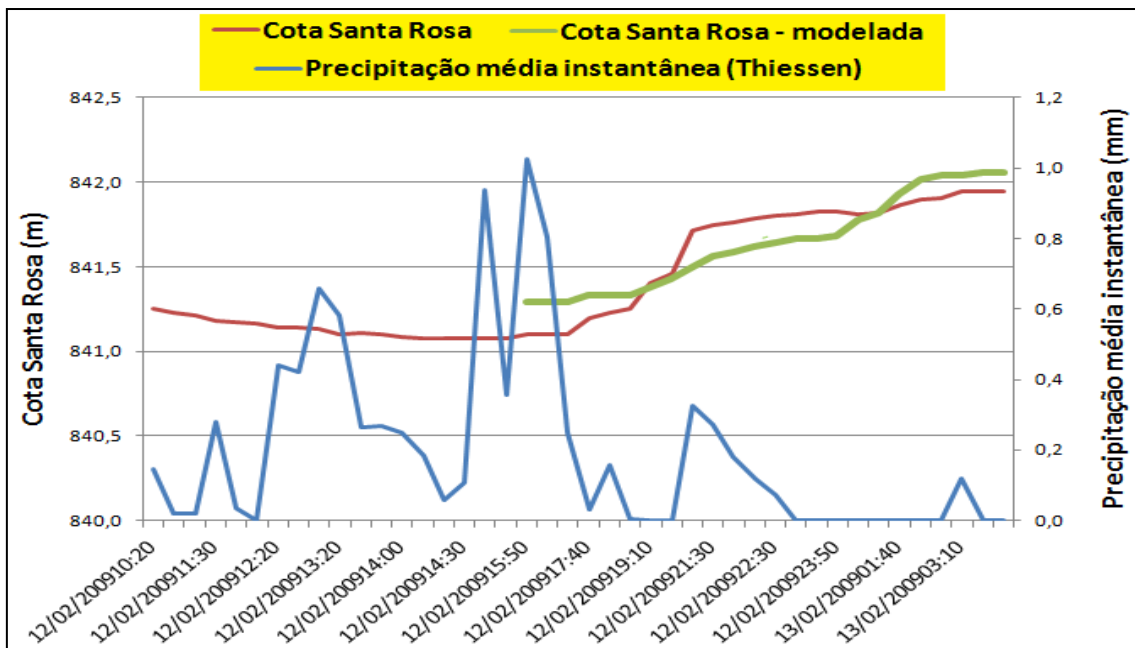
X. Gráfico de dispersão

Gráfico 23 - Gráfico de dispersão, equação de regressão e coeficiente de regressão para o Pico 2 (Período 2009)



XI. Gráfico comparativo – cota real e cota modelada entre a cota santa rosa real e a cota santa rosa modelada pela equação de regressão

Gráfico 24 - Gráfico comparativo entre a cota real na estação Santa Rosa e cota modelada pela equação de regressão para o Pico 2 (Período 2009)



c) Pico 3: 14/02/2009 13:30hs a 15/02/2009 20:00hs;

I. Coeficiente de correlação:

De acordo com a equação 5 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$n = 75;$$

$$\sum xy = 796.133,2; \sum x = 943,8; \sum y = 63.218,7;$$

$$\sum x^2 = 17922,3; \sum y^2 = 53.288.057,4.$$

Logo:

- **$r = 0,9072$**

II. Teste de hipótese:

Hipóteses:

- $H_0: \rho = 0$ (Não há correlação linear);
- $H_1: \rho \neq 0$ (Há correlação linear).

Nível de significância: $\alpha = 0,05$;

$N = 75$;

Estatística de teste = coeficiente de correlação = $r = 0,9072$;

Valores críticos de $r_c = \pm 0,228$ (Anexo B);

Logo:

$r > r_c \rightarrow$ Rejeita-se $H_0: \rho = 0 \rightarrow$ Deixa-se de rejeitar $H_1: \rho \neq 0$

Há evidência suficiente para apoiar a afirmativa de que existe correlação linear entre os registros de precipitação média acumulada na bacia e as cotas altimétricas atingidas no Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o Pico avaliado.

III. Coeficientes b_1 e b_0 da reta de regressão:

De acordo com as equações 9 e 10 apresentadas no item 2.2.3 têm-se:

$$n = 75; \bar{x} = 12,6; \bar{y} = 842,9$$

$$\sum xy = 796.133,2; \sum x = 943,8; \sum y = 63.218,7;$$

$$\sum x^2 = 53.288.057,4$$

Logo:

- $b_1 = 0,1033$
- $b_0 = 841,61$

Equação de regressão obtida:

- $y = 0,1033x + 841,61$

IV. Variação total, Variação Explicada e Variação Não Explicada:

De acordo com as equações 11, 12 e 13 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \bar{y})^2 = 78,387; \sum(\hat{y} - \bar{y})^2 = 64,516; \sum(y - \hat{y})^2 = 13,871$$

Logo:

- **Variação Total = 78,387**
- **Variação Explicada = 64,516**
- **Variação Não Explicada = 13,871**

V. Coeficiente de determinação:

De acordo com a equação 14 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\text{Variação Total} = 78,387$$

$$\text{Variação Explicada} = 64,516$$

Logo:

- $r^2 = 0,8231 \rightarrow$ Ou seja, 82,31% da variação total em y pode ser explicada pela reta de regressão obtida neste Pico.

VI. Erro padrão da estimativa:

De acordo com a equação 15 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \hat{y})^2 = 13,871;$$

$$n = 75;$$

Logo:

- $s_e = 0,436 \rightarrow$ o valor obtido expressa uma medida das diferenças entre os valores amostrais de precipitação (y) observados e os valores de precipitação previstos (\hat{y}) pela reta de regressão obtida para o Pico.

VII. Intervalo de previsão individual/Margem de Erro (médio):

De acordo com a equação 17 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\alpha = 0,05;$$

$$t_{\alpha/2} = 1,991 \text{ (n-2 graus de liberdade; Anexo A);}$$

$$s_e = 0,436;$$

$$n = 75;$$

$$\sum x = 943,8; \sum x^2 = 17922,3;$$

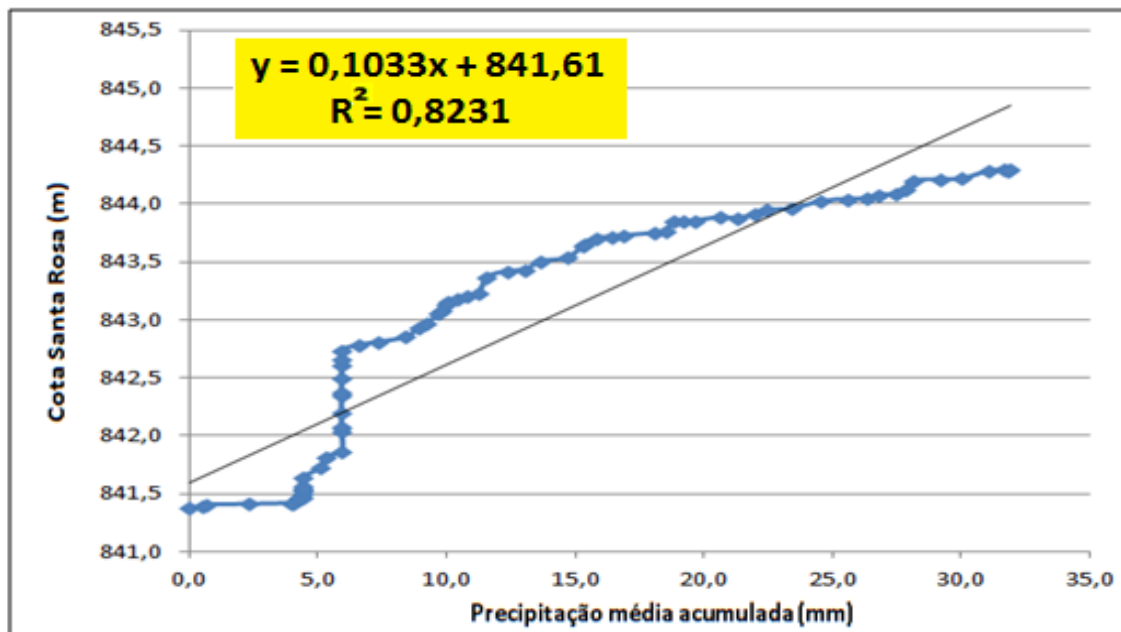
$$(x_0 - \bar{x})^2 = \text{variável para cada valor de } x_0;$$

Logo:

- $E_{\text{médio}} = 0,880$ metros ou 88 centímetros
- Intervalo de previsão:
 $\hat{y} - 0,880 < y < \hat{y} + 0,880 \rightarrow$ Isto é, para um valor de precipitação acumulada qualquer (x_0), estamos 95% certos de que a cota altimétrica encontrada pela equação de regressão, para este Pico, apresenta um erro médio de 88 centímetros.

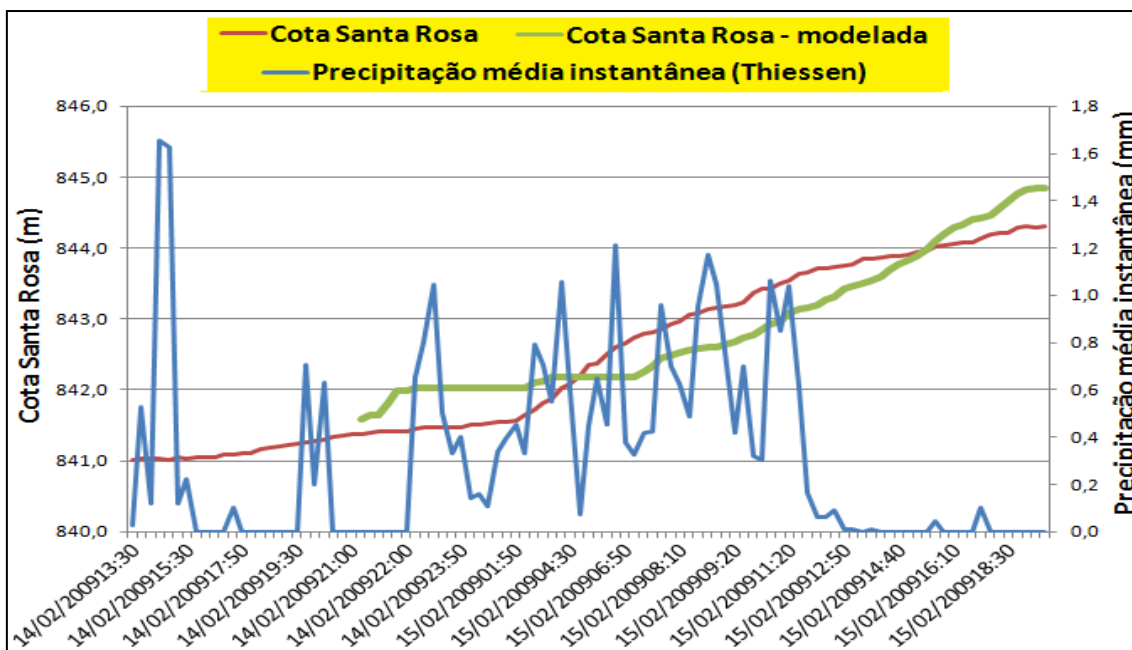
XII. Gráfico de dispersão

Gráfico 25 - Gráfico de dispersão, equação de regressão e coeficiente de regressão para o Pico 3 (Período 2009)



- ## XIII. Gráfico comparativo – cota real e cota modelada entre a cota santa rosa real e a cota santa rosa modelada pela equação de regressão

Gráfico 26 - Gráfico comparativo entre a cota real na estação Santa Rosa e cota modelada pela equação de regressão para o Pico 3 (Período 2009)



d) Pico 4: 24/02/2009 16:30hs a 25/02/2009 5:20hs.

I. Coeficiente de correlação:

De acordo com a equação 5 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$n = 26;$$

$$\sum xy = 129.417,9; \sum x = 153,7; \sum y = 21.889,2;$$

$$\sum x^2 = 1.140,1; \sum y^2 = 18.428.358,7;$$

Logo:

- **$r = 0,8674$**

II. Teste de hipótese:

Hipóteses:

- $H_0: \rho = 0$ (Não há correlação linear);
- $H_1: \rho \neq 0$ (Há correlação linear).

Nível de significância: $\alpha = 0,05$;

$N = 26$;

Estatística de teste = coeficiente de correlação = $r = 0,8674$;

Valores críticos de $r_c = \pm 0,396$ (Anexo B) ;

Logo:

$r > r_c \rightarrow$ Rejeita-se $H_0: \rho = 0 \rightarrow$ Deixa-se de rejeitar $H_1: \rho \neq 0$

Há evidência suficiente para apoiar a afirmativa de que existe correlação linear entre os registros de precipitação média acumulada na bacia e as cotas altimétricas atingidas no Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o Pico avaliado.

III. Coeficientes b_1 e b_0 da reta de regressão:

De acordo com as equações 9 e 10 apresentadas no item 2.2.3 têm-se:

$$n = 26; \bar{x} = 5,9; \bar{y} = 841,9$$

$$\sum xy = 129.417,9; \sum x = 153,7; \sum y = 21.889,2;$$

$$\sum x^2 = 1.140,1$$

Logo:

- **$b_1 = 0,1100$**
- **$b_0 = 841,24$**

Equação de regressão obtida:

- **$y = 0,1100x + 841,24$**

IV. Variação total, Variação Explicada e Variação Não Explicada:

De acordo com as equações 11, 12 e 13 apresentadas no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \bar{y})^2 = 3,727; \sum(\hat{y} - \bar{y})^2 = 2,804; \sum(y - \hat{y})^2 = 0,923$$

Logo:

- **Variação Total = 3,727**
- **Variação Explicada = 2,804**
- **Variação Não Explicada = 0,923**

V. Coeficiente de determinação:

De acordo com a equação 14 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\text{Variação Total} = 3,727$$

$$\text{Variação Explicada} = 2,804$$

Logo:

- $r^2 = 0,7525 \rightarrow$ Ou seja, 75,25% da variação total em y pode ser explicada pela reta de regressão obtida neste Pico.

VI. Erro padrão da estimativa:

De acordo com a equação 15 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \hat{y})^2 = 3,727;$$

$$n = 26;$$

Logo:

- $s_e = 0,196 \rightarrow$ o valor obtido expressa uma medida das diferenças entre os valores amostrais de precipitação (y) observados e os valores de precipitação previstos (\hat{y}) pela reta de regressão obtida para o Pico.

VII. Intervalo de previsão individual/Margem de Erro (médio):

De acordo com a equação 17 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\alpha = 0,05;$$

$$t_{\alpha/2} = 2,064 \text{ (n-2 graus de liberdade; Anexo A);}$$

$$s_e = 0,196;$$

$$n = 26;$$

$$\sum x = 153,7; \sum x^2 = 1.140,1;$$

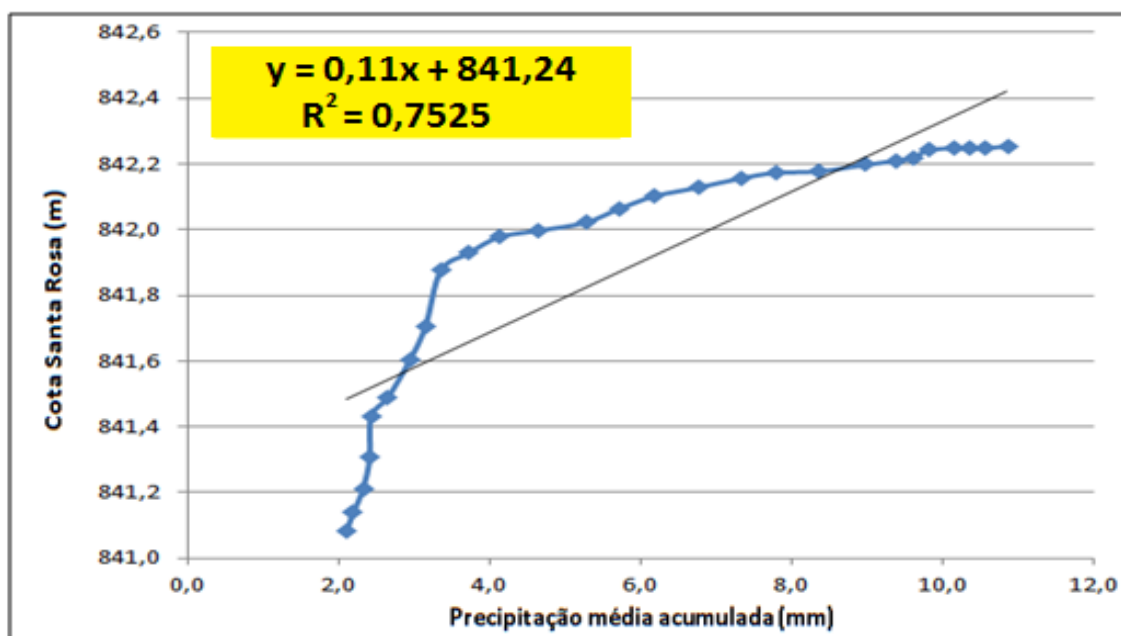
$$(x_0 - \bar{x})^2 = \text{variável para cada valor de } x_0;$$

Logo:

- $E_{\text{méd}} = 0,420$ metros ou 42 centímetros
- Intervalo de previsão:
 $\hat{y} - 0,420 < y < \hat{y} + 0,420 \rightarrow$ Isto é, para um valor de precipitação acumulada qualquer (x_0), estamos 95% certos de que a cota altimétrica encontrada pela equação de regressão, para este Pico, apresenta um erro médio de 42 centímetros.

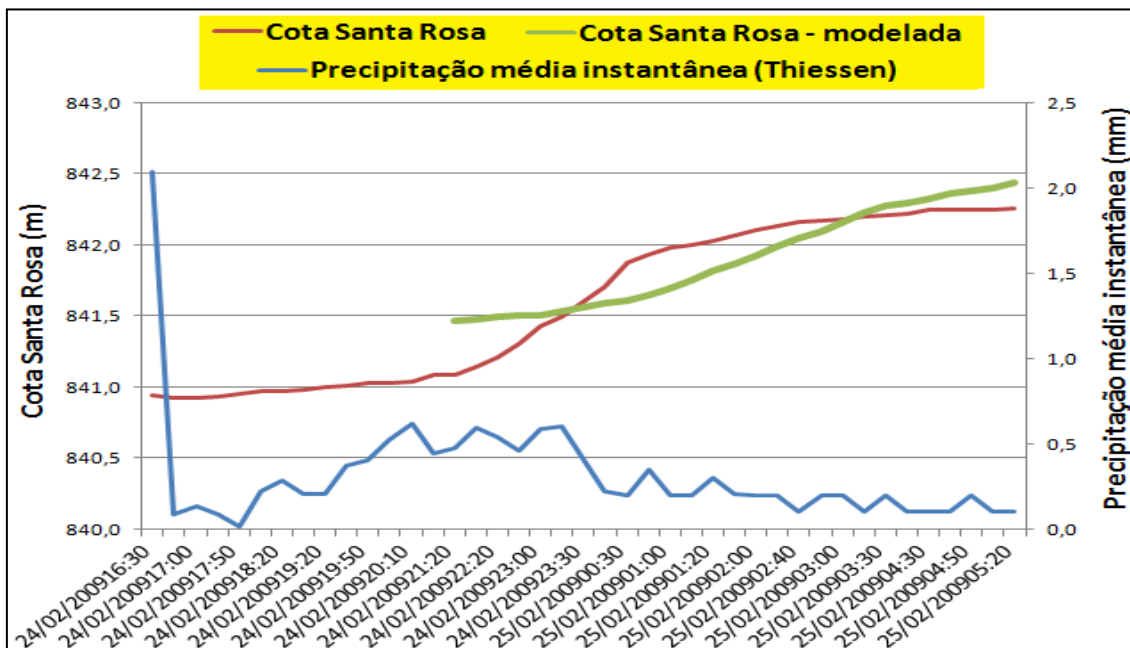
VIII. Gráfico de dispersão

Gráfico 27 - Gráfico de regressão, equação de regressão e coeficiente de regressão para o Pico 4 (Período 2009)



- IX. Gráfico comparativo – cota real e cota modelada entre a cota santa rosa real e a cota santa rosa modelada pela equação de regressão

Gráfico 28 - Gráfico comparativo entre a cota real na estação Santa Rosa e cota modelada pela equação para o Pico 4 (Período 2009)



- Período 2009/2010: Dezembro de 2009, Janeiro, Fevereiro e Março de 2010
 - a) Pico 1: 07/12/2009 14:30hs a 08/12/2009 23:50hs

I. Coeficiente de correlação:

De acordo com a equação 5 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$n = 60;$$

$$\sum xy = 875.102,8; \sum x = 1.037,8; \sum y = 50.567,6;$$

$$\sum x^2 = 22.857,7; \sum y^2 = 42.618.339,6$$

Logo:

- **$r = 0,9824$**

II. Teste de hipótese:

Hipóteses:

- $H_0: \rho = 0$ (Não há correlação linear);
- $H_1: \rho \neq 0$ (Há correlação linear).

Nível de significância: $\alpha = 0,05$;

$N = 60$;

Estatística de teste = coeficiente de correlação = $r = 0,9824$;

Valores críticos de $r_c = \pm 0,254$ (Anexo B);

Logo:

$r > r_c \rightarrow$ Rejeita-se $H_0: \rho = 0 \rightarrow$ Deixa-se de rejeitar $H_1: \rho \neq 0$

Há evidência suficiente para apoiar a afirmativa de que existe correlação linear entre os registros de precipitação média acumulada na bacia e as cotas altimétricas atingidas no Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o Pico avaliado.

III. Coeficientes b_1 e b_0 da reta de regressão:

De acordo com as equações 9 e 10 apresentadas no item 2.2.3 têm-se:

$n = 60$; $\bar{x} = 17,3$; $\bar{y} = 842,8$

$\sum xy = 875.102,8$; $\sum x = 1.037,8$; $\sum y = 50.567,6$;

$\sum x^2 = 22.857,7$

Logo:

- **$b_1 = 0,0877$**

- **$b_0 = 841,28$**

Equação de regressão obtida:

- **$y = 0,0877x + 841,28$**

IV. Variação total, Variação Explicada e Variação Não Explicada:

De acordo com as equações 11,12 e 13 apresentadas no item 2.2.3 têm-se:

$\sum(y - \bar{y})^2 = 39,137$; $\sum(\hat{y} - \bar{y})^2 = 37,769$; $\sum(y - \hat{y})^2 = 1,368$

Logo:

- **Variação Total = 39,137**

- **Variação Explicada = 37,769**

- **Varição Não Explicada = 1,368**

V. Coeficiente de determinação:

De acordo com a equação 14 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\text{Variação Total} = 39,137$$

$$\text{Variação Explicada} = 37,769$$

Logo:

- **$r^2 = 0,9650$** → Ou seja, 96,50% da variação total em y pode ser explicada pela reta de regressão obtida neste Pico.

VI. Erro padrão da estimativa:

De acordo com a equação 15 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \hat{y})^2 = 39,137;$$

$$n = 60;$$

Logo:

- **$s_e = 0,154$** → o valor obtido expressa uma medida das diferenças entre os valores amostrais de precipitação (y) observados e os valores de precipitação previstos (\hat{y}) pela reta de regressão obtida para o Pico.

VII. Intervalo de previsão individual/Margem de Erro (médio):

De acordo com a equação 17 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\alpha = 0,05;$$

$$t_{\alpha/2} = 2,002 \text{ (n-2 graus de liberdade; Anexo A);}$$

$$s_e = 0,154;$$

$$n = 60;$$

$$\sum x = 1.037,8; \sum x^2 = 22.857,7;$$

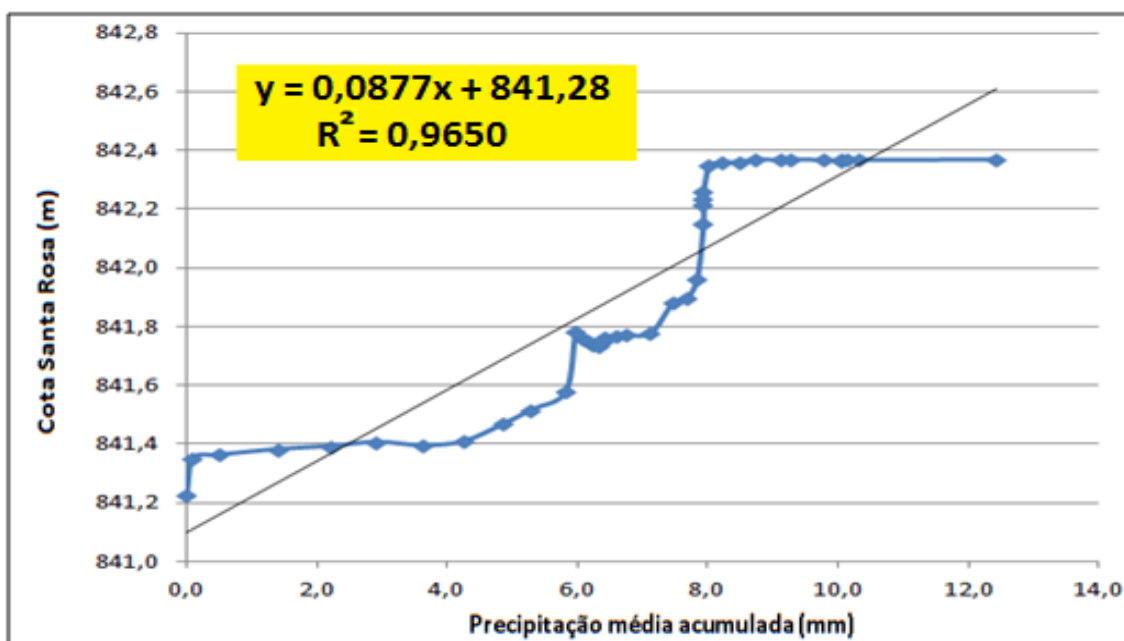
$$(x_0 - \bar{x})^2 = \text{variável para cada valor de } x_0;$$

Logo:

- **$E_{\text{médio}} = 0,312$ metros ou 31,2 centímetros**
- **Intervalo de previsão:**
 $\hat{y} - 0,312 < y < \hat{y} + 0,312 \rightarrow$ Isto é, para um valor de precipitação acumulada qualquer (x_0), estamos 95% certos de que a cota altimétrica encontrada pela equação de regressão, para este Pico, apresenta um erro médio de 31,2 centímetros.

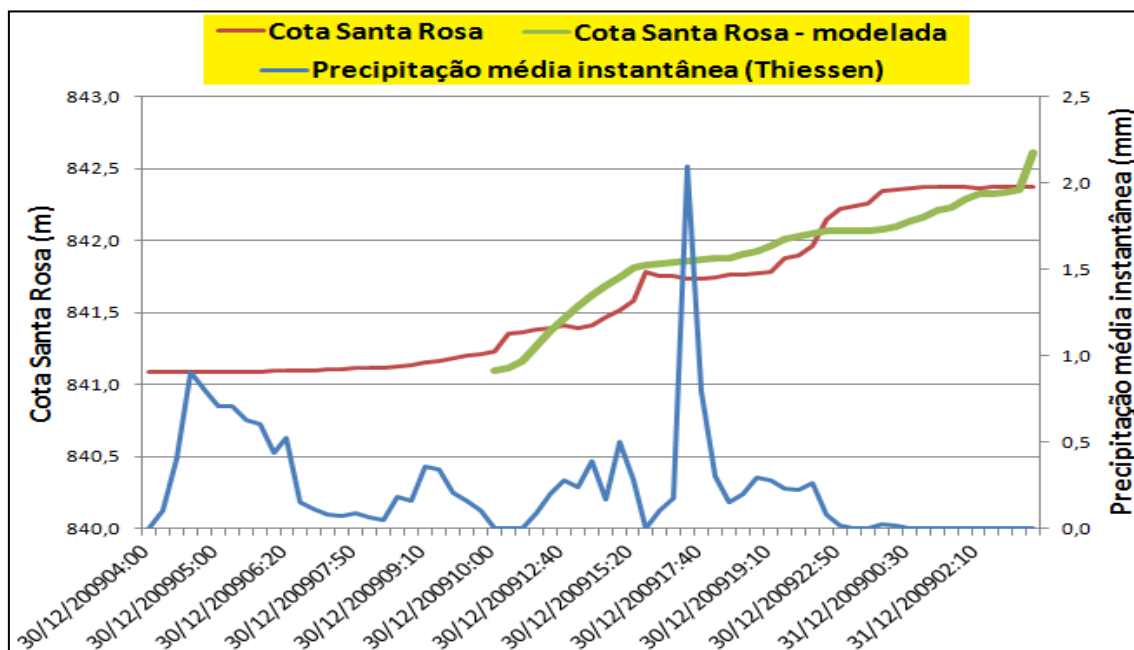
X. Gráfico de dispersão

Gráfico 29 - Gráfico de regressão, equação de regressão e coeficiente de regressão para o Pico 1 (Período 2009/2010)



- #### XI. Gráfico comparativo – cota real e cota modelada entre a cota santa rosa real e a cota santa rosa modelada pela equação de regressão

Gráfico 30 - Gráfico comparativo entre a cota real na estação Santa Rosa e cota modelada pela equação para o Pico 1



b) Pico 2: 30/12/2009 4:00hs a 31/12/2009 2:50hs

I. Coeficiente de correlação:

De acordo com a equação 5 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$n = 40$;

$\sum xy = 222.698,5$; $\sum x = 264,5$; $\sum y = 33.676,1$

$\sum x^2 = 2.083,7$; $\sum y^2 = 28.351.993,1$

Logo:

- **$r = 0,9122$**

II. Teste de hipótese:

Hipóteses:

- $H_0: \rho = 0$ (Não há correlação linear);
- $H_1: \rho \neq 0$ (Há correlação linear).

Nível de significância: $\alpha = 0,05$;

$N = 40$;

Estatística de teste = coeficiente de correlação = $r = 0,9122$;
 Valores críticos de $r_c = \pm 0,312$ (Anexo B);

Logo:

$r > r_c \rightarrow$ Rejeita-se $H_0: \rho = 0 \rightarrow$ Deixa-se de rejeitar $H_1: \rho \neq 0$

Há evidência suficiente para apoiar a afirmativa de que existe correlação linear entre os registros de precipitação média acumulada na bacia e as cotas altimétricas atingidas no Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o Pico avaliado.

III. Coeficientes b_1 e b_0 da reta de regressão:

De acordo com as equações 9 e 10 apresentadas no item 2.2.3 têm-se:

$$n = 40; \bar{x} = 6,6; \bar{y} = 841,9$$

$$\sum xy = 222.698,5; \sum x = 264,5; \sum y = 33.676,1$$

$$\sum x^2 = 2.083,7$$

Logo:

- **$b_1 = 0,1217$**

- **$b_0 = 841,10$**

Equação de regressão obtida:

- **$y = 0,1217x + 841,10$**

IV. Variação total, Variação Explicada e Variação Não Explicada:

De acordo com as equações 11,12 e 13 apresentadas no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \bar{y})^2 = 5,968; \sum(\hat{y} - \bar{y})^2 = 4,966; \sum(y - \hat{y})^2 = 1,002$$

Logo:

- **Variação Total = 5,968**

- **Variação Explicada = 4,966**

- **Variação Não Explicada = 1,002**

V. Coeficiente de determinação:

De acordo com a equação 14 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\text{Variação Total} = 5,968$$

$$\text{Variação Explicada} = 4,966$$

Logo:

- $r^2 = 0,8321 \rightarrow$ Ou seja, 83,21% da variação total em y pode ser explicada pela reta de regressão obtida neste Pico.

VI. Erro padrão da estimativa:

De acordo com a equação 15 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \hat{y})^2 = 5,968;$$

$$n = 40;$$

Logo:

- $s_e = 0,162 \rightarrow$ o valor obtido expressa uma medida das diferenças entre os valores amostrais de precipitação (y) observados e os valores de precipitação previstos (\hat{y}) pela reta de regressão obtida para o Pico.

VII. Intervalo de previsão individual/Margem de Erro (médio):

De acordo com a equação 17 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\alpha = 0,05;$$

$$t_{\alpha/2} = 2,024 \text{ (n-2 graus de liberdade; Anexo A);}$$

$$s_e = 0,162;$$

$$n = 40;$$

$$\sum x = 375,6; \sum x^2 = 5.589,6;$$

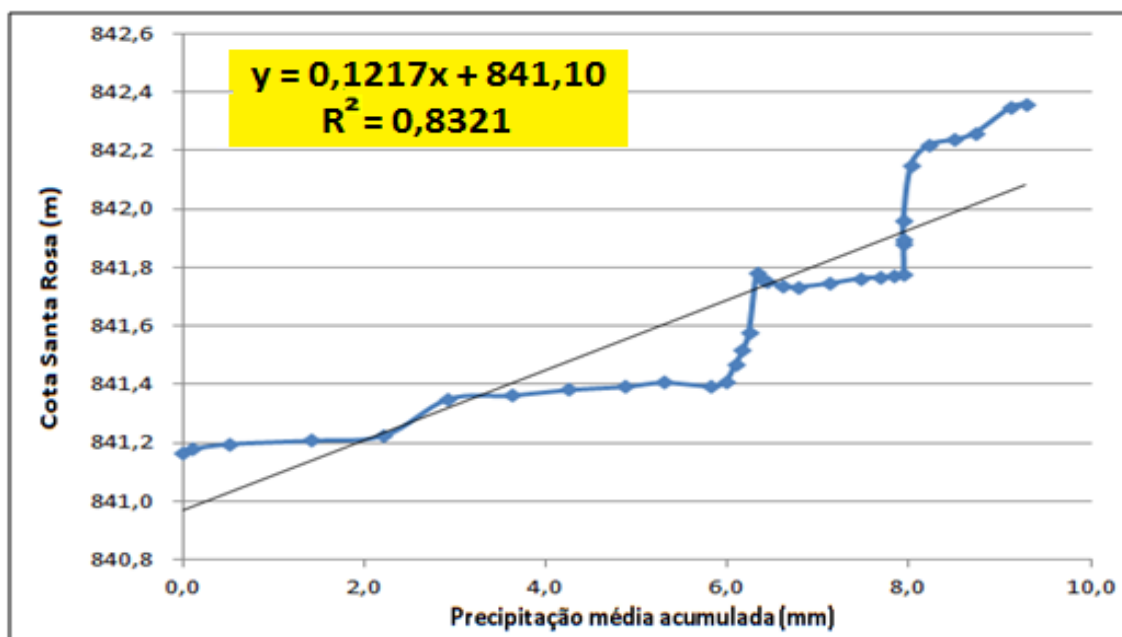
$$(x_0 - \bar{x})^2 = \text{variável para cada valor de } x_0;$$

Logo:

- $E_{\text{médio}} = 0,337$ metros ou 33,7 centímetros
- Intervalo de previsão:
 $\hat{y} - 0,337 < y < \hat{y} + 0,337 \rightarrow$ Isto é, para um valor de precipitação acumulada qualquer (x_0), estamos 95% certos de que a cota altimétrica encontrada pela equação de regressão, para este Pico, apresenta um erro médio de 33,7 centímetros.

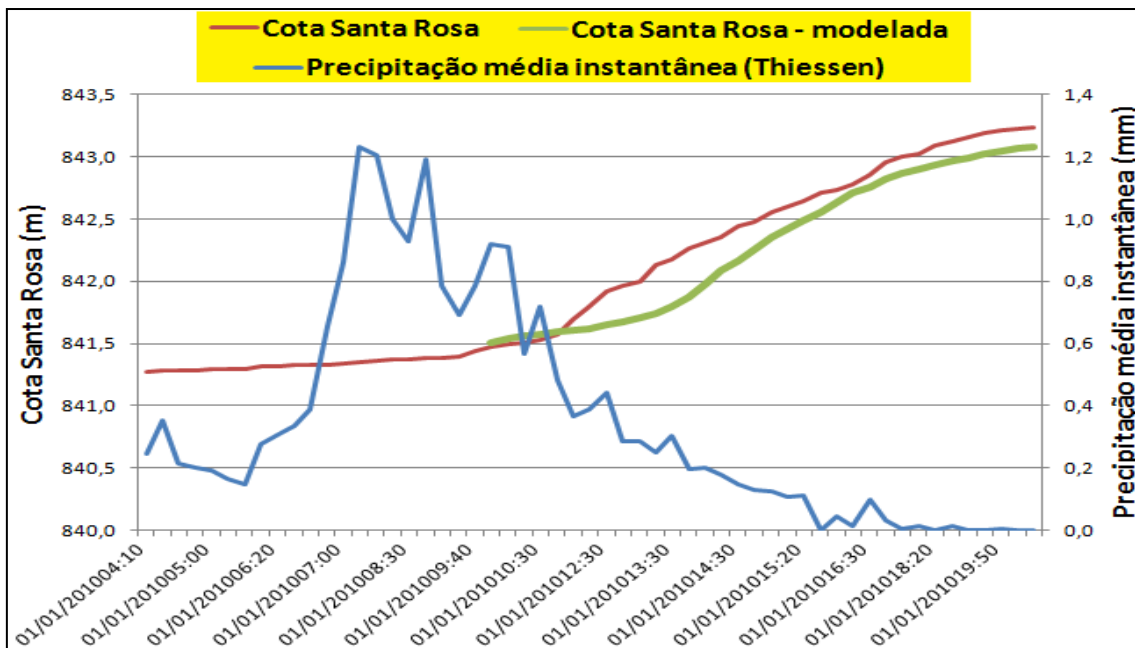
XII. Gráfico de dispersão

Gráfico 31 - Gráfico de regressão, equação de regressão e coeficiente de regressão para o Pico 2 (Período 2009/2010)



- ## XIII. Gráfico comparativo – cota real e cota modelada entre a cota santa rosa real e a cota santa rosa modelada pela equação de regressão

Gráfico 32 - Gráfico comparativo entre a cota real na estação Santa Rosa e cota modelada pela equação para o Pico 2



c) Pico 3: 01/01/2010 4:10hs a 01/01/2010 20:30hs

I. Coeficiente de correlação:

De acordo com a equação 5 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$n = 39;$$

$$\sum xy = 316.585,1; \sum x = 375,6; \sum y = 28.643,3$$

$$\sum x^2 = 5.589,6; \sum y^2 = 24.130.506,9$$

Logo:

- **$r = 0,9783$**

II. Teste de hipótese:

Hipóteses:

- $H_0: \rho = 0$ (Não há correlação linear);
- $H_1: \rho \neq 0$ (Há correlação linear).

Nível de significância: $\alpha = 0,05$;

$$N = 34;$$

Estatística de teste = coeficiente de correlação = $r = 0,9784$;

Valores críticos de $r_c = \pm 0,335$ (Anexo B);

Logo:

$r > r_c \rightarrow$ Rejeita-se $H_0: \rho = 0 \rightarrow$ Deixa-se de rejeitar $H_1: \rho \neq 0$

Há evidência suficiente para apoiar a afirmativa de que existe correlação linear entre os registros de precipitação média acumulada na bacia e as cotas altimétricas atingidas no Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o Pico avaliado.

III. Coeficientes b_1 e b_0 da reta de regressão:

De acordo com a equação 9 e 10 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$n = 34; \bar{x} = 11,0; \bar{y} = 842,4$$

$$\sum xy = 316.585,1; \sum x = 375,6; \sum y = 28.643,3$$

$$\sum x^2 = 5.589,6$$

Logo:

- $b_1 = 0,0872$
- $b_0 = 841,49$

Equação de regressão obtida:

- $y = 0,0872x + 841,49$

IV. Variação total, Variação Explicada e Variação Não Explicada:

De acordo com as equações 11,12 e 13 apresentadas no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \bar{y})^2 = 11,436; \sum(\hat{y} - \bar{y})^2 = 10,946; \sum(y - \hat{y})^2 = 0,490$$

Logo:

- **Variação Total = 11,436**
- **Variação Explicada = 10,946**
- **Variação Não Explicada = 0,490**

V. Coeficiente de determinação:

De acordo com a equação 14 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

Variação Total = 11,436

Variação Explicada = 10,946

Logo:

- $r^2 = 0,9572 \rightarrow$ Ou seja, 95,72% da variação total em y pode ser explicada pela reta de regressão obtida neste Pico.

VI. Erro padrão da estimativa:

De acordo com a equação 15 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \hat{y})^2 = 11,436;$$

$$n = 34;$$

Logo:

- $s_e = 0,124 \rightarrow$ o valor obtido expressa uma medida das diferenças entre os valores amostrais de precipitação (y) observados e os valores de precipitação previstos (\hat{y}) pela reta de regressão obtida para o Pico.

VII. Intervalo de previsão individual/Margem de Erro (médio):

De acordo com a equação 17 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\alpha = 0,05;$$

$$t_{\alpha/2} = 2,037 \text{ (n-2 graus de liberdade; Anexo A);}$$

$$s_e = 0,124;$$

$$n = 34;$$

$$\sum x = 375,6; \sum x^2 = 5.589,6;$$

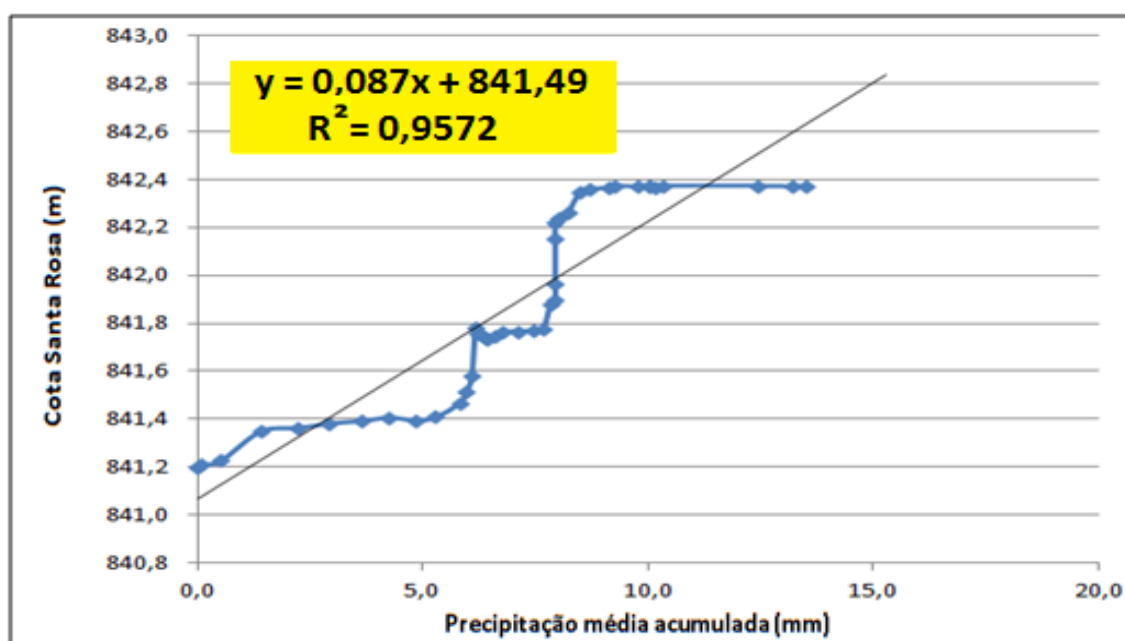
$$(x_0 - \bar{x})^2 = \text{variável para cada valor de } x_0;$$

Logo:

- $E_{\text{m\u00e9dio}} = 0,259$ metros ou 25,9 cent\u00edmetros
- Intervalo de previs\u00e3o:
 $\hat{y} - 0,259 < y < \hat{y} + 0,259 \rightarrow$ Isto \u00e9, para um valor de precipita\u00e7\u00e3o acumulada qualquer (x_0), estamos 95% certos de que a cota altim\u00e9trica encontrada pela equa\u00e7\u00e3o de regress\u00e3o, para este Pico, apresenta um erro m\u00e9dio de 25,9 cent\u00edmetros.

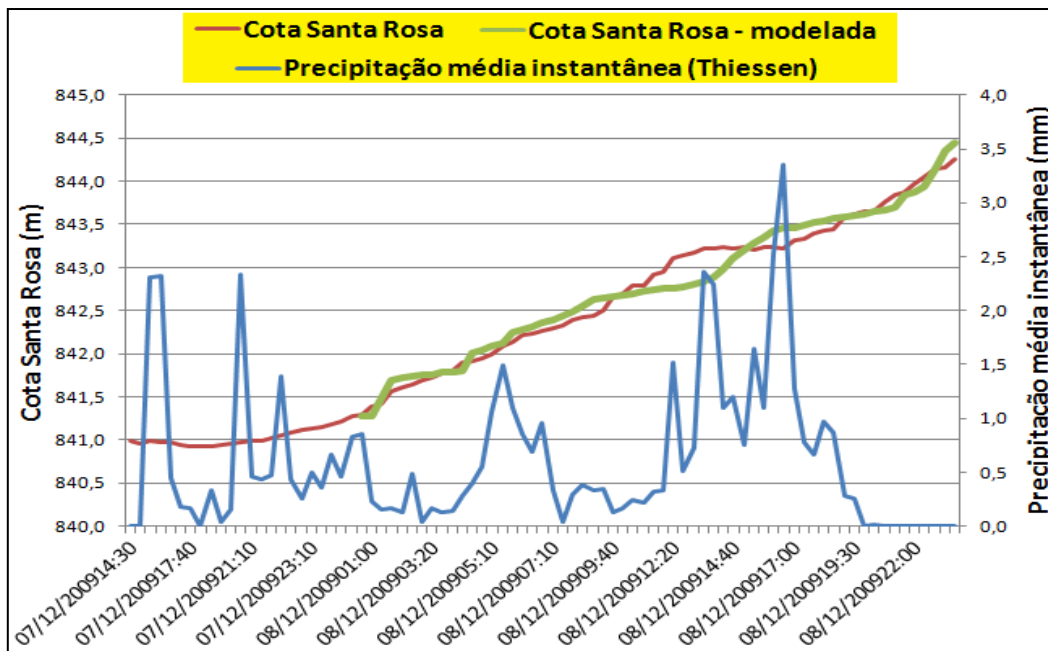
VIII. Gr\u00e1fico de dispers\u00e3o

Gr\u00e1fico 33 - Gr\u00e1fico de regress\u00e3o, equa\u00e7\u00e3o de regress\u00e3o e coeficiente de regress\u00e3o para o Pico 3 (Per\u00edodo 2009/2010)



- IX. Gr\u00e1fico comparativo – cota real e cota modelada entre a cota santa rosa real e a cota santa rosa modelada pela equa\u00e7\u00e3o de regress\u00e3o

Gr\u00e1fico 34 - Gr\u00e1fico comparativo entre a cota real na esta\u00e7\u00e3o Santa Rosa e cota modelada pela equa\u00e7\u00e3o para o Pico 3



d) Pico 4: 01/03/2010 3:30hs a 02/03/2010 1:10hs.

I. Coeficiente de correlação:

De acordo com a equação 5 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$n = 44;$$

$$\sum xy = 163.835,6; \sum x = 194,6; \sum y = 37019,8$$

$$\sum x^2 = 1.601,0; \sum y^2 = 31.146.912,2$$

Logo:

- **$r = 0,9452$**

II. Teste de hipótese:

Hipóteses:

- $H_0: \rho = 0$ (Não há correlação linear);
- $H_1: \rho \neq 0$ (Há correlação linear).

Nível de significância: $\alpha = 0,05$;

$$n = 44;$$

Estatística de teste = coeficiente de correlação = $r = 0,9452$;

Valores críticos de $r_c = \pm 0,294$ (Tabela B – Anexo) ;

Logo:

$r > r_c \rightarrow$ Rejeita-se $H_0: \rho = 0 \rightarrow$ Deixa-se de rejeitar $H_1: \rho \neq 0$

Há evidência suficiente para apoiar a afirmativa de que existe correlação linear entre os registros de precipitação média acumulada na bacia e as cotas altimétricas atingidas no Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o Pico avaliado.

III. Coeficientes b_1 e b_0 da reta de regressão:

De acordo com as equação 9 e 10 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$n = 44; \bar{x} = 4,4; \bar{y} = 841,4$$

$$\sum xy = 163.835,6; \sum x = 194,6; \sum y = 37019,8$$

$$\sum x^2 = 1.601,0$$

Logo:

- $b_1 = 0,1021$
- $b_0 = 840,91$

Equação de regressão obtida:

- $y = 0,1021x + 840,91$

IV. Variação total, Variação Explicada e Variação Não Explicada:

De acordo com as equações 11,12 e 13 apresentadas no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \bar{y})^2 = 8,644; \sum(\hat{y} - \bar{y})^2 = 7,723; \sum(y - \hat{y})^2 = 0,921$$

Logo:

- **Variação Total = 8,644**
- **Variação Explicada = 7,723**
- **Variação Não Explicada = 0,921**

V. Coeficiente de determinação:

De acordo com a equação 14 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\text{Variação Total} = 8,644$$

$$\text{Variação Explicada} = 7,723$$

Logo:

- $r^2 = 0,8935 \rightarrow$ Ou seja, 89,35% da variação total em y pode ser explicada pela reta de regressão obtida neste Pico.

VI. Erro padrão da estimativa:

De acordo com a equação 15 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \hat{y})^2 = 8,644;$$

$$n = 44;$$

Logo:

- $s_e = 0,306 \rightarrow$ o valor obtido expressa uma medida das diferenças entre os valores amostrais de precipitação (y) observados e os valores de precipitação previstos (\hat{y}) pela reta de regressão obtida para o Pico.

VII. Intervalo de previsão individual/Margem de Erro (médio):

De acordo com a equação 17 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\alpha = 0,05;$$

$$t_{\alpha/2} = 2,021 \text{ (n-2 graus de liberdade; Anexo A);}$$

$$s_e = 0,148;$$

$$n = 44;$$

$$\sum x = 194,6; \sum x^2 = 1.601,0;$$

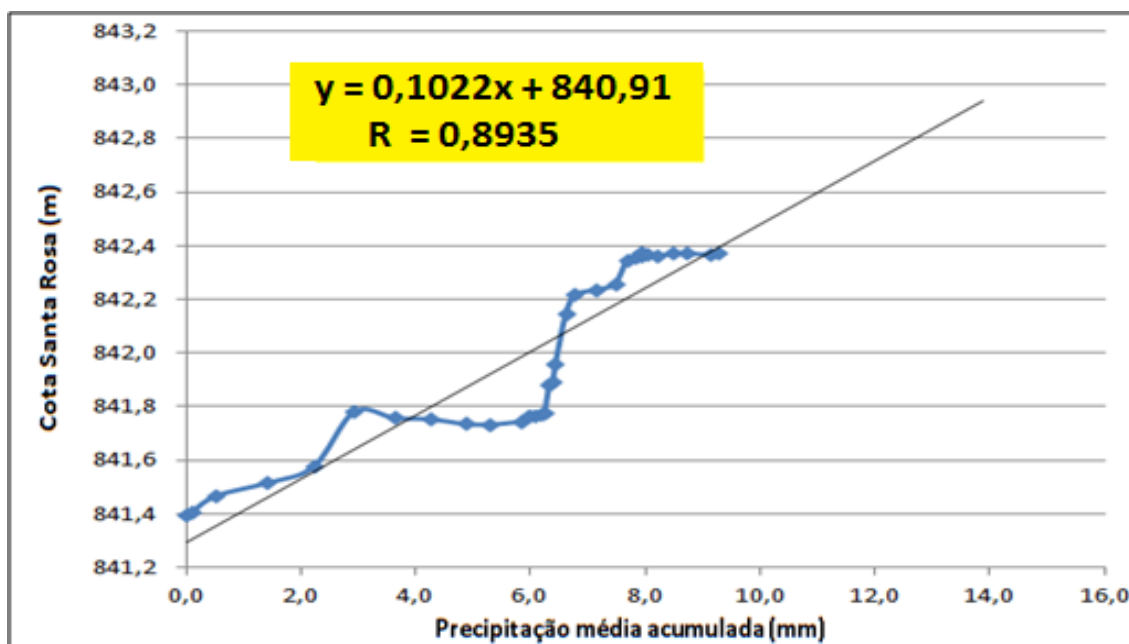
$$(x_0 - \bar{x})^2 = \text{variável para cada valor de } x_0;$$

Logo:

- $E_{\text{m\u00e9dio}} = 0,148$ metros ou 14,8 cent\u00edmetros
- Intervalo de previs\u00e3o:
 $\hat{y} - 0,148 < y < \hat{y} + 0,148 \rightarrow$ Isto \u00e9, para um valor de precipita\u00e7\u00e3o acumulada qualquer (x_0), estamos 95% certos de que a cota altim\u00e9trica encontrada pela equa\u00e7\u00e3o de regress\u00e3o, para este Pico, apresenta um erro m\u00e9dio de 14,8 cent\u00edmetros.

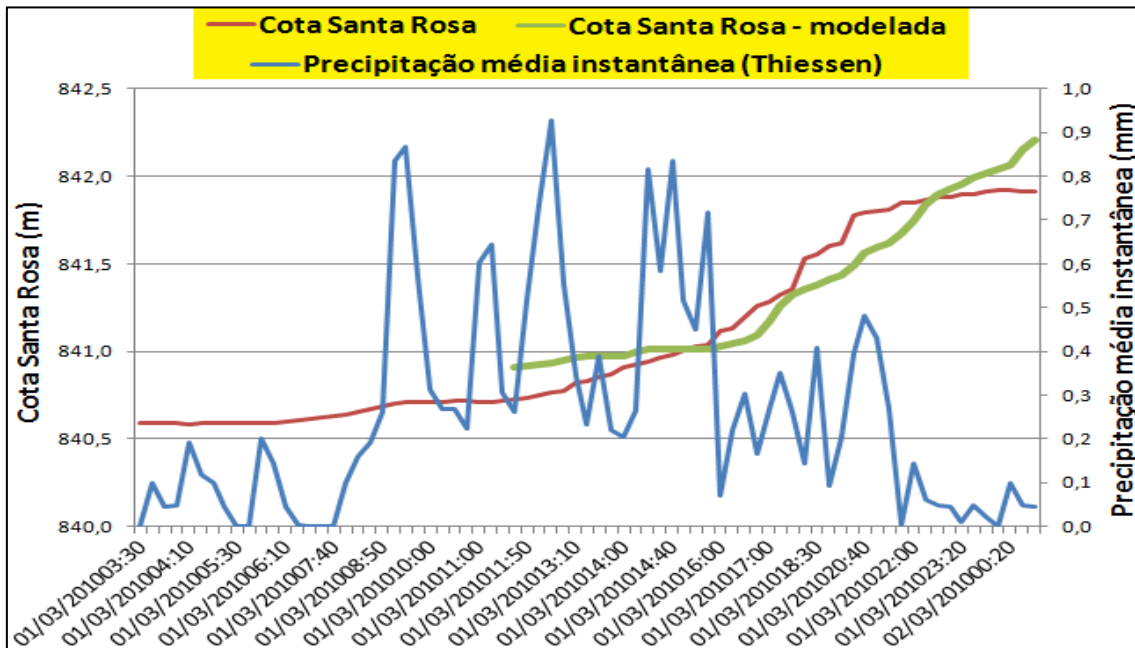
VIII. Gr\u00e1fico de dispers\u00e3o

Gr\u00e1fico 35 - Gr\u00e1fico de regress\u00e3o, equa\u00e7\u00e3o de regress\u00e3o e coeficiente de regress\u00e3o para o Pico 4 (Per\u00edodo 2009/2010)



- IX. Gr\u00e1fico comparativo – cota real e cota modelada entre a cota santa rosa real e a cota santa rosa modelada pela equa\u00e7\u00e3o de regress\u00e3o

Gráfico 36 -Gráfico comparativo entre a cota real na estação Santa Rosa e cota modelada pela equação para o Pico 4



- Período 2010/2011: Dezembro de 2010, Janeiro, Fevereiro e Março de 2011
Picos incompletos.
- Período 2011/2012: Dezembro de 2011, Janeiro e meados de Fevereiro de 2012.
 - a) Pico 1: 19/01/2012 15:00hs a 20/01/2012 4:00hs.

I. Coeficiente de correlação:

De acordo com a equação 5 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$n = 39;$$

$$\sum xy = 209.312,6; \sum x = 248,7; \sum y = 14.303,5$$

$$\sum x^2 = 5607,4; \sum y^2 = 12.034.790,5$$

Logo:

- **$r = 0,9760$**

II. Teste de hipótese:

Hipóteses:

- $H_0: \rho = 0$ (Não há correlação linear);
- $H_1: \rho \neq 0$ (Há correlação linear).

Nível de significância: $\alpha = 0,05$;

$n = 17$;

Estatística de teste = coeficiente de correlação = $r = 0,9760$;

Valores críticos de $r_c = \pm 0,482$ (Anexo B) ;

Logo:

$r > r_c \rightarrow$ Rejeita-se $H_0: \rho = 0 \rightarrow$ Deixa-se de rejeitar $H_1: \rho \neq 0$

Há evidência suficiente para apoiar a afirmativa de que existe correlação linear entre os registros de precipitação média acumulada na bacia e as cotas altimétricas atingidas no Rio Sapucaí na Estação Santa Rosa para o Pico avaliado.

III. Coeficientes b_1 e b_0 da reta de regressão:

De acordo com as equações 9 e 10 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$n = 17$; $\bar{x} = 14,6$; $\bar{y} = 841,4$

$\sum xy = 209.312,6$; $\sum x = 248,7$; $\sum y = 14.303,5$

$\sum x^2 = 5607,4$

Logo:

- **$b_1 = 0,0439$**
- **$b_0 = 840,74$**

Equação de regressão obtida:

- **$y = 0,0439x + 840,74$**

IV. Variação total, Variação Explicada e Variação Não Explicada:

De acordo com as equações 11,12 e 13 apresentadas no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \bar{y})^2 = 3,982; \sum(\hat{y} - \bar{y})^2 = 3,794; \sum(y - \hat{y})^2 = 0,189$$

Logo:

- **Varição Total = 3,982**
- **Varição Explicada = 3,794**
- **Varição Não Explicada = 0,189**

V. Coeficiente de determinação:

De acordo com a equação 14 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\text{Variação Total} = 3,982$$

$$\text{Variação Explicada} = 3,794$$

Logo:

- **$r^2 = 0,9526$** → *Ou seja, 95,26% da variação total em y pode ser explicada pela reta de regressão obtida neste Pico.*

VI. Erro padrão da estimativa:

De acordo com a equação 15 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\sum(y - \hat{y})^2 = 3,982;$$

$$n = 17;$$

Logo:

- **$s_e = 0,112$** → *o valor obtido expressa uma medida das diferenças entre os valores amostrais de precipitação (y) observados e os valores de precipitação previstos (\hat{y}) pela reta de regressão obtida para o Pico.*

VII. Intervalo de previsão individual/Margem de Erro (médio):

De acordo com a equação 17 apresentada no item 2.2.3 têm-se:

$$\alpha = 0,05;$$

$$t_{\alpha/2} = 2,131 \text{ (n-2 graus de liberdade; Anexo A);}$$

$$s_e = 0,112;$$

$$n = 17;$$

$$\sum x = 248,7; \sum x^2 = 5607,4;$$

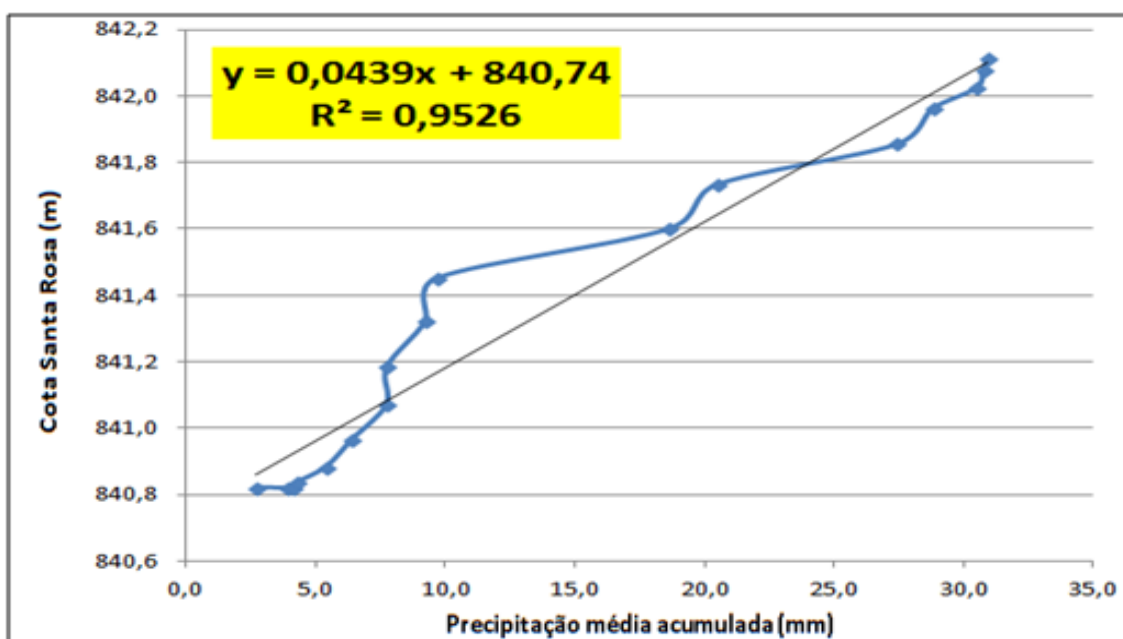
$$(x_0 - \bar{x})^2 = \text{variável para cada valor de } x_0;$$

Logo:

- **$E_{\text{médio}} = 0,253$ metros ou 25,3 centímetros**
- **Intervalo de previsão:**
 $\hat{y} - 0,253 < y < \hat{y} + 0,253 \rightarrow$ Isto é, para um valor de precipitação acumulada qualquer (x_0), estamos 95% certos de que a cota altimétrica encontrada pela equação de regressão, para este Pico, apresenta um erro médio de 25,3 centímetros.

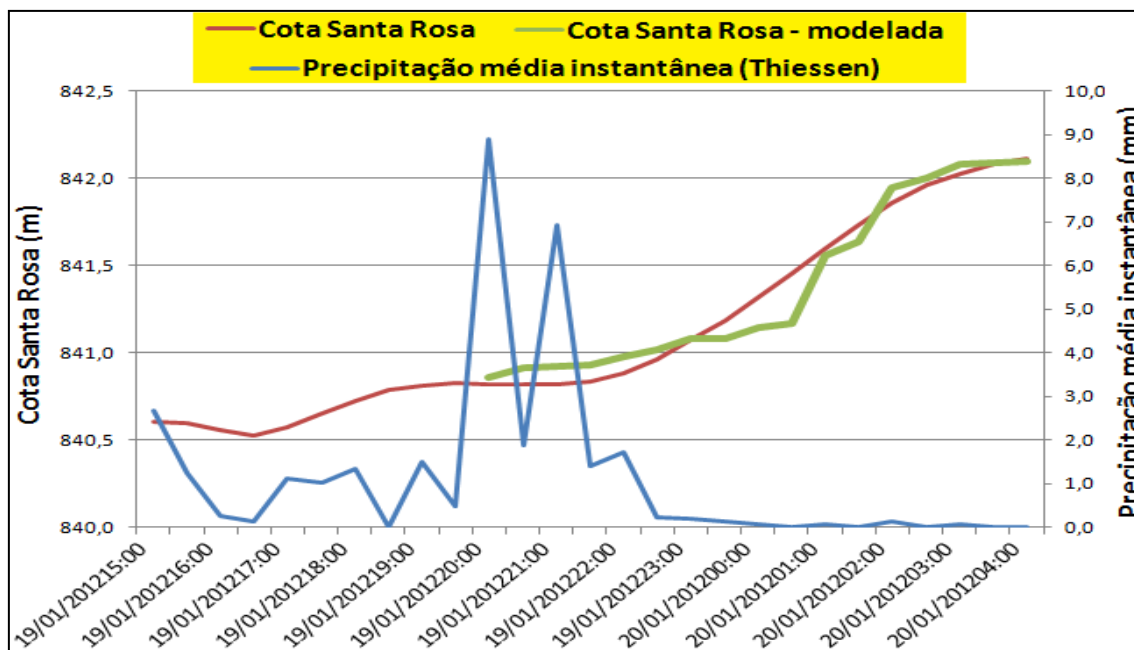
VIII. Gráfico de dispersão

Gráfico 37 - Gráfico de dispersão, equação de regressão e coeficiente de regressão para o Pico 1 (Período 2011/2012)



- IX. Gráfico comparativo – cota real e cota modelada entre a cota santa rosa real e a cota santa rosa modelada pela equação de regressão

Gráfico 38 - Gráfico comparativo entre a cota real na estação Santa Rosa e cota modelada pela equação para o Pico 1



A Tabela 3 apresenta uma visualização completa das principais informações estatísticas para cada Pico de precipitação média acumulada e cota altimétrica levantado, a fim de proceder-se uma análise comparativa entre os mesmos. Adicionou-se a coluna chama de “Limite de Previsão” que exprime os valores máximos e mínimos da série de dados de cada Pico analisado, de modo que toda estatística gerada, inclusive a equação de regressão obtida, só é relevante quando o valor predito está dentro deste intervalo; extrapolações não devem ser realizadas.

Tabela 3 – Compilação dos principais dados estatísticos para cada Pico analisado

Período	Pico	Número de amostras - n	Coefficiente de Correlação - r	Coefficiente de Determinação - r^2	Margem de Erro médio - E_m (cm)	Limite de Previsão (Precip. Acumul. / Cota Altim.)
2009	Pico 1	39	0,9555	0,9131	20,3	1,73 - 14,86 mm
						841,4 - 842,4 m
	Pico 2	24	0,8886	0,7896	31,2	0,15 - 7,29 mm
						841,1 - 842,0m
	Pico 3	45	0,9072	0,8231	88,0	0,07 - 31,91mm
						841,4 - 844,3 m
	Pico 4	26	0,8674	0,7525	42,0	2,16 - 10,61 mm
						841,1 - 842,2 m
2009/ 2010	Pico 1	60	0,9824	0,9650	31,2	0 - 36,6 mm
						841,3 - 844,3 m
	Pico 2	40	0,9122	0,8321	33,7	0 - 12,43 mm
						841,2 - 842,4 m
	Pico 3	34	0,9783	0,9572	25,9	2,22 - 20,27 mm
						841,5 - 843,2 m
	Pico 4	44	0,9452	0,8935	14,8	0 - 12,72 mm
						840,7 - 841,9 m
2011/ 2012	Pico 1	39	0,9760	0,9526	25,3	2,68 - 30,94 mm
						840,8 - 842,2 m

A partir da tabela apresentada, pode-se observar que os Picos com menores valores de erros médios não coincidem com os Picos com maiores correlações. Este fato pode ser explicado devido a diferente variabilidade entre os dados de cada Pico, uma vez que cada Pico apresenta um cenário de precipitações e cotas altimétricas mais ou menos variáveis entre si, ou seja, um Pico por si só não pode representar todo o comportamento hidrológico em eventos extremos de inundações; entretanto, vários Picos podem exprimir melhor a heterogeneidade da série de dados. Sendo assim, quanto maior o número de Picos, ou amostras, mais representatividade ter-se-á.

Dentre todas as nove equações obtidas para cada um dos nove picos de precipitação acumulada e cota altimétrica, elaborou-se a Tabela 4 abaixo, que classifica quantitativamente cada pico (consequentemente sua equação) segundo os critérios estatísticos calculados. Para cada critério, atribuiu-se um valor de 1 a 9 para melhor ou pior cenário, somadas as pontuações têm-se um ranking das equações. A equação (modelo) com menor pontuação é aquela com melhor representatividade.

Tabela 4 – Classificação dos picos segundo os critérios estatísticos analisados

Classificação	Número de amostras - n	Coefficiente de Correlação - r	Coefficiente de Determinação - r^2	Margem de Erro médio - E_m (cm)
1	Pico 1 2009/2010	Pico 1 2009/2010	Pico 1 2009/2010	Pico 4 2009/2010
2	Pico 3 2009	Pico 3 2009/2010	Pico 3 2009/2010	Pico 1 2009
3	Pico 4 2009/2010	Pico 1 2011/2012	Pico 1 2011/2012	Pico 1 2011/2012
4	Pico 2 2009/2010	Pico 1 2009	Pico 1 2009	Pico 3 2009/2010
5	Pico 1 2011/2012 ou Pico 1 2009	Pico 4 2009/2010	Pico 4 2009/2010	Pico 1 2009/2010 ou Pico 2 2009
6	Pico 3 2009/2010	Pico 2 2009/2010	Pico 2 2009/2010	Pico 2 2009/2010
7	Pico 4 2009	Pico 3 2009	Pico 3 2009	Pico 4 2009
8	Pico 2 2009	Pico 2 2009	Pico 2 2009	Pico 3 2009
9		Pico 4 2009	Pico 4 2009	

A Tabela 5 abaixo apresenta a classificação final das equações de cada pico obtido e conclui que a equação referente ao pico 1 de 2009/2010 ($y = 0,0877x + 841,28$) é aquela que melhor atende todos os parâmetros estatísticos e portanto tem melhor representatividade.

Tabela 5 – Pontuação final e classificação quantitativa da melhor equação de regressão de cada pico analisado

Pico	Pontuação Final	Limite de Previsão (Precip. Acumul. / Cota Altim.)
Pico 1 2009	15	1,73 -14,86 mm
		841,4 - 842,4 m
Pico 2 2009	29	0,15 - 7,29 mm
		841,1- 842,0m
Pico 3 2009	25	0,07 - 31,91mm
		841,4 - 844,3 m
Pico 4 2009	32	2,16 - 10,61 mm
		841,1 - 842,2 m
Pico 1 2009/2010	8	0 - 36,6 mm
		841,3 - 844,3 m
Pico 2 2009/2010	22	0 - 12,43 mm
		841,2 - 842,4 m
Pico 3 2009/2010	14	2,22 - 20,27 mm
		841,5 - 843,2 m
Pico 4 2009/2010	14	0 - 12,72 mm
		840,7 -841,9 m
Pico 1 2011/2012	14	2,68 - 30,94 mm
		840,8 - 842,2 m

Vale ressaltar que, além dos parâmetros estatísticos apontarem a equação referente ao pico 1 2009/2010 (período da última grande cheia) como sendo a mais adequada, os limites de previsão de precipitação acumulada e cota altimétrica também estão entre os maiores de todos os picos analisados, corroborando a aplicabilidade e confiabilidade da equação modelada para este pico.

4.5) Conclusões

- A etapa inicial do estudo que contempla a compilação dos dados de precipitação e cota altimétrica se mostrou extremamente trabalhosa e criteriosa. Foram verificadas descontinuidades nos dados que, se não tratadas, podem comprometer os resultados finais. Verifica-se que a qualidade no registro e na leitura dos dados das estações de medição é um quesito imprescindível em todo o desenvolvimento do trabalho, sendo importante também na economia de tempo no tratamento dos mesmos. A organização e filtragem minuciosa dos dados se mostrou uma etapa essencial em todo o estudo e ressaltou a importância da consistência dos dados;
- A obtenção da precipitação média na bacia pelo método de Thiessen forneceu informações relevantes que podem ser extrapoladas a este estudo. Pela conformação dos polígonos delimitados pôde-se verificar que as estações de monitoramento estão dispostas de forma a reproduzir com qualidade a variabilidade na precipitação média na bacia. Entretanto, o aumento do número de estações pluviométricas na bacia pode trazer melhor qualidade nas previsões de curto prazo em toda região. Vale ressaltar que, o uso da precipitação média elimina variações individuais, o que pode mascarar os resultados obtidos. Portanto, a aplicabilidade dos resultados obtidos neste estudo deve levar em conta a limitação de precisão dos modelos gerados a partir de precipitações médias. O uso da precipitação média teve como objetivo compilar os efeitos dos diversos aportes de precipitação na cota altimétrica do Rio Sapucaí, este efeito de elevação no nível do rio só é significativo (salvo raras exceções) quando ocorrem grandes volumes de precipitação na bacia como um todo. Grandes volumes de chuva em estações isoladas tem baixo poder de gerar Picos extremos de cota altimétrica;
- A localização dos Picos de precipitação média acumulada e respectiva resposta na cota do Rio Sapucaí na estação Santa Rosa demandou extremo critério. De forma geral, o tempo de resposta do Pico de precipitação média acumulada na cota altimétrica variou entre 6 e 10

horas aproximadamente, e a identificação exata destes tempos de resposta influenciou diretamente na quantificação do coeficiente de correlação linear e equação de regressão. Pode-se observar que volumes de precipitação maiores em determinados pontos da bacia influem de forma diferente no tempo de resposta na cota altimétrica na estação Santa Rosa;

- A elaboração de um modelo de previsão de cotas altimétricas do Rio Sapucaí com base nos dados de precipitação média acumulada na bacia apresentou resultados significativos e aplicáveis. De forma geral, dentre os nove Picos analisados, o coeficiente de correlação obtido foi classificado como *forte a muito forte* e todas as equações de regressão foram consideradas significativas mediante aos testes de hipóteses, a margem de erro médio para o intervalo de previsão foi de, no máximo, 88cm. Os gráficos comparativos entre as cotas altimétricas modeladas e as cotas altimétricas reais mostram que o modelo reproduz com qualidade o que ocorre em eventos de precipitação severos. Vale ressaltar que, apesar da confiabilidade estatística dos dados de correlação e regressão de cada pico, os dados de entrada (precipitação acumulada) e as cotas altimétricas previstas pelo modelo devem obedecer aos limites de previsão determinados pelos próprios dados amostrais (Picos). Esta ressalva, juntamente com a aplicação de precipitações médias, se configura como a principal limitação do modelo de previsão estabelecido neste trabalho.
- Dentre os nove picos avaliados e suas respectivas equações, o pico 1 identificado no período de 2009/2010 e sua equação de regressão foi apontada como a mais adequada para utilização na previsão do nível do Rio Sapucaí na estação Santo Rosa. Além dos parâmetros estatísticos validarem a representatividade da equação, seus limites de previsão tornam a aplicabilidade do modelo efetiva. Abaixo a equação (modelo de previsão) obtida:

Cota na Santa Rosa = 0,0877*Precipitação média acumulada + 841,28

4.6) Perspectivas futuras

O uso do coeficiente de correlação e da equação de regressão para o estudo da relação entre precipitação e cota altimétrica (vazão) se mostrou consistente e aplicável. A simplicidade e robustez do método estatístico evita grandes ajustes ao modelo de previsão em si, podendo-se focar esforços na qualidade de registro e coleta de dados necessários.

Frente às conclusões obtidas, próximos estudos podem avaliar a influência individual de cada estação de monitoramento na cota altimétrica do rio Sapucaí na estação Santa Rosa. A aplicação de outra ferramenta estatística, correlação parcial, pode inferir com precisão o efeito individual de cada estação pluviometria no nível final do rio Sapucaí. Esta metodologia pode ser comparada com o uso de precipitações médias e avaliar possíveis melhorias.

5) Referências

- ANDRADE, J. P. M. Previsão hidrometeorológica visando sistema de alerta antecipado de cheias em bacias urbanas. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- BACK, A. J. Relações entre precipitações intensas de diferentes durações ocorridas no município de Urussanga, SC. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande-PB, v.13, n.2, p. 170-175, set. 2009.
- BARBOSA, A. A. et. al. (org.) (2000). Relatório da Comissão de Avaliação Técnica para Recuperação e Urbanização das Margens do Rio Sapucaí e seus Afluentes da Área Urbana. Unifei. 61 p.
- BROUWER, R., VAN EK, R. Integrated ecological, economic and social impact assessment of alternative flood control policies in the Netherlands.

Ecological Economics, Lelystad, The Netherlands, v. 50, 2004. Disponível em www.sciencedirect.com. Acesso em: 08 de dezembro de 2010.

BOTH, G. C. Uso da modelagem matemática para a previsão de enchentes no Bale do Taquari – RS. In: Simpósio de Engenharia Ambiental, 7., 2008, Serra Negra. Anais...ASBEA, 2008.

CANDIDO, D. H. Inundações no município de Santa Bárbara d'Oeste, SP: condicionantes e impactos. 2007. 260 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

CASTILHO, A.S.; DAVIS, E.G.; Previsão Hidrológica de Vazões para as Cidades de Resplendor, Colatina e Linhares Utilizando o Método das Diferenças. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15., 2003, Curitiba. Anais... ABRH, 2003.

CASTILHO, A. S., OLIVEIRA, L. M. Previsão hidrológica de vazões para a cidade de Governador Valadares utilizando Modelo Linear de Propagação. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14., 1999, Aracaju. Anais... Aracaju: ABRH, 1999.

GOMIG, K., LINDNER E. A., KOBIYAMA, M. Áreas de influência das estações pluviométricas na bacia rio do Peixe/SC pelo método de polígonos de Thiessen utilizando imagem de satélite e SIG. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13., 2007, Florianópolis. Anais. Florianópolis: INPE, 2007. p. 3373-3380.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.
Disponível em www.ibge.gov.br. Acesso em: 08 de abril de 2011.

LIRA, S. A. Análise da correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações. 2004. 196 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

MANUSTHIPAROM, C., APIRUMANEKUL C., MAHAXAY M. Flood forecasting and river monitoring system in the Mekong river basin. In: SOUTHEAST ASIA WATER FORUM, 2., 2005, Bali. Flood Forecasting and River Monitoring System in the Mekong River Basin. Bali: SOUTHEAST ASIA WATER FORUM, 2006. 9 p.

MATOS, A. J. S. Análise numérica da transladação de ondas de cheia em canais naturais – um trecho do Rio Sapucaí/MG. 2007. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

MAURO, N., PINTO. E. J. A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552 p.

MENDES, H. C., MARCO, G., ANDRADE, J. P. M., SOUZA, S. A., MACEDO, R.F. Reflexões sobre impactos das inundações e propostas de políticas públicas mitigadoras. 2004. 63 f. Revisão Bibliográfica – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

MONI SILVA, A. P. Elaboração de manchas de inundação para o município de Itajubá, utilizando SIG. 2006. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

NAGHETTINI, M.,PINTO, E. J. A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p.

PINHEIRO, V. M. Avaliação técnica e histórica das enchentes em Itajubá – MG. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ: Diagnóstico e Prognóstico. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí. Belo Horizonte. 2010.

RIGUETTO, A. M. Hidrologia e Recursos Hídricos. 1. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo, 1998. 840p.

SANTOS, L. L. Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife-PE, v.2, n.3, p. 01-19, set./dez. 2009.

SANTOS, C. A C., BRITO, J. I. B., RAO, T. V. R., MENEZES, H. E. A. Tendências dos índices de precipitação no estado do Ceará. Revista Brasileira de Meteorologia, Campina Grande-PB, v.24, n.1, p. 39-47, mar. 2009.

TRIOLA, M. F. Introdução à Estatística. 9. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2005. 656 p.

TUCCI, C. E. M., COLLISCHONN, W. (2002). Previsão de Vazão em Curto Prazo com Base na Precipitação: Modelos Conceituais. ONS.

TUCCI, C.E.M.. Hidrologia: ciência e aplicação. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS / ABRH, 2002. 943 p.

TUCCI, C.E.M.. Modelos Hidrológicos. X. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS / ABRH, 1998. 652p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ. Estudo de Impacto Ambiental. Implantação do Sistema Integrado de Contenção de Enchentes Contemplando os Diques 1, 2, 3, 4 e 5. Itajubá, 2010.

VIANNA, A P. P. Utilização de modelagens hidrológicas e hidráulicas associadas a um Sistema de Informações Geográficas para mapeamento de áreas inundáveis. Estudo de caso: Município de Itajubá – MG. 2000. 107 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2000.

VILELA, S.M.; MATTOS A. Hidrologia Aplicada. São Paulo. McGraw-Hill do Brasil, Ltda., 1975. 245 p.

WANIELISTA, M.; KERSTEN, R.; EAGLIN, R. Hidrology: Water Quantify and Quality Control. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997. 567 p.

ANEXO A - Tabela de Distribuição t

TABELA A-3 Distribuição t: Valores Críticos t					
Graus de Liberdade	Área em Uma Cauda				
	0,005	0,01	0,025	0,05	0,10
Graus de Liberdade	Área em Duas Caudas				
	0,01	0,02	0,05	0,10	0,20
1	63,657	31,821	12,706	6,314	3,078
2	9,925	6,965	4,303	2,920	1,886
3	5,841	4,541	3,182	2,353	1,638
4	4,604	3,747	2,776	2,132	1,533
5	4,032	3,365	2,571	2,015	1,476
6	3,707	3,143	2,447	1,943	1,440
7	3,499	2,998	2,365	1,895	1,415
8	3,355	2,896	2,306	1,860	1,397
9	3,250	2,821	2,262	1,833	1,383
10	3,169	2,764	2,228	1,812	1,372
11	3,106	2,718	2,201	1,796	1,363
12	3,055	2,681	2,179	1,782	1,356
13	3,012	2,650	2,160	1,771	1,350
14	2,977	2,624	2,145	1,761	1,345
15	2,947	2,602	2,131	1,753	1,341
16	2,921	2,583	2,120	1,746	1,337
17	2,898	2,567	2,110	1,740	1,333
18	2,878	2,552	2,101	1,734	1,330
19	2,861	2,539	2,093	1,729	1,328
20	2,845	2,528	2,086	1,725	1,325
21	2,831	2,518	2,080	1,721	1,323
22	2,819	2,508	2,074	1,717	1,321
23	2,807	2,500	2,069	1,714	1,319
24	2,797	2,492	2,064	1,711	1,318
25	2,787	2,485	2,060	1,708	1,316
26	2,779	2,479	2,056	1,706	1,315
27	2,771	2,473	2,052	1,703	1,314
28	2,763	2,467	2,048	1,701	1,313
29	2,756	2,462	2,045	1,699	1,311
30	2,750	2,457	2,042	1,697	1,310
31	2,744	2,453	2,040	1,696	1,309
32	2,738	2,449	2,037	1,694	1,309
34	2,728	2,441	2,032	1,691	1,307
36	2,719	2,434	2,028	1,688	1,306
38	2,712	2,429	2,024	1,686	1,304
40	2,704	2,423	2,021	1,684	1,303
45	2,690	2,412	2,014	1,679	1,301
50	2,678	2,403	2,009	1,676	1,299
55	2,668	2,396	2,004	1,673	1,297
60	2,660	2,390	2,000	1,671	1,296
65	2,654	2,385	1,997	1,669	1,295
70	2,648	2,381	1,994	1,667	1,294
75	2,643	2,377	1,992	1,665	1,293
80	2,639	2,374	1,990	1,664	1,292
90	2,632	2,368	1,987	1,662	1,291
100	2,626	2,364	1,984	1,660	1,290
200	2,601	2,345	1,972	1,653	1,286
300	2,592	2,339	1,968	1,650	1,284
400	2,588	2,336	1,966	1,649	1,284
500	2,586	2,334	1,965	1,648	1,283
750	2,582	2,331	1,963	1,647	1,283
1000	2,581	2,330	1,962	1,646	1,282
2000	2,578	2,328	1,961	1,646	1,282
Grande	2,576	2,326	1,960	1,645	1,282

ANEXO B – Valores críticos de r_c

TABELA A.6		Valores Críticos do Coeficiente de Correlação de Pearson r	
n	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,01$	
4	0,950	0,999	
5	0,878	0,959	
6	0,811	0,917	
7	0,754	0,875	
8	0,707	0,834	
9	0,666	0,798	
10	0,632	0,765	
11	0,602	0,735	
12	0,576	0,708	
13	0,553	0,684	
14	0,532	0,661	
15	0,514	0,641	
16	0,497	0,623	
17	0,482	0,606	
18	0,468	0,590	
19	0,456	0,575	
20	0,444	0,561	
25	0,396	0,505	
30	0,361	0,463	
35	0,335	0,430	
40	0,312	0,402	
45	0,294	0,378	
50	0,279	0,361	
60	0,254	0,330	
70	0,236	0,305	
80	0,220	0,286	
90	0,207	0,269	
100	0,196	0,256	

NOTA: Para testar $H_0: \rho = 0$ versus $H_1: \rho \neq 0$, rejeite H_0 se o valor absoluto de r for maior que o valor crítico na tabela.