

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
EM ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE

FERNANDO DUARTE BARBALHO

**MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DO FATOR DE REDUÇÃO DE ÁREA EM
BACIAS URBANAS**

Fernando Duarte Barbalho
Orientador: Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga

Goiânia

2012

FERNANDO DUARTE BARBALHO

**MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DO FATOR DE REDUÇÃO DE ÁREA EM
BACIAS URBANAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga

Goiânia

2012

FERNANDO DUARTE BARBALHO

**MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DO FATOR DE REDUÇÃO DE ÁREA EM
BACIAS URBANAS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Dissertação defendida e aprovada em 18 de junho de 2012, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga
Presidente da Banca - UFG

Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares
Examinador interno - UFG

Prof. Dr. Mauro da Cunha Naghettini
Examinador externo - UFG

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço àquelas pessoas que tiveram o papel fundamental na minha formação e educação como ser humano, como estudante e como profissional: meu pai, Elson Alves Costa; minha mãe, Ana Ceres de Souza Freitas; e o meu Orientador, em toda vida acadêmica, Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga; cada um por sua participação fundamental em todo este processo, em que este trabalho é apenas uma das etapas. A eles dedico esta vitória e também apresento meus pedidos de desculpas pelas eventuais falhas cometidas no percurso.

À minha família e aos amigos, que me apoiaram cada um de sua maneira. Uns por crerem demais, outros por me ajudarem a duvidar, outros ainda por me criticar. Em especial, àqueles que melhor conheci no decorrer da pesquisa e que me inspiraram e incentivaram com palavras, ações e exemplos, questionamentos, brincadeiras e sonhos. À minha namorada, noiva e esposa, Karla Adriana Vieira Barbosa, que sempre me ajudou, admirou e mesmo sem saber, não deixou que as dificuldades de cada etapa me vencessem.

Aos professores e professoras com os quais a vida me presenteou, em especial àqueles que, ao menos, se esforçaram em me ensinar a questionar, duvidar e criticar. Aos amigos Eduardo e Mariana, cuja ajuda e empenho nos trabalhos de campo foram fundamentais nesta pesquisa. Ao amigo Marcus Vinícius, pelo exemplo acadêmico, cuja dedicação e desenvolvimento sempre me inspiraram.

Especialmente, agradeço a Deus, que por toda minha vida me conduziu, me inspirou, me educou e me proporcionou esta experiência.

E por último, e não menos importante, ao Povo Brasileiro, cujo apoio técnico e financeiro, por meio de diversas instituições, foi indispensável na minha pesquisa e formação, bem como no desenvolvimento da ciência em nosso País, especialmente aqui, personificado na Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás e no CNPq.

"[...] Como todos partilhamos este pequeno planeta Terra, temos que aprender a viver em harmonia e em paz uns com os outros e com a natureza. Isso não é um sonho, mas uma necessidade."

Dalai Lama, 1989

RESUMO

BARBALHO, F. D. **Método para a determinação do fator de redução de área em bacias urbanas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, 2012.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método empírico para determinação do fator de redução de área - FRA - em bacias urbanas, coeficiente empregado na estimativa de chuvas de projeto médias a partir de chuvas de projeto pontuais. Após uma revisão sobre o tema na literatura existente, foi verificada a necessidade do desenvolvimento de estudos regionais e a existência de lacunas nas atuais abordagens sobre o tema. Neste sentido, buscou-se elaborar uma metodologia adequada à variabilidade espacial dos eventos extremos usuais em bacias urbanas. Assim sendo a nova metodologia sugerida, diferentemente do observado nas demais técnicas, se baseia fundamentalmente na avaliação objetiva da razão entre as chuvas extremas calculadas sobre diversas áreas e as chuvas extremas observadas nos postos centrais à estas áreas. Após sua estruturação, o modelo proposto foi testado em uma implementação piloto com dados de uma rede pluviográfica recém instalada na região da Bacia do Córrego Botafogo, zona urbana de Goiânia. Os resultados obtidos da aplicação direta da metodologia foram então analisados quanto à dependência do FRA em relação às variáveis área, duração e período de retorno. Dos testes realizados, foi possível identificar uma forte dependência do comportamento estatístico dos resultados em relação à variação da área, uma dependência em relação à duração e a necessidade de estudos mais elaborados em relação ao período de retorno. Por fim, os valores de FRA obtidos após ajustes dos resultados foram comparados com os valores indicados por métodos empíricos mais difundidos. Dos estudos, conclui-se que a metodologia proposta é adequada para a obtenção do FRA, bem como seus resultados são compatíveis com os pressupostos pré-estabelecidos. Há no entanto a necessidade de novos estudos, com maior quantidade de dados, para a obtenção de resultados aplicáveis na prática.

Palavras-chave: Chuva de projeto, espacialização da precipitação, fator de redução de área.

ABSTRACT

BARBALHO, F. D. **Method for determining the areal reduction factor in urban basins.** 2012. Dissertation (Masters of Environmental Engineering) – Civil Engineering College, Post-Graduation Stricto Sensu Program in Environmental Engineering, Federal University of Goiás, Goiânia, Goiás, Brazil, 2012.

The main objective of this work was to develop an empirical areal reduction factor - ARF - determination method for urban basins, which is a coefficient applied to average rainfall estimates for projects, given rainfall at a point. After a review about the subject, it was verified the needs of developing regional studies and the existence of some deficiencies on current approaches. In this sense, it was tried to create an appropriate methodology given the spatial variability of extreme rainfall on urban basins. Therefore, the new suggested method, differently from the observed in others techniques, is primarily based on objective assessment of the ratio between extreme average rainfall calculated above several areas and the extreme point rainfall observed in gauges located in the center of those areas. After structuring it, the proposed method was tested in a pilot implementation with data obtained from a new rain gauge network in the region of *Córrego Botafogo* Basin's, urban zone of *Goiânia*. The results were analyzed as to the dependence of ARF to area, duration and exceedance probability. It was found a strong relation with area, a minor with duration and the need of further studies about the exceedance probability influence. Lastly, the ARF values obtained with results fitting were compared with those indicated from other employed empirical models. From this study, it can be concluded that proposed methodology is appropriated to determine ARF, as its results are compatibles with assumptions established. However, new studies are needed, with a greater amounts of data, to obtain practical results.

Keywords: Project rainfall, rainfall spatial distribution, areal reduction factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Representação esquemática da superposição de superfícies cônicas para formação da superfície de precipitação.	19
Figura 4.1 - Ilustração da localização dos eventos pontuais e médios considerados no cálculo de F_{ij} em um posto genérico na bacia.	23
Figura 4.2 - Sequência de passos para obtenção dos valores M_{ij}	24
Figura 4.3 - Fluxograma da implementação piloto do método.	26
Figura 4.4 - Delimitação (amarelo) da Bacia do Córrego Botafogo (azul) com exutório na foz (vermelho). Imagem obtida por meio do <i>software Google Earth</i> . Coordenada:UTM 22K, 686410,06 m L 8153473,95 m S, Altitude do ponto de visão: 21,60 km, Data: 06/03/2009.	28
Figura 4.5 - Pluviógrafos instalados: Pluv-01 (A), Pluv-02 (B), Pluv-03 (C), Pluv-04 (D), Pluv-05(E), Pluv-06 (F), Pluv-07 (G), Pluv-08 (H), Pluv-09 (I), Pluv-10 (J) (continua).	29
Figura 5.1 - Valores dos Índices de Erro obtidos pelos métodos para cada cenário: SC-01 (a); SC-02 (b); e SC-03 (c).	38
Figura 5.2 - Superfícies de precipitação calculadas pelo MQ, MIQD e MT (da esquerda para direita) para o evento H no cenário de referência. Observa-se semelhança entre MQ e MIQD.	40
Figura 5.3 - Gráfico <i>boxplot</i> dos resultados em função do raio.	47
Figura 5.4 - Gráfico <i>boxplot</i> dos resultados em função da duração.	47
Figura 5.5 - Gráfico <i>boxplot</i> dos resultados em função da ordem (período de retorno).	47
Figura 5.6 - Curvas do FRA - $d = 05$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).	60
Figura 5.7 - Curvas do FRA - $d = 10$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).	61
Figura 5.8 - Curvas do FRA - $d = 15$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).	62
Figura 5.9 - Curvas do FRA - $d = 30$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).	63
Figura 5.10 - Curvas do FRA - $d = 45$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).	64
Figura 5.11 - Curvas do FRA - $d = 60$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).	65
Figura 5.12 - Curvas do FRA - $d = 90$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).	66
Figura 5.13 - Curvas do FRA - $d = 120$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).	67
Figura 5.14 - Superfícies do FRA: duração em minutos (d) e área (A) em km^2 - ordens 1 (a), 2 (b) e 3 (c).	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Pluviógrafos instalados: identificação (ID) e coordenadas geográficas.	27
Tabela 4.2 - Falhas nos registros pluviográficos. São apresentados o minuto inicial e final de cada falha, considerando todo o registro empregado nos estudos.	30
Tabela 4.3 - Eventos para comparação. Os eventos de máxima chuva média sobre a bacia foram estimados usando-se a média simples entre os dados dos oito pluviógrafos. A coluna "Tempo Inicial" indica o minuto inicial desta série para cada evento.	32
Tabela 4.4 - Pluviógrafos empregados em cada cenário. Os "X" indicamos pluviógrafos empregados em cada cenário.	32
Tabela 4.5 - Detalhamento dos testes estatísticos realizados.	36
Tabela 5.1 - Precipitação média (mm) sobre a bacia estimada por cada método: a. MQ; b. MIQD e c. MT; em cada cenário, indicando o erro relativo ao cenário de referência e o valor do índice de erro (<i>IE</i>), que considera o erro frente a disponibilidade de dados do cenário. As últimas três linhas apontam o valor médio do erro, seu valor máximo e o desvio padrão.	39
Tabela 5.2 - Comparação do MQ em relação ao MIQD pelo método de pontuação proposto.	41
Tabela 5.3 - Comparação do MIQD em relação ao MQ pelo método de pontuação proposto.	42
Tabela 5.4 - Precipitação pontual extrema observada nos três postos de referência.	43
Tabela 5.5 - Precipitação média extrema observada nas áreas circulares ao redor de Pluv-03.	43
Tabela 5.6 - Precipitação média extrema observada nas áreas circulares ao redor de Pluv-07.	44
Tabela 5.7 - Precipitação média extrema observada nas áreas circulares ao redor de Pluv-10.	44
Tabela 5.8 - Resultados de <i>Fij</i> obtidos no posto Pluv-03.	45
Tabela 5.9 - Resultados de <i>Fij</i> obtidos no posto Pluv-07.	45

Tabela 5.10 - Resultados de <i>Fij</i> obtidos no posto Pluv-10.	46
Tabela 5.11 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário A1.	49
Tabela 5.12 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário A1.	50
Tabela 5.13 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário A2.	51
Tabela 5.14 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário A2.	51
Tabela 5.15 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário B1.	52
Tabela 5.16 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário B1.	52
Tabela 5.17 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário B2.	52
Tabela 5.18 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário B2.	52
Tabela 5.19 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário C1.	53
Tabela 5.20 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário C1.	53
Tabela 5.21 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário C2.	53
Tabela 5.22 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário C2.	54
Tabela 5.23 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário D1.	54
Tabela 5.24 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário D1.	54

Tabela 5.25 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário D2.....	55
Tabela 5.26 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário D2.	55
Tabela 5.27 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas apenas em pela ordem conforme linha e coluna indicada - Cenário E.....	56
Tabela 5.28 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas pela ordem conforme linha e coluna indicada - Cenário E.	56
Tabela 5.29 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas pela duração e ordem conforme linha e coluna indicada - Cenário F.	57
Tabela 5.30 - Valores médios de F_{ij} empregados no ajuste de curvas FRA.	59
Tabela 5.31 - Comparativo com os valores de FRA sugeridos por diversas metodologias. ...	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes; modelo proposto pelo DNIT
FRA	Fator de redução de Área
KRIG	Método de Kriging
MIQD	Método do inverso do quadrado das distâncias
MQ	Método multiquadric
MT	Método de Thiessen
NERC	<i>National Environment Research Council</i>
Pluv	Pluviógrafo
REF	Cenário de referência
SC	Cenário
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UK	<i>United Kingdom; modelo proposto em UK pelo NERC</i>
USWB	<i>United States Wather Bureau; modelo proposto pelo USWB</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A, a	Área
d	Duração
F	Razão M/R
FRA	Fator de redução de área
H	Hipótese
i, j, m	Índice numérico
IE	Índice de Erro
c, k, w	Coeficientes
L, l	Distância
M	Precipitação média máxima sobre uma área
n	Número de anos
N	Número de Postos
p	Valor da estatística p -valor, usado em teste de hipóteses
$\bar{P}$	Precipitação média
P	Precipitação pontual
q	Constantte
r	Raio
R	Precipitação pontual máxima
R'	Precipitação pontual no dia de uma máxima sobre uma área
R^2	Coeficiente de determinação
Tr	Período de retorno
α	Significância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	3
2	OBJETIVOS.....	5
3	REVISÃO DE LITERATURA	6
3.1	CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS PARA CÁLCULO DO FRA	7
3.1.1	Modelos Empíricos.....	7
3.1.1.1	Método do USWB.....	7
3.1.1.2	Método UK.....	8
3.1.1.3	Método de Bell.....	9
3.1.1.4	Método da Máxima-Anual Centrada (annual-maxima centered approach) ...	10
3.1.1.5	Metodologia proposta pelo DNIT	11
3.1.2	Modelos Analíticos.....	11
3.1.3	Modelos Empírico-analíticos	12
3.1.4	Considerações.....	13
3.2	MODELOS DE CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA SOBRE UMA ÁREA	14
3.2.1	Generalidades	15
3.2.2	O Método de Thiessen - MT	16
3.2.3	O Método do Inverso do Quadrado das Distâncias - MIQD.....	17
3.2.4	O Método Multiquadric - MQ.....	18
3.2.5	O Método Kriging - KRIG	20
3.2.6	Considerações.....	21
4	MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1	PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA CÁLCULO DO FRA.....	22
4.2	IMPLEMENTAÇÃO PILOTO	25
4.2.1	Área de Estudos e Coleta de Dados.....	27
4.2.2	Seleção do Método para cálculo da Chuva Média	31

4.2.3	Definição do Intervalo de Áreas e Seleção dos Postos	33
4.2.4	Aplicação do método proposto, análises e ajuste de equações.....	34
4.2.5	Comparação dos resultados obtidos para o FRA com valores da literatura	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	DA SELEÇÃO DO MÉTODO DE CÁLCULO DA CHUVA MÉDIA	38
5.2	RESULTADOS DO MODELO PROPOSTO.....	43
5.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	49
5.3.1	Cenários A1 e A2	49
5.3.2	Cenários B1, B2, C1, C2, D1 e D2.....	51
5.3.3	Cenários E e F	56
5.4	AJUSTE DAS CURVAS PARA DETERMINAÇÃO DO FRA	58
5.5	COMPARAÇÃO COM VALORES DA LITERATURA PARA O FRA	69
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	71
7	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Quando da elaboração dos estudos hidrológicos de uma determinada região, havendo interesse na determinação de vazões críticas provenientes de eventos extremos, a chamada chuva de projeto é elemento indispensável. A chuva de projeto é o evento de precipitação esperado para um determinado tempo de recorrência e duração (ASQUITH; FAMIGLIETTI, 2000) e sua estimativa, muitas vezes, é feita com base em registros de precipitação observados pontualmente.

Sendo as observações feitas pontualmente, para que as análises sejam mais próximas da realidade de uma bacia hidrográfica, é necessária uma ferramenta para transformação destas informações pontuais em valores espaciais (RODRIGUEZ-ITURBE; MEJÍA, 1974). A transformação de uma chuva de projeto pontual para uma chuva de projeto média sobre uma área, com mesmo tempo de recorrência e duração, pode ser feita empregando-se um coeficiente de correção, também chamado fator de redução de área – FRA (SRIKANTHAN, 1995). No Brasil, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT, indica o emprego do FRA para a distribuição de chuvas em área com até 5.000 km² (BRASIL, 2005).

A determinação do FRA está intimamente ligada às séries de dados observadas e a metodologia empregada. Também os mecanismos de formação das tormentas de uma dada região são fatores a serem considerados na aplicação de um FRA desenvolvido em um local diferente (SVENSSON; JONES, 2010). Tendo em vista estes fatores, o emprego do FRA com segurança deve ser precedido de estudos que avaliem as condições locais de precipitação, buscando também verificar a compatibilidade dos valores a serem empregados com os encontrados na literatura.

Quando do estudo da espacialização de dados pontuais da chuva sobre uma área, é indispensável que se faça uma avaliação do comportamento espacial da precipitação na região de interesse, bem como da influência deste sobre os modelos que venham a ser empregados posteriormente, a fim de que sejam reduzidas as incertezas envolvidas. No contexto de bacias urbanas, usualmente pequenas, essa análise se torna bem significativa (ANDRÉASSIAN *et al.*, 2001). Neste sentido, o emprego de metodologias mais acuradas para avaliação de precipitações extremas, bem como uso de parâmetros calibrados regionalmente, contribui para o desenvolvimento de projetos mais econômicos e seguros no âmbito do gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente os referentes à drenagem urbana e controle de cheias.

Contudo, na cidade de Goiânia, bem como nas demais cidades do Centro-Oeste, não existem estudos regionais específicos para determinação desses coeficientes, visto que de modo geral, no Brasil, também não existem dados em quantidade suficiente ou uma rede de estações pluviográficas em operação, satisfatoriamente densa o bastante para estimar o comportamento espaço-temporal das tormentas em regiões urbanas.

Diante deste contexto e da inexistência de um consenso quanto à técnica ideal para ser empregada no cálculo do FRA, esta pesquisa se destina à composição de uma metodologia voltada para bacias urbanas, em especial às da cidade de Goiânia, adequada à realidade climatológica regional e à aplicação em estudos de Drenagem Urbana. --removi--

2 OBJETIVOS

É objetivo geral deste estudo propor uma metodologia de cálculo para o fator de redução de área em função da área, da duração e do período de retorno, aplicável em bacias urbanas na região do Centro-Oeste Brasileiro, baseada na relação local entre posto e área. Por sua vez, são objetivos específicos deste estudo:

- Instalar uma rede de pluviógrafos a ser empregada neste trabalho e futuramente, na coleta de dados pluviográficos da região de Goiânia;
- Definir o método de cálculo da precipitação média de uma área que será empregado no cálculo do fator de redução de área;
- Realizar uma comparação entre os resultados obtidos e ajustados com valores indicados por outros métodos empíricos citados na literatura.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A chuva é a principal entrada de água em uma bacia capaz de gerar escoamento e a sua quantificação é fundamental em estudos de disponibilidade hídrica bem como de drenagem urbana (TUCCI, 2004). Assim sendo, a determinação da chuva média sobre uma área é indispensável na modelagem hidrológica (PEGRAM; PEGRAM, 1993), e torna-se mais criteriosa quando se consideram menores intervalos de tempo na discretização dos fenômenos hidrológicos.

A maior disponibilidade geográfica e temporal de dados relativos à precipitação é encontrada na forma de medições pontuais. Neste contexto, uma série de ferramentas foram e continuam sendo desenvolvidas e aplicadas com objetivo de estimar a precipitação média em uma área a partir de medidas pontuais, tais como: o Método de Thiessen (THIESSEN, 1911), o Método do Inverso do Quadrado das Distâncias (WEI; MCGUINNES, 1973), o Multiquadric (HARDY, 1971) e o Método de Kriging (MATHERON, 1971).

No entanto, a estimativa de uma chuva de projeto sobre uma área considerando simplesmente a espacialização de todos os eventos extremos pontualmente estimados como se os mesmos fossem ocorrer simultaneamente, pode ser considerada uma maneira conservadora e provavelmente superestimaria a tormenta (OMOLAYO, 1993). Nesse contexto, o FRA é um coeficiente que transforma uma altura de precipitação extrema em um dado ponto, em uma correspondente altura média considerando uma área de influência, ambas as precipitações tendo o mesmo tempo de recorrência esperado (SRIKANTHAN, 1995).

No Brasil, merecem destaque os estudos desenvolvidos por Silveira (2001) e Santos e Naghettini (2003) conquanto ao tema, bem como as análises apresentadas nos mesmos. O primeiro realizou uma aplicação prática de dois modelos teóricos, os desenvolvidos por Rodriguez-Iturbe e Mejía (1974) e por Lebel e Laborde (1988), na bacia do Dilúvio em Porto Alegre. O segundo estudo citado trata também de uma aplicação prática, desta vez do modelo proposto por Sivalapan e Blöschl (1998), sobre a Região Metropolitana de Belo Horizonte, realizando uma integração do FRA à curva i-d-f local. Apesar dos resultados obtidos para o FRA naquelas localidades e da opção por modelos analíticos, feita por ambos, tais trabalhos evidenciam, em primeiro lugar, a necessidade de estudos locais para obtenção de curvas do FRA e a importância dos mesmos como ferramentas na prática de dimensionamento de estruturas de drenagem, e em segundo, a diversidade de técnicas.

A literatura usualmente divide os FRA em dois tipos: os baseados em uma área fixa e os baseados no centro dos eventos de tempestade (BELL, 1976; OMOLAYO, 1993;

SIVAPALAN, BLÖSCHL, 1998; ASQUITH; FAMIGLIETTI, 2000; SVENSSON; JONES, 2010). Os primeiros são baseados em observações dentro de uma área fixa, como uma bacia hidrográfica, enquanto os últimos estão ligados às áreas cobertas por cada evento pluvial. Asquith e Famiglietti (2000) notaram que o emprego deste último tipo de FRA tem sido pouco observado, devido às dificuldades de implementação nos casos de eventos com múltiplos centros, sendo mais aplicados quando há interesse na determinação da precipitação máxima provável (SVENSSON; JONES, 2010).

Svensson e Jones (2010) citam vários fatores que influenciam o cálculo do FRA baseados em uma extensa revisão sobre o assunto: as características das precipitações; as características relacionadas à bacia hidrográfica e os fatores relacionados com os dados e métodos. De fato, os métodos usados na determinação do FRA diferem consideravelmente em suas bases conceituais e formas de cálculo. Os autores abordaram indícios levantados em outros estudos quanto à possibilidade do FRA variar também com o tempo de recorrência, além de sua esperada variação com a área e duração.

Quanto ao modelo, as técnicas empregadas na determinação do FRA podem ser classificadas em empíricas, analíticas e empírico-analíticas (SRIKANTHAN, 1995). Adiante serão sucintamente abordadas algumas destas técnicas.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS PARA CÁLCULO DO FRA

3.1.1 Modelos Empíricos

3.1.1.1 Método do USWB

Apresentado pelo USWB ¹ (1957a, 1957b, *apud* SRIKANTHAN, 1995), empregando dados de redes com área de cobertura entre 250 km² e 1000 km², e em sua maioria do lado Leste do Rio Mississippi, o método se resume ao seguinte:

$$FRA = N \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N w_i R'_{ij}}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^N R_{ij}}$$

¹ U. S. Weather Bureau, 1957a. Rainfall intensity-frequency regime, 1, The Ohio Valley, Tech. Paper 29, U.S. Dept. of Commerce, Washington D. C.

U. S. Weather Bureau, 1957b. Rainfall intensity-frequency regime, 2, Southeastern United States, Tech. Paper 29, U.S. Dept. of Commerce, Washington D. C.

(3.1)

em que w_i é o coeficiente de ponderação obtido pelo Método de Thiessen; R_{ij} é a chuva pontual máxima, para a duração escolhida, no posto i , ano j ; R'_{ij} é a chuva no posto i no dia da máxima precipitação sobre a área de interesse no ano j ; N é o número de postos e n o número de anos. Assim sendo o numerador representa a soma das máximas precipitações médias sobre uma área ao longo dos anos da série, para uma determinada duração escolhida, enquanto o denominador representa uma soma dos valores máximos observados nos postos para a mesma duração.

É provavelmente o método mais empregado nos Estados Unidos da América (ALLEN; DEGAETENO, 2005). Apesar de intuitivo é uma técnica trabalhosa e assume que não há efeito significativo do tempo de recorrência dos dados usados na determinação do FRA (SVENSSON; JONES, 2010).

3.1.1.2 Método UK

Apresentado por NERC² (1975, *apud* SRIKANTHAN, 1995), o método procura identificar as chuvas pontuais observadas simultâneas à máxima precipitação média estimada para a bacia, obtida a partir da média simples. Estes valores são comparados com o valor máximo de precipitação pontual medido em cada estação para cada ano. O FRA é estimado a partir da média dessas razões calculadas. Considerando a mesma notação anterior, tem-se então que:

$$FRA = \frac{1}{nN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (R'_{ij}/R_{ij}) \quad (3.2)$$

Segundo Svensson e Jones (2010), o método também não considera a influência do período de retorno e assume que uma média entre os quocientes pode se aproximar satisfatoriamente do quociente entre médias. Conforme demonstrado por Srikanthan (1995), os valores obtidos

² Natural Environment Research Council, 1975. Floods studies report. Volume 2, Institute of hydrology, Wallingford, UK.

no estudo originário, quando comparados com os resultados do USWB, são ligeiramente maiores, ou seja, mais conservadores.

3.1.1.3 Método de Bell

O modelo proposto por Bell (1976) consiste de uma revisão do método empregado no Reino Unido (SVENSON, 2010) e tem a seguinte metodologia para determinação do FRA: as precipitações máximas anuais, de cada posto e as médias sobre a área, são ordenadas; aplicam-se também os coeficientes de ponderação obtidos pelo Método de Thiessen às precipitações pontuais máximas de mesma ordem; o FRA de ordem m é dado por meio da razão entre a precipitação média máxima pela média ponderada das precipitações máximas pontuais, ambas de ordem m :

$$FRA_m = \frac{(\sum_{i=1}^N w_i R'_{ij})_m}{\sum_{i=1}^N w_i R_{im}} \quad (3.3)$$

Neste método, o numerador representa a máxima precipitação média sobre a bacia, para determinada ordem m , ou seja, para um certo tempo de retorno, enquanto o denominador indica uma precipitação média sintética, na qual haveria simultaneidade dos eventos extremos de mesma ordem em todos os postos.

Considerando o FRA independente em relação ao tempo de recorrência, assume-se que o FRA pode ser mais bem estimado pela média de todos os n FRA_m :

$$FRA = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n FRA_m \quad (3.4)$$

Srikanthan (1995) afirma em seu estudo que o Método de Bell parece ser apropriado na determinação empírica de FRA, inclusive recomendando seu emprego.

3.1.1.4 Método da Máxima-Anual Centrada (*annual-maxima centered approach*)

Proposto por Asquith e Famiglietti (2000), esta técnica faz uma avaliação das precipitações pontuais que ocorrem simultaneamente às máximas observadas. O método é apresentado em quatro passos e depois de sua estruturação teórica os autores exemplificaram sua aplicação em três regiões do *Texas*. Sua utilização dispensa a estimativa da precipitação média de forma direta, entretanto necessita de uma grande quantidade de estações (SVENSSON; JONES, 2010). Os quatro passos consistem em:

- a) Para cada precipitação máxima anual observada em cada posto são computadas as razões entre estas e as precipitações concorrentes nos demais postos da rede, sendo também observadas as distâncias entre os postos da rede e o(s) posto(s) da precipitação máxima;
- b) Após escolhido como critério de projeto, um tempo de recorrência a ser empregado, são separadas as razões anteriormente calculadas e as respectivas distâncias que estejam ligadas a precipitações com tempo de recorrência maior ou igual que o de critério;
- c) Faz-se um ajuste de uma função à relação entre as razões calculadas e suas respectivas distâncias. Esta linha determina os valores esperados para a taxa em qualquer distância, sendo necessariamente fixada com valor igual a unidade para uma distância nula;
- d) O *FRA* para o tempo de recorrência definido é então calculado a partir da integração da curva pré-estabelecida, em relação ao eixo das distâncias.

Verifica-se que uma vantagem computacional do método é que este não emprega em sua formulação a chuva média sobre a bacia ou o cálculo direto de coeficientes de correlação espacial. Porém, Svensson e Jones (2010) apontam em sua revisão que, aplicando-se o *FRA* resultante deste modelo, seria questionável se a precipitação média gerada teria o mesmo período de retorno da máxima pontual adotada. Isto se deve ao fato de que o decaimento dos valores de *FRA* assim calculados, em relação ao aumento da área, foi mais expressivo que o observado em outros métodos. Ainda, o emprego do método necessita de uma extensa rede de postos, conforme a área a ser estudada.

3.1.1.5 Metodologia proposta pelo DNIT

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte - DNIT (BRASIL, 2005), apresentou suas considerações sobre a espacialização de dados pontuais para obtenção de chuvas médias. Baseado em estudos realizados pelo USWB, realizou os ajustes que julgou pertinentes e estabeleceu a seguinte equação para aplicação no Brasil, para bacias de até 5.000km²:

$$FRA = \frac{y}{y + \log^2(A/5)} \quad (3.5)$$

$$y = 35 \log(0,7d + 1) \quad (3.6)$$

sendo d a duração escolhida em horas, A a área em km² e y é um coeficiente empírico. Ainda, para áreas menores que 5km², o método aponta $FRA = 1$.

3.1.2 Modelos Analíticos

Neste grupo, verificou-se a existência de diversas técnicas com variados graus de complexidade. Srikanthan (1995) descreve e enquadra quatro metodologias neste grupo, sendo as desenvolvidas por Roche³ (1963, *apud* SRIKANTHAN, 1995), Rodriguez-Iturbe e Mejía (1974), Omolayo (1989) e Meynink e Brady (1993). No mesmo trabalho é apresentada uma análise sobre estas. Svensson e Jones acrescentam ainda o modelo proposto por Sivalapan e Blöschl (1998). O equacionamento desses métodos pode ser verificado detalhadamente também em Srikanthan (1995) e Svensson e Jones (2010).

Os métodos analíticos partem normalmente da análise da estrutura de correlação espacial das precipitações, entretanto assumem algumas simplificações do fenômeno, como a isotropia e o ajuste a certas distribuições estatísticas (SVENSSON; JONES, 2010). Há um certo grau de complexidade no equacionamento dos mesmos que pode dificultar sua implementação prática, sem a garantia de resultados mais confiáveis no entanto.

³ ROCHE, M. Hydrologie de Surface. Paris: Gauthier-Villars, 1963. 430 p.

Roche³ (1963, *apud* SRIKANTHAN, 1995) estabeleceu pioneiramente modelo generalizado com bases teóricas para a transformação da chuva pontual em uma chuva média sobre a área, considerando um campo isotrópico de precipitação. Apesar de trabalhar sobre a correlação entre os postos de uma dada rede, o modelo desconsidera a influência da duração e do período de retorno.

Posteriormente, Rodriguez-Iturbe e Mejía (1974), agregando estacionariedade ao fenômeno, propuseram um método em que a redução do valor pontual para um valor sobre área fosse unicamente dependente de um coeficiente de correlação espacial para uma distância caracterísitca de abrangência. Nesta, a função de correlação é separada em duas componentes, uma espacial e outra temporal, concluindo que o FRA seria derivado da razão entre os desvios padrão entre a chuva média e a chuva pontual em um processo com distribuição Gaussiana. Seguindo tal base teórica, Sivalapan e Blöschl (1998) propuseram uma extensão à essa metodologia, inserindo no processo a busca por uma distribuição original da precipitação espacial, inicialmente adotada como sendo do tipo exponencial.

Por sua vez, Omolayo (1989) assumiu que a altura de precipitação teria uma distribuição no espaço do tipo log-normal, e assim, o FRA seria estimado com base na média dos coeficientes de correlação espacial, agregando também a influência do período de retorno.

Também constam na literatura outros modelos que partem de um desenvolvimento teórico distinto para estimativa do FRA, como os trabalhos de Lebel e Laborde (1988) no campo de análises geoestatísticas, e de Michele *et al.* (2001) e Veneziano e Langousis (2005) considerando um comportamento fractal para desenvolvimento do FRA.

3.1.3 Modelos Empírico-analíticos

Proposto por Myers e Zehr (1980), o Método do *National Weather Service* é atualmente o método padrão para estimativa de FRA nos Estados Unidos da América, sendo baseado em uma análise de frequência das precipitações máximas em pares de estações e na distância entre estas, levando em conta o tempo de recorrência (SVENSSON; JONES, 2010). Asquith e Famiglietti (2000) consideraram o método complexo e computacionalmente intensivo. Além disso, Srikanthan (1995) aponta a necessidade de grande quantidade de dados do método e o fato de que o mesmo assume um ajuste em uma Distribuição de Valores Extremos do Tipo I. Ainda, Svensson e Jones (2010) questionam o uso de métodos complicados quando do aumento da disponibilidade de dados com o tempo.

De fato, o emprego e difusão de uma técnica são limitados pela relação custo-benefício da mesma. Havendo maior disponibilidade de dados, métodos robustos deveriam ser desenvolvidos a fim de compreender os fenômenos e dar suporte à elaboração de métodos mais práticos para os usuários finais e mesmo para os interessados em transpor técnicas às suas realidades, conforme as adaptações necessárias.

3.1.4 Considerações

Apesar de alguns dos métodos empíricos citados para o cálculo do FRA serem amplamente utilizados nos locais de sua origem, não se verificou na literatura a existência de uma técnica consolidada como mais indicada para tanto, nem justificativas consistentes acerca do emprego de uma ou outra metodologia. O único método verificado com alguma adaptação para as condições locais, do DNIT, é por sua vez um ajuste dos estudos do USWB.

Além disso, os métodos empíricos abordados, exceto pelo penúltimo, da máxima anual centrada, são baseados no uso da técnica de Thiessen para cálculo da chuva média e determinação da área de influência dos postos. Apesar de sua larga aplicação, a existência de novas técnicas para determinação da chuva média e inclusive para a espacialização de dados pode permitir resultados mais acurados quando a variabilidade espacial da chuva necessita ser considerada (BARBALHO; FORMIGA; SIQUEIRA, 2011), principalmente em redes pouco densas de monitoramento e para intervalos de duração mais curtos. Por outro lado, o método da máxima anual centrada não emprega avaliação da chuva média em si e necessita de densas redes de medição, o que é um fator restritivo importante para sua aplicação.

No caso dos métodos do USWB, consequentemente, do DNIT e do UK, a relação entre o FRA e o período de retorno é negligenciada, já que os eventos são agrupados, somados e a razão é calculada independente da ordenação dos dados de chuva média e chuva pontual. Outro ponto é que as chuvas pontuais máximas não são ponderadas pela sua área de influência (denominador da equação), os pesos são atribuídos apenas no modelo do USWB, quando do cálculo da chuva média sobre a área (numerador).

Por sua vez, o método de Bell leva em conta a influência que o período de retorno dos eventos avaliados podem ter sobre o FRA, considerando a ordem dos eventos pontuais e médios. A chuva média máxima sobre a bacia é dividida por uma média ponderada das chuvas pontuais máximas. Entretanto, persiste o agrupamento de dados pontuais (no denominador) sem avaliar a simultaneidade entre estes.

Assim, apesar da simplicidade destas técnicas e sua contínua aplicação, é questionável se o agrupamento dos dados tanto para a chuva pontual como para a chuva sobre área, considerando toda a bacia, não distorceria a definição básica do FRA, seja ela: a razão entre a chuva máxima sobre uma área pela máxima sobre um ponto.

O provável motivo para este agrupamento seria o custo computacional de se estimar adequadamente a chuva média sobre áreas de influência diversas para cada posto de observação, considerando os dados de toda ou parte da rede. Observa-se que o método de Thiessen, que é a técnica de ambos os modelos, não é adequado para o cálculo da chuva média em áreas de influência de postos específicos dentro da malha, o que pode ter contribuído para a consideração da rede e bacias como um todo.

Finalmente, e não menos importante, quanto aos métodos empíricos, os mesmos foram desenvolvidos para áreas de aplicação razoavelmente grandes quando comparadas com as dimensões usuais de bacias de drenagem em meio urbano, bem como em uma realidade climatológica diversa da brasileira.

Quanto aos métodos analíticos, a desvantagem destes está no fato que apesar de se basearem em um desenvolvimento teórico analítico, o que implica em maior complexidade na formulação e aplicação, os mesmos partem de simplificações fenomenológicas, como a consideração de comportamento isotrópico das tormentas, sendo possível que haja grande esforço para seu emprego sem garantias reais de resultados mais realísticos.

Portanto, considera-se que há uma lacuna a ser preenchida, com métodos que sejam práticos e fieis ao conceito real do FRA, considerando a relação local entre a chuva observada no posto de medição e a chuva média (calculada) para áreas próximas ao mesmo. Também, é desejável que o mesmo seja adequado a escalas diversas de tempo e espaço, com o emprego de ferramentas mais acuradas na aproximação das chuvas médias, bem como possa permitir a avaliação da influência do período de retorno no FRA.

3.2 MODELOS DE CÁLCULO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA SOBRE UMA ÁREA

As metodologias empíricas para cálculo do FRA usualmente adotam em seus procedimentos outras técnicas para cálculo da chuva média sobre uma área em um dado evento observado ou criado, em geral o Método de Thiessen. Entretanto, atualmente é possível o emprego de técnicas mais robustas para o cálculo da chuva média, permitindo inclusive a estimativa da distribuição espacial da precipitação em dado período.

Assim sendo, como é objetivo deste trabalho, também propor uma nova metodologia de caráter empírico para o cálculo do FRA, faz-se necessário uma avaliação dos métodos de cálculo da chuva média sobre uma área, considerando-se não apenas seus resultados, mas também as vantagens e desvantagens que oferecem devido à sua formulação.

Adiante são brevemente abordados alguns dos métodos usualmente empregados nesta tarefa, com maior enfoque aos métodos a serem empregados nesta pesquisa. Em item específico são apresentados seus respectivos equacionamentos.

3.2.1 Generalidades

Sendo P_i , a precipitação observada em um determinado intervalo de tempo no posto i , de coordenadas (x_i, y_i) , e considerando-se os N postos com dados disponíveis, a precipitação média $\bar{P}$ é encontrada normalmente como:

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^N P_i k_i \quad (3.7)$$

na qual k_i representa o coeficiente de ponderação do posto i , que pode variar ou não com o tempo. Uma forma de aplicação indireta desta ponderação consiste na interpolação de valores conhecidos de forma a estimar a precipitação pontualmente em cada ponto j de um *grid* regular e denso, calculando depois a precipitação média a partir da média aritmética entre todos os G pontos. Desta forma, sendo P_j a precipitação calculada em cada ponto j do *grid* de interesse, a Equação 3.7 pode ser reescrita como:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{j=1}^G P_G}{G} \quad (3.8)$$

em que:

$$P_G = \sum_{i=1}^G P_i \times k_{ij} \quad (3.9)$$

Observa-se então que neste caso, o coeficiente de ponderação k_{ij} varia não somente em função do posto, mas conjuntamente em função da localização do ponto no *grid*.

3.2.2 O Método de Thiessen - MT

Desenvolvido por Thiessen (1911), o MT é um método simples, criado para obtenção da chuva média em grandes áreas. É comumente aplicado (PANIGRAHY *et al.*, 2009) e sua formulação consiste na determinação da média ponderada das medidas obtidas em cada estação por meio de pesos atribuídos aos postos, estes estabelecidos conforme a área de influência que cada um tem dentro da bacia.

O cálculo da precipitação média sobre a bacia é feito a partir da aplicação direta da Equação 3.7. Os coeficientes k_i são determinados da seguinte maneira:

$$k_i = \frac{a_i}{A} \quad (3.10)$$

onde A representa a área total da bacia e a_i diz respeito à área de influencia de cada posto na bacia. A determinação desta área de influência se faz pela contabilização dos pontos que se encontram mais próximo do posto de referência do que dos demais ou graficamente, sendo traçados os polígonos em que cada aresta é dada por um segmento da mediatriz entre um posto e outro. Quando há apenas o interesse no cálculo da chuva média, e posteriormente dos coeficientes, o método pode ser aplicado de maneira mais simples: cada ponto da bacia assume o valor de precipitação igual ao do posto que lhe estiver mais próximo, sendo obtido o valor de precipitação de cada ponto, é feita uma média entre todos os pontos.

O método pode ser aplicado manualmente sobre desenhos em escala, no entanto é de grande interesse o uso de computadores, principalmente quando a quantidade de postos é grande. Diskin (1969, 1970) aplicou o método de Monte Carlo para a determinação destes coeficientes de ponderação em computadores. Atualmente busca-se a otimização de técnicas para a determinação destes pesos computacionalmente, visando melhorar a precisão na determinação destas áreas. De fato, quando mais próximo ao contorno da bacia, o cálculo da área de influência de cada posto é mais complexo. Panihagry *et al.* (2009) demonstrou que

neste sentido a aplicação da técnica de vetores, um modelo analítico, tem bons resultados na determinação dos coeficientes frente à irregularidade das bordas.

O MT é um bom método quando se dispõe de uma rede razoavelmente densa na bacia, pois em casos onde há poucos dados disponíveis os erros podem ser consideráveis. No entanto, segundo Damant *et al.* (1983), deve existir um cuidado quanto ao tipo de precipitação que se deseja analisar, já que em precipitações convectivas, a variabilidade temporal do evento é alta e portanto os intervalos de medições devem ser compatíveis. Assim para emprego de pluviômetros resultados mais seguros são encontrados para series mensais e anuais. Ainda, podem ser verificadas variedades do método em Singh (1988).

3.2.3 O Método do Inverso do Quadrado das Distâncias - MIQD

Wei e McGuinness (1973) propuseram o Método do Inverso do Quadrado das Distâncias -*Reciprocal distance squared method* - para determinação da chuva média sobre uma área. O mesmo pode ser considerado uma dentre as técnicas de interpolação baseadas na ponderação pelo inverso do quadrado da distância. É um modelo largamente empregado em diversos estudos relacionados à precipitação média (BALASCIO, 2001), também citando entre outros os de Caruso e Quarta (1998), Dirks *et al.* (1998) e Nicks (1982). Este método admite que a precipitação para qualquer ponto (x, y) de uma bacia pode ser determinada a partir dos N valores observados nos postos pluviométricos vizinhos, sendo o seu valor inversamente proporcional ao quadrado distância do mesmo às diversas estações.

Este método, assume que a precipitação para qualquer ponto (x, y) de uma bacia pode ser determinada a partir dos n valores observados nos postos pluviométricos, sendo o seu valor inversamente proporcional à distância do mesmo às diversas outras estações.

Para o cálculo da precipitação com esta técnica é preciso impor um sistema de coordenadas de modo que toda a bacia hidrográfica fique localizada no primeiro quadrante do mesmo. Sendo assim, o total precipitado em um ponto, $P(x, y)$, será igual a:

$$P(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_i}{L_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{L_i^2}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}} \quad (3.11)$$

em que p_i é o total precipitado no posto i , e L é a distância euclidiana entre o posto i e o ponto (x, y) .

Após o cálculo das precipitações pontuais é possível estimar a superfície de precipitação sobre a região apenas marcando-se os resultados em forma de gráfico e também realizar o cálculo da precipitação média a partir da aplicação da Equação 3.8.

3.2.4 O Método Multiquadric - MQ

A aplicação de superfícies quádricas para interpolação de dados pontuais foi desenvolvida inicialmente por Hardy (1971) para aplicação em ciências geofísicas. Posteriormente, Shaw e Lynn (1972) aplicaram a técnica para ajuste de superfícies com dados de precipitação, apontando a mesma como uma boa alternativa.

De forma geral, admite-se que a superfície formada pela precipitação pode ser encontrada pela superposição de diversas superfícies quádricas individuais com origem nos distintos pontos de observação. Essas superfícies individuais podem ser de natureza parabólica (Equação 3.12) ou hiperbólica (Equação 3.13):

$$P(x, y) = \sum_j^N c_j \left[(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 \right] \quad (3.12)$$

$$P(x, y) = \sum_j^N c_j \left[(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + q^2 \right]^{1/2} \quad (3.13)$$

nas quais c_j representam os coeficientes de ponderação de cada estação. No caso particular das superfícies hiperbólicas, com $q = 0$, as mesmas representam cones, e este será o modelo empregado neste trabalho, já que têm um ajuste mais suave e uma implementação mais simples (LEE; LYNN; SHAW, 1974). Este aspecto é importante ao se considerar que nos casos práticos, podem haver necessidade de algumas extrapolações ou mesmo a existência de “vazios” na área interna da rede de monitoramento.

Os valores dos coeficientes de ponderação de cada posto podem ser encontrados pela solução de um sistema, empregando-se os dados conhecidos. Como os demais métodos

de interpolação, a existência de uma quantidade de postos significativa próximos aos limites da bacia permite uma melhor interpolação interna (BALASCIO, 2001). A configuração simplificada do problema torna-se:

$$\underline{L}\underline{c} = \underline{P} \quad (3.14)$$

onde $\underline{c}$ representa um vetor com N coeficientes de ponderação, $\underline{z}$ é o vetor composto pelos N valores observados em questão e $\underline{L} = \{l_{ij}\}$ é uma matriz $N \times N$ das seguintes equações:

$$l_{ij} = \left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right]^{1/2} \quad (3.15)$$

No caso da opção pelas equações cônicas, observa-se que essa matriz é simétrica em torno da diagonal principal e que seus valores dependem unicamente da posição dos postos empregados. Pode também ser usado um número maior de pontos observados no ajuste dos coeficientes. Em decorrência, o sistema terá mais equações do que incógnitas e deverá ser resolvido por meio de técnicas numéricas. A figura 3.1 ilustra o conceito empregado pelo modelo de forma simplificada:

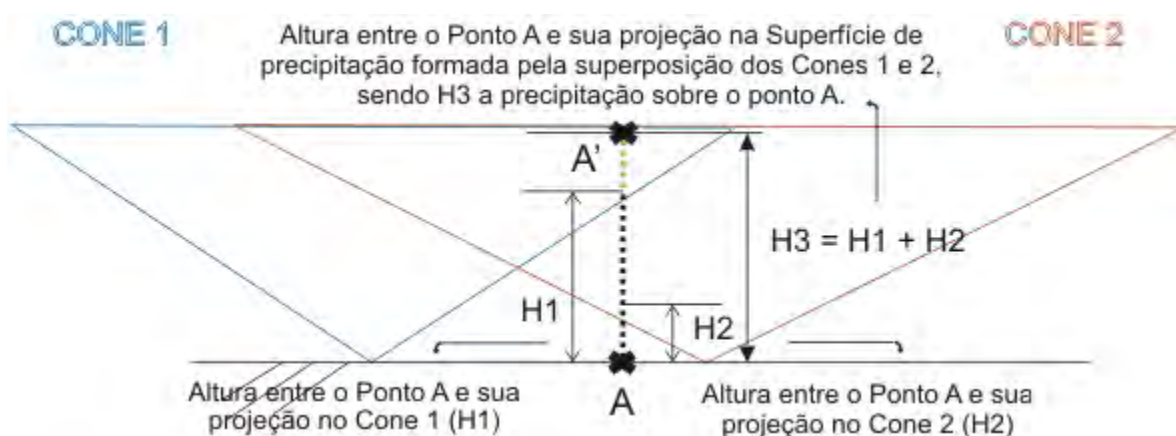


Figura 3.1 - Representação esquemática da superposição de superfícies cônicas para formação da superfície de precipitação.

Borga e Vizzaccaro (1997) estabeleceram uma equivalência formal entre o MQ e o Método de Kriging. Syed *et al.* (2003), ao compararem a técnica com o Método de Kriging, optaram pelo uso do MQ pela maior praticidade com resultados semelhantes.

Balascio (2001) ainda apresentou uma maneira de reduzir os erros de tendência do MQ. Ele aponta que um dos problemas genéricos dos métodos de ajuste de superfície é ajustar uma superfície horizontal, em especial no caso das equações cônicas com altura inicial nula, pode ocorrer em algumas regiões que o MQ calcule valores menores que zero para a chuva, efeito melhor observado quando as alturas de precipitação observadas são baixas. Entretanto, esta variante não foi aplicada neste trabalho até o momento.

Uma característica observada no MQ é que a determinação da precipitação em um ponto da bacia é função de todos os postos de observação empregados, isso pode contribuir para a minimização dos efeitos de erros locais de medição na determinação da precipitação média.

3.2.5 O Método Kriging - KRIG

Baseado no conceito de variáveis regionalizadas desenvolvido por Matheron (1971), o Método de Kriging, ou krigagem, consiste do conjunto de técnicas para estimativa de superfícies por meio da modelagem da estrutura da correlação espacial das variáveis em questão (CAMARGO; DRUCKS; CÂMARA, 2004). A interpolação por meio da krigagem assume que existe um padrão em larga escala no fenômeno, um padrão local e uma aleatoriedade local. Ademais, a técnica é considerada o melhor estimador linear por não apresentar tendências (DUBRULET, 1984).

A precipitação em um determinado ponto dentro da região de interesse é admitida como sendo resultado da combinação linear das observações existentes. A determinação do coeficiente de ponderação de cada dado observado é obtida pelo ajuste de um modelo de variograma. Parte-se dos dados existentes e sua posição para o cálculo das correlações entre os mesmo. Em seguida, é feito um ajuste em cima dos resultados obtidos.

O KRIG também é uma técnica de ajuste de superfícies e, portanto, o cálculo da altura precipitada corresponde aos valores observados nos pontos conhecidos. Por meio de sua formulação, também é possível verificar o erro que se comete (CAMARGO; DRUCKS; CÂMARA, 2004). Entretanto o método apresenta a dificuldade da escolha do modelo de variograma a ser adotado (SINGH, 1988).

3.2.6 Considerações

De forma geral, todos os métodos apresentados constituem variações de cálculo pela média ponderada, quando da avaliação da chuva média. Entretanto, somente MQ e KRIG consideram todas as observações envolvidas na determinação dos coeficientes de ponderação, sendo então criados a partir de uma análise conjunta de todas as medições em determinado tempo.

Já no MT e MIQD, a estimativa da chuva em qualquer ponto da bacia é obtida de forma direta em função da proximidade dos postos de observação. No caso do MT, aliás, o valor é assumido como igual ao do posto mais próximo. Quanto ao MIQD, todos os postos são considerados, mas apenas em função de suas distâncias, de forma que o fenômeno não é considerado com um todo, o que permitiria uma incorporação da variabilidade espacial do mesmo, como no caso do MQ e do KRIG.

Apesar da semelhança entre MQ e o KRIG, com variograma linear como demonstrado por Borga e Vizzaccaro (1997), o método de KRIG é muito mais complexo e robusto em sua formulação, exigindo um estudo particular dos modelos de variogramas para aplicação na região de estudo, conforme o fenômeno. Já o MQ, possui aplicação mais simplificada.

Entretanto, é bem verdade que não há como se apontar qual das técnicas possui melhor valor de estimativa, de forma direta. Quando da aplicação, é necessário avaliar a complexidade de aplicação e implementação, a possibilidade de espacialização, a diluição de erros pontuais de medidas, o realismo da superfície gerada, e o desempenho frente à disponibilidade de dados.

Neste sentido, considera-se que o MIQD e MQ são os melhores candidatos para aplicação mais prática e direta. No entanto, não é possível desconsiderar o uso do MT, devido sua larga aplicação, simplicidade e resultados bem satisfatórios.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA CÁLCULO DO FRA

O modelo empírico para determinação do FRA aqui proposto, tem por objetivo a aplicação deste coeficiente em bacias urbanas, em especial com clima e condições de monitoramento semelhantes ao encontrado na cidade de Goiânia, capital de Goiás. Foram consideradas as seguintes premissas:

- Para uma dada região climatologicamente homogênea, espera-se que exista um padrão com razoável margem de confiança na relação entre a chuva pontual e a chuva média, inclusive no caso de eventos extremos. Assim, o FRA pode ser estimado empregando-se resultados da razão entre a chuva média máxima pela chuva pontual máxima, ambas de mesmo período de retorno, calculados em diversos pontos da bacia;
- O comportamento do FRA varia com o tamanho da área (A), com a duração (d) considerada e pode ser influenciado pelo período de retorno (Tr) dos eventos observados, e assim $FRA = f(A, d, Tr)$;
- A escala espacial de aplicação do FRA deve ser compatível com a variabilidade espacial dos eventos extremos de interesse na região;
- Para bacias urbanas, devido à escala espacial, e não havendo especificidades geográficas ou topográficas, é razoável considerar que a distribuição espacial da chuva seja aleatória e, conseqüentemente, a distribuição de máximos tende à homogeneidade ao longo do tempo, permitindo o agrupamento de análises locais.

Desta forma, considerando R_i a precipitação máxima observada em um dado posto i de uma rede de monitoramento e M_{ij} a precipitação média estimada para uma área circular j no entorno daquele ponto, ambas com mesma duração e período de retorno, o valor de F_{ij} pode ser definido como:

$$F_{ij} = M_{ij}/R_i \quad (4.1)$$

A Figura 4.1 ilustra o aspecto local inerente ao cálculo de F_{ij} :

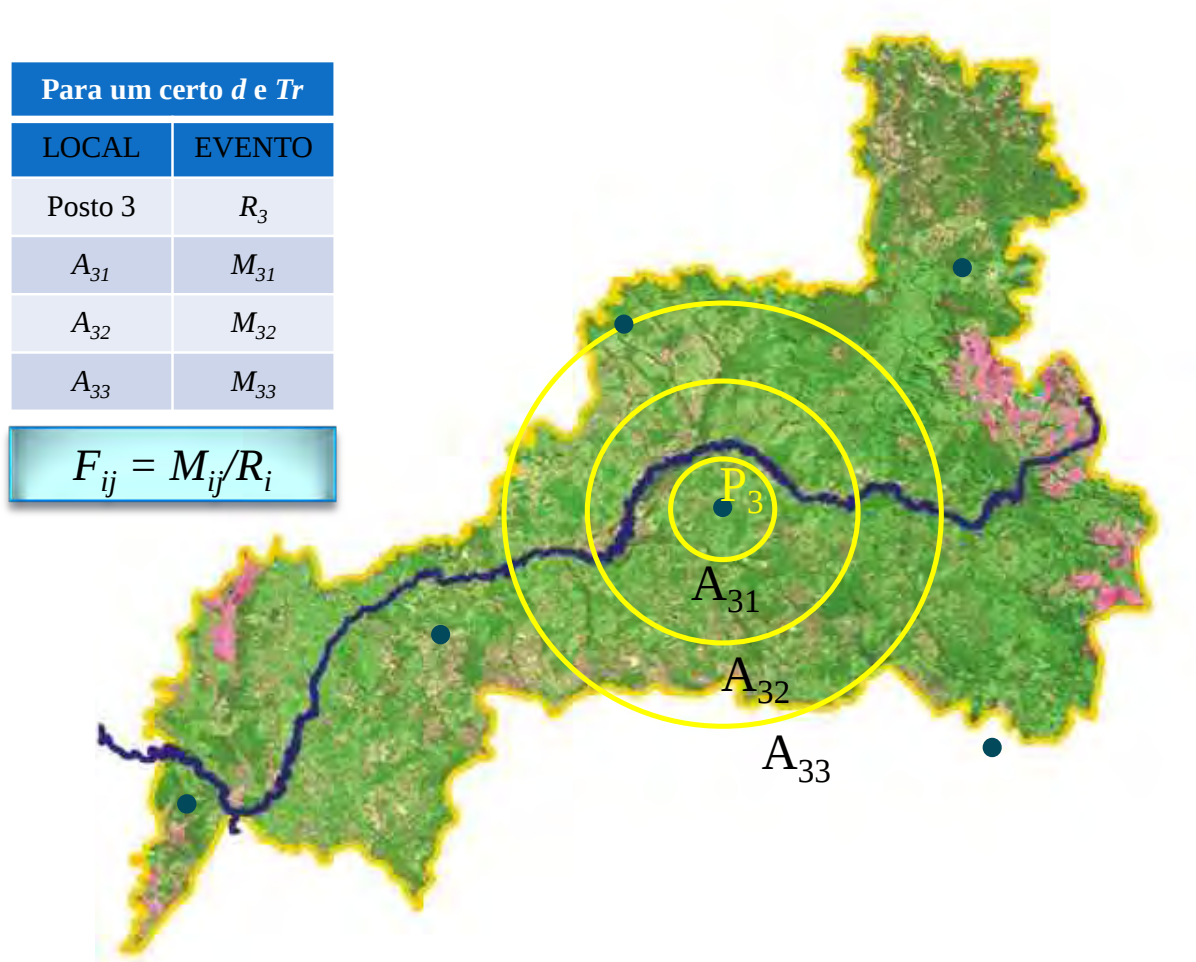


Figura 4.1 - Ilustração da localização dos eventos pontuais e médios considerados no cálculo de F_{ij} em um posto genérico na bacia.

Considerando um comportamento não tendencioso na distribuição de tormentas sobre uma dada bacia urbana, cuja rede de monitoramento é adequada à dimensão da mesma, havendo N pontos de monitoramento, é possível realizar uma análise estatística de F em função de diversos tamanhos de área (A), considerando que cada ponto i fornece um elemento amostral. Desta forma, para uma duração (d) e tempo de retorno (Tr) escolhidos, é possível ajustar uma curva $F = f(A, d, Tr)$, que é a própria curva para determinação do FRA .

Neste ponto, deve se observar que a obtenção dos N valores R_i é realizada através da identificação dos eventos máximos efetivamente medidos, de ordem m compatível com o período de retorno de estudo, feita em séries históricas de mesma amplitude e discretização temporal, adequada à duração de interesse.

Quanto à estimativa de M_{ij} , observa-se a seguinte sequência de passos ilustrada a seguir (Figura 4.2):

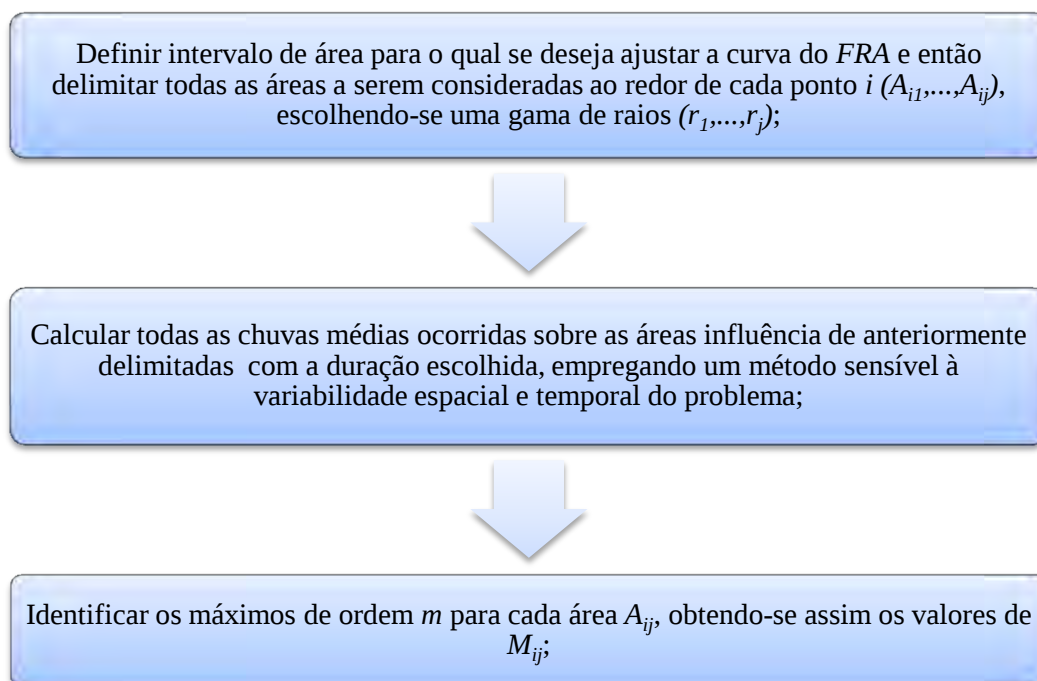


Figura 4.2 - Sequência de passos para obtenção dos valores M_{ij} .

Ainda, devem ser salientados os seguintes aspectos e cuidados:

- Os dados empregados no cálculo das chuvas médias devem ser simultâneos, gerando assim uma série de precipitação média para cada área delimitada;
- O valor da razão F_{ij} é calculado apenas de forma local, ou seja, a razão é feita apenas entre os valores médios no entorno de um ponto e o valor daquele ponto de referência;

Sumariamente, o método proposto constitui no cálculo das razões entre as chuvas médias máximas sobre áreas circulares em torno de diversos postos pela chuva pontual máxima observada nos mesmos, considerando uma dada duração e período de retorno, para posterior avaliação e aplicação de análises estatísticas e regressão a fim de estabelecer uma equação para o FRA correspondente.

Como observado, o ajuste inicial é feito fixando-se a duração e o período de retorno, de forma que a curva inicial é função apenas da área. Generalizando-se, é possível o ajuste de uma superfície em função da área e da duração, dado período de retorno.

Do método proposto se destacam as seguintes distinções em relação aos demais modelos empíricos:

- O FRA é baseado em uma regressão de diversas razões entre as chuvas máximas médias e as chuvas pontuais máximas (de mesmo período de retorno e duração) calculadas posto a posto, considerando ainda apenas as áreas centradas em cada posto;
- A chuva média é estimada por técnicas sensíveis à variabilidade espacial das chuvas.

Acredita-se que essa diferença possa agregar uma maior fidelidade ao conceito e emprego do FRA. Como o FRA é aplicado à chuva máxima pontual estimada para um pluviógrafo em uma dada região, é razoável considerar que seu valor seja estimado a partir de um ajuste aos valores dessa razão observados em várias estações com comportamento climatológico semelhante. No caso dos modelos propostos pelo USWB (1957) e Bell (1976), o que ocorre na prática é um agrupamento dos dados realizado anteriormente a qualquer avaliação. É provável que para os locais em que foi desenvolvido, essa inversão de fases não tenha impacto significativo, mas para o caso de bacias urbanas na região de estudo, dada as suas escalas usuais e considerando a variabilidade espacial dos eventos extremos característicos, é provável que não seja adequada.

Por outro lado, o uso de amostras resultantes da análise localizada de cada posto na região de interesse e suas respectivas áreas de influência, permite inclusive uma avaliação estatística que pode conduzir também a uma análise de riscos, além de se adequar à variabilidade espacial de eventos extremos na escala proposta, não se restringindo a ela.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO PILOTO

Para testes e avaliação do modelo proposto, o mesmo foi aplicado com os dados de uma rede de pluviógrafos instalada na região da Bacia do Córrego Botafogo, área urbanizada da cidade de Goiânia, Goiás. O intuito desta aplicação piloto foi de verificar os aspectos operacionais do método e a adequação do mesmo ao objetivo proposto, seja este o cálculo do FRA para bacias de dimensões como as verificadas nas regiões urbanas, bem como comparar os resultados de caráter preliminar aos valores propostos na literatura. Assim sendo, foi necessário executar adicionalmente as etapas apresentados na Figura 4.3, adiante.

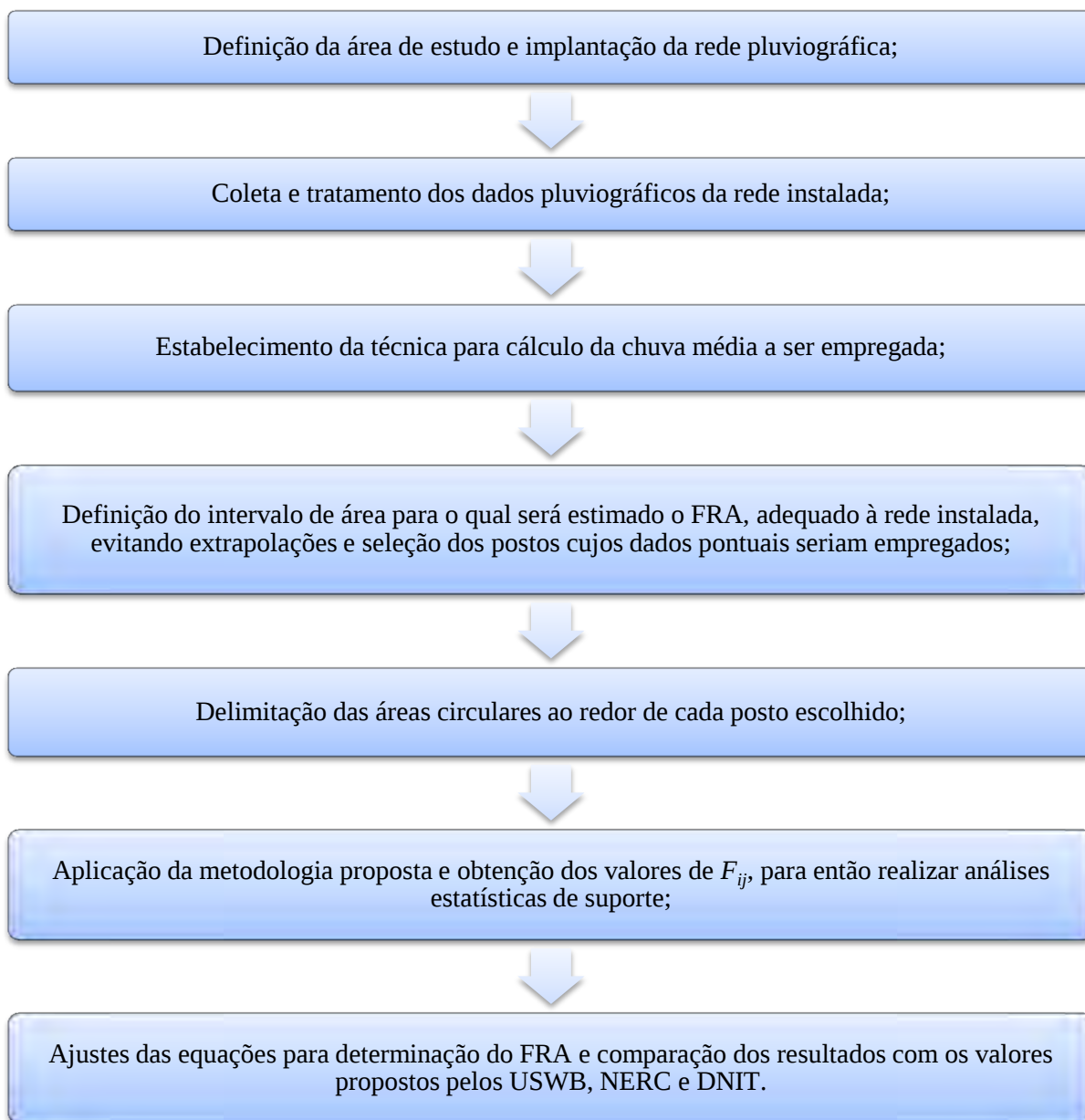


Figura 4.3 - Fluxograma da implementação piloto do método.

Entretanto, por se tratar de uma aplicação de teste e avaliação, usando apenas dados obtidos em uma rede nova, algumas ressalvas relevantes devem ser mencionadas, cujas implicações serão melhor abordadas na seção de resultados e discussões: o período de observação, curto para qualquer aplicação com vistas a resultados práticos e confiáveis, que limita as conclusões e análises; a instalação e operação da rede que, na fase inicial que se encontrava quando da elaboração desta pesquisa, apresentou dificuldades inerentes e problemas de falhas nos registros.

4.2.1 Área de Estudos e Coleta de Dados

Como área de estudos, foi escolhida a região da Bacia do Córrego Botafogo, que se encontra dentro da zona urbana de Goiânia. A bacia é componente do sistema de macro-drenagem da cidade e recebe contribuição de várias regiões, nascendo ao sul da cidade, cruzando a região central pela parte leste da capital chegando então à sua foz no Córrego Anicuns, que por sua vez deságua no Rio Meia Ponte. A bacia foi delimitada considerando o exutório na foz, com auxílio de *software* de geoprocessamento, usando a carta SE-22-X-B dos dados de radar obtidos pelo projeto SRTM (MIRANDA, 2011), apresentando área de 32,2 km² (Figura 4.4), comprimento de rio principal igual a 10,7 km, comprimento aproximado de 10,1 km e declividade do rio de cerca de 0,0163 m/m.

No início dos estudos, foram instalados dez pluviógrafos do modelo RG3-M, marca *Onset*. A instalação de todos os equipamentos foi finalizada no início de 2011. Entretanto, no início de dezembro de 2011, a estação Pluv-08 foi danificada, restando portanto nove aparelhos atualmente. Os equipamentos instalados realizam armazenamento, em registro digital próprio, do horário de ocorrência de uma precipitação de 0,2 mm de chuva, com precisão de um segundo.

Os pontos de instalação contemplam, em sua maioria, locais públicos. A Tabela 4.1 apresenta a locação da rede, levantada com uso de aparelho receptor GPS, que também pode ser espacialmente visualizada na Figura 4.4:

Tabela 4.1 - Pluviógrafos instalados: identificação (ID) e coordenadas geográficas.

ID	Longitude	Latitude	Localização
Pluv-01	-49° 14' 40,44"	-16° 39' 23,45"	Escola 13 de Maio
Pluv-02	-49° 16' 03,05"	-16° 38' 58,42"	Colégio Integração
Pluv-03	-49° 15' 43,99"	-16° 40' 40,87"	Escola Prof. José Carlos de Almeida
Pluv-04	-49° 17' 12,07"	-16° 41' 07,20"	Colégio Bandeirantes
Pluv-05	-49° 16' 21,64"	-16° 44' 29,27"	Colégio Dep. José Alves de Assis
Pluv-06	-49° 15' 29,75"	-16° 42' 49,25"	Colégio Pedro Xavier Teixeira
Pluv-07	-49° 15' 23,71"	-16° 41' 09,94"	Colégio Emmanuel
Pluv-08	-49° 13' 38,66"	-16° 42' 40,20"	Centro Cultural Oscar Niemeyer
Pluv-09	-49° 13' 31,42"	-16° 43' 44,24"	UEG - Aparecida de Goiânia
Pluv-10	-49° 14' 30,36"	-16° 40' 37,77"	Escola de Engenharia Civil – UFG

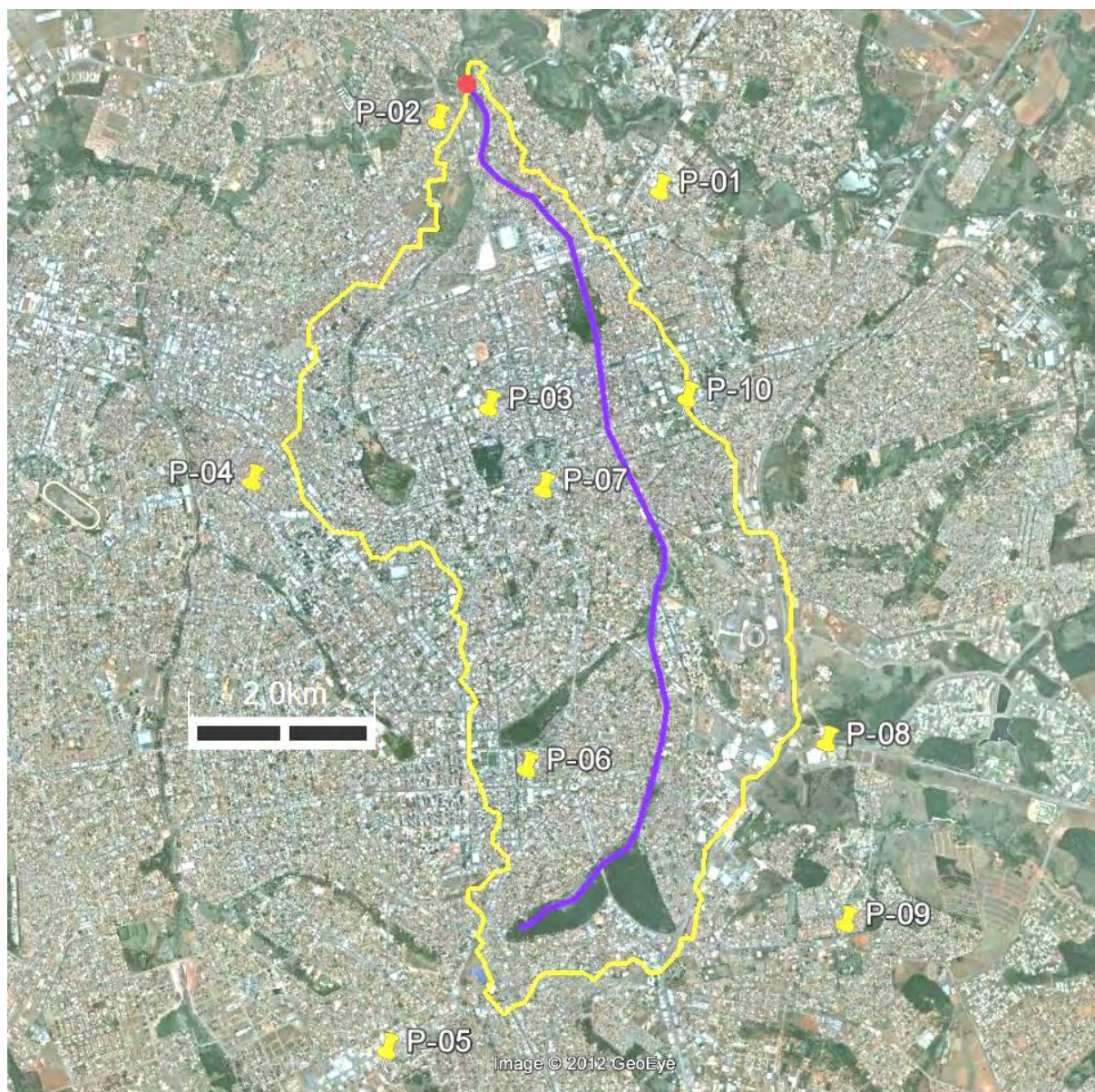


Figura 4.4 - Delimitação (amarelo) da Bacia do Córrego Botafogo (azul) com exutório na foz (vermelho). Imagem obtida por meio do *software Google Earth*. Coordenada:UTM 22K, 686410,06 m L 8153473,95 m S, Altitude do ponto de visão: 21,60 km, Data: 06/03/2009.

A instalação das unidades foi realizada considerando além de uma cobertura razoável sobre a bacia, a disponibilidade de locais que oferecessem acessibilidade e segurança. Foram priorizados locais onde houvesse o mínimo possível de interferências, ressaltando-se que se trata de uma bacia inteiramente urbanizada e que, devido à disponibilidade de recursos humanos e financeiros, os locais deveriam também possibilitar acesso menos dificultado para que houvesse uma razoável frequência na coleta de dados.

Cabe ressaltar que, devido às condições anteriormente indicadas, os equipamentos foram instalados em alturas diferentes do solo em cada local. A influência que esta alteração,

conjuntamente com a mudança de cota do terreno, teve seus efeitos desprezados neste estudo. As fotografias a seguir ilustram a instalação dos aparelhos (Figura 4.5):



Figura 4.5 - Pluviógrafos instalados: Pluv-01 (A), Pluv-02 (B), Pluv-03 (C), Pluv-04 (D), Pluv-05(E), Pluv-06 (F), Pluv-07 (G), Pluv-08 (H), Pluv-09 (I), Pluv-10 (J) (continua).

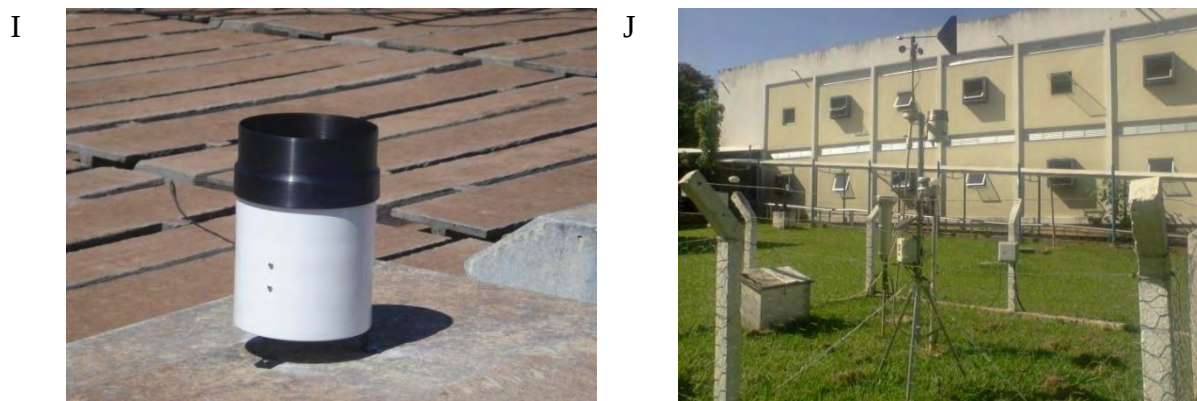


Figura 4.5 (continuação) - Pluviógrafos instalados: Pluv-01(A), Pluv-02 (B), Pluv-03 (C), Pluv-04 (D), Pluv-05(E), Pluv-06 (F), Pluv-07 (G), Pluv-08 (H), Pluv-09 (I), Pluv-10 (J).

A partir dos registros obtidos em minutos, os dados foram preparados em ambiente MATLAB, sendo geradas séries sincronizadas para todos os postos com as seguintes durações de interesse: 05, 10, 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos. Tais durações foram escolhidas com a finalidade de cobrir um intervalo de interesse para eventos convectivos, lembrando que se trata de uma aplicação piloto e que a definição precisa destes intervalos não é o objetivo deste trabalho. Ainda, nas séries criadas os dados continuam espaçados de um minuto entre si, sendo que cada valor refere-se à altura acumulada de respectiva duração, ou seja, cronologicamente os valores se sobrepõem parcialmente.

No total a série abrange 632.160 minutos, considerando um intervalo entre janeiro de 2011 e março de 2012, com dados de até 10 postos. Quando verificada a existência de períodos de falhas (tabela 4.2) no registro de qualquer posto, o mesmo foi removido das etapas de cálculo da chuva média atinentes àquele período, pois não se considerou razoável o preenchimento de falhas na situação de estudo.

Tabela 4.2 - Falhas nos registros pluviográficos. São apresentados o minuto inicial e final de cada falha, considerando todo o registro empregado nos estudos.

Falha	Pluv-01	Pluv-02	Pluv-03	Pluv-04	Pluv-05
1	80.352-87.923	88.813-93.808	80.332-87.902	288.233-340.072	34.597-37.612
2	88.794-93.780	103.880-118.254	88.772-93.757		
3	520.360-521.318	139.872-177.369			
4	562.286-600.535	520.383-521.348			
Falha	Pluv-06	Pluv-07	Pluv-08	Pluv-09	Pluv-10
1	288.099-339.948	36.264-37.657	78.769-88.080	322-63.511	103.165-253.247
2		49.589-59.160	88.950-93.714	78.722-89.468	299.719-303.612
3		64.883-64.920	321.555-357.291	90.338-95.164	
4		80.309-88.042	468.112-632.160	339.977-380.243	
5		88.944-106.706			
6		321.488-367.312			

4.2.2 Seleção do Método para cálculo da Chuva Média

Foram comparados os seguintes métodos de cálculo da chuva média sobre uma área: Polígonos de Thiessen (1911), Multiquadric (SHAW; LYNN, 1972) e Inverso do Quadrado das Distâncias (WEI; MCGUINESS, 1973). O estudo foi feito considerando que o modelo a ser empregado deve ser sensível à variabilidade espacial dos eventos dentro do intervalo de área definido para ajuste do FRA, confirmada nos registros de dados obtidos.

As técnicas avaliadas foram escolhidas devido aos seguintes aspectos: facilidade de implementação; indicações na literatura; amplitude de emprego e simplicidade matemática. O método de Kriging não foi selecionado, apesar de sua característica geoestatística, devido à complexidade matemática envolvida em sua implementação sem a garantia de um melhor ajuste das estimativas, já que depende da escolha de modelos de variogramas, o que poderia se tornar demasiadamente laborioso devido à quantidade de dados a serem analisados diante da discretização temporal escolhida.

O real valor da chuva média e sua distribuição pelo espaço é uma variável desconhecida da bacia e por isso a comparação entre métodos para sua estimativa não pode ser direta. Por outro lado, independente do modelo de ajuste, é razoável esperar que seus resultados sejam melhores conforme a quantidade de pontos de observação aumente (densidade espacial de dados), pois tendendo-se ao limite em que cada ponto da bacia fosse observado, todos os métodos estimariam uma superfície de precipitação coincidente com a real, sem necessidade de interpolações.

Considerando esta lógica, a escolha entre as três técnicas se deu pela avaliação do comportamento dos resultados fornecidos por cada uma frente a uma variação na disponibilidade espacial de dados existentes na bacia. Assumiu-se que quanto menos informação um método necessitasse para melhor se aproximar de seus próprios resultados obtidos em uma outra situação com mais dados, mais recomendável seria seu emprego. Ou seja, a maneira com que o método converge é um indicador indireto de sua eficiência na aproximação da superfície real de precipitação e, por conseguinte, do valor da chuva média.

Prosseguindo, para a definição do método de cálculo da chuva média, foram empregados os dados coletados entre fevereiro e março de 2010, utilizando 28 dias de observação sem falhas e uma discretização espacial de $0,0025^\circ$. À época dos testes, a série de medições contemplava apenas oito estações devido a problemas técnicos ocorridos em dois pluviógrafos da rede. Nesta etapa da pesquisa, foram usadas coordenadas geográficas por conveniência, já que a área delimitada é única e fixa.

Foram então calculadas as precipitações médias sobre a bacia empregando apenas a média simples entre os postos, a fim de que nenhum método fosse favorecido. De acordo com o intervalo de durações escolhido para estimativa das curvas do FRA, foram escolhidos os eventos mais chuvosos com as durações de 05, 10, 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos (Tabela 4.3) e indentificados os momentos de sua ocorrência. Desta forma, foi posteriormente calculado o valor da chuva média por cada método para os instantes indentificados na etapa anterior.

Tabela 4.3 - Eventos para comparação. Os eventos de máxima chuva média sobre a bacia foram estimados usando-se a média simples entre os dados dos oito pluviógrafos. A coluna "Tempo Inicial" indica o minuto inicial desta série para cada evento.

Evento	Duração (minuto)	Precipitação média simples (mm)	Tempo inicial (minuto)
A	5	2,98	8.947
B	10	5,30	8.944
C	15	7,35	8.944
D	30	11,88	8.940
E	45	14,20	18.866
F	60	16,30	11.774
G	90	19,95	11.769
H	120	23,30	11.755

O passo seguinte foi a criação de três cenários para verificação da convergência, onde o número de postos empregados nos cálculos foi alterado por uma remoção sucessiva de estações (Tabela 4.4). O cenário de referência com os oitos postos foi chamado de REF, e os demais cenários SC-3, SC-2 e SC-1, com seis, cinco e três postos respectivamente.

Tabela 4.4 - Pluviógrafos empregados em cada cenário. Os "X" indicam os pluviógrafos empregados em cada cenário.

Pluviógrafo	REF	SC-3	SC-2	SC-1
Pluv-01	X			
Pluv-02	X	X	X	X
Pluv-03	X	X	X	
Pluv-04	X	X		
Pluv-05	X			
Pluv-06	X	X	X	X
Pluv-08	X	X	X	X
Pluv-10	X	X	X	

Posteriormente foram calculados os erros de cada método entre os três cenários criados e o cenário de referência, para cada evento. Assim foi realizada uma comparação entre

erros e uma avaliação da variação dos mesmos. Adicionalmente, foi criado o chamado "*Índice de Erro*" (Equação 4.2). Este índice relaciona o erro cometido em determinado evento com a quantidade de dados empregada no cenário, resultando em menores valores para melhores resultados. O mesmo foi calculado da seguinte maneira:

$$IE = \frac{Erro/100}{(1 - N_{sc}/N_{ref})} \quad (4.2)$$

na qual: IE é o índice de erro; $Erro$ é dado em percentagem; N_{sc} é o número de postos empregados no cenário em questão e N_{ref} é o número de postos do cenário de referência. O índice foi criado com intuito de permitir uma comparação entre as técnicas por meio de pontuação cumulativa das vantagens de uma sobre as outras.

Por fim, os resultados da avaliação, apresentados e discutidos em seção específicas, indicaram o Multiquadric como método a ser empregado para subsidiar a metodologia de cálculo do FRA sugerida, considerando as escalas espaciais em estudo.

4.2.3 Definição do Intervalo de Áreas e Seleção dos Postos

Para a aplicação piloto em questão, considerando a área da Bacia do Córrego Botafogo, 32,2 km², e região abrangida pela rede de postos, foi escolhido o intervalo entre aproximadamente 0,8 km² e 20,0 km² como prováveis valores de interesse no caso de aplicação do FRA para projetos de drenagem nesta bacia em específico. Nesta etapa do trabalho, optou-se pelo uso do sistema de coordenadas UTM, a fim de que não houvesse distorções significativas de forma e área entre as áreas a serem delimitadas e os resultados pudessem ser comparados diretamente.

Foram então escolhidos três postos como aqueles em que F_{ij} será calculado para posterior ajuste da equação do FRA em função da área e duração. Esta quantidade foi obtida após considerar-se, não só a necessidade um mínimo amostral, mas também a disponibilidade qualitativa e quantitativa de postos na rede. Primeiramente foram priorizados os postos mais próximos do interior da rede de monitoramento, buscando evitar extrapolações que distorcessem a chuva média calculada nas áreas circulares no entorno dos postos. Em seguida,

foram verificadas as ocorrências de falhas, visto que para o cálculo de F_{ij} não devem ser empregados valores pontuais estimados e sim efetivamente medidos. Por fim, após o emprego destas condições como filtros, os postos escolhidos foram: Pluv-03, Pluv-07 e Pluv-10.

Definidos os três postos, foram estabelecidas cinco áreas circulares ao redor de cada um deles, de acordo com o intervalo anteriormente definido e respeitando uma discretização regular para os raios, sendo estes: 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 e 2,5 km. As áreas foram delimitadas centrando-as nos postos escolhidos e verificando as coordenadas da linha de contorno das mesmas, o tamanho destas foi respectivamente de: 0,79, 3,14, 7,07, 12,57 e 19,63 km². As quinze áreas foram então transportadas para um *grid* regular com discretização espacial de 0,1 km, para que fossem então empregada a técnica de espacialização das chuvas.

4.2.4 Aplicação do método proposto, análises e ajuste de equações

Tendo sido concluídas as etapas antecedentes, foram definidas a técnica de cálculo da chuva média, o intervalo de durações e áreas para estudo e os postos considerados. Prosseguiu-se então para a implementação do método, visando observar a aplicabilidade e sensibilidade do mesmo, bem como se os resultados apresentados teriam comportamento condizente com os pressupostos estabelecidos e com os apontamentos da literatura. Ainda, é importante pontuar que as chuvas médias máximas ao redor de cada posto não foram concomitantes a quaisquer falhas nos postos centrais das mesmas.

Realizou-se inicialmente a ordenação dos eventos máximos pontuais e médios, sendo escolhidos para os trabalhos e análises os três mais expressivos, ou seja, ordens 1, 2 e 3, decrescentes em intensidade. O uso de três ordens buscou verificar a sensibilidade do método ao período de retorno, apesar de que na situação atual, a série de dados é pouco maior que um ano. Por este mesmo motivo, a terminologia mais empregada nos resultados se refere à ordem e não aos períodos de retorno correspondentes.

Antes dos ajustes de equações para cada duração e ordem, foi realizada uma análise estatística para os resultados de F_{ij} obtidos a fim de se verificar a influência dos fatores pré-estabelecidos isolados ou em conjunto. Foram criadas amostras separando os resultados em função da área (raio), da duração e da ordem (período de retorno). As amostras foram então, para cada tipo de separação, comparadas entre si duas a duas por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov, a fim de verificar a dependência do FRA em relação às três

variáveis citadas. O teste compara duas distribuições de probabilidade e verifica se ambas diferem ou não entre si significativamente. A hipótese nula é de que as distribuições são iguais e a hipótese não nula é de que são diferentes.

O teste foi aplicado com uso das ferramentas de análise estatística do MATLAB, considerando a significância $\alpha = 5\%$. Neste, calcula-se a máxima distância vertical entre as duas curvas de distribuição de frequência acumulada que estão sendo comparadas, se este valor for maior que um valor crítico padrão do teste, então a hipótese nula é rejeitada, com probabilidade α de se cometer erro Tipo-I, ou seja, 5,0% de chance de se rejeitar a hipótese nula sendo ela verdadeira. O software MATLAB também apresenta o valor da estatística p , a fim de se avaliar com mais critério o resultado do teste. Automaticamente, quando $p \geq 0,05$ considera-se a hipótese nula como verdadeira, entretanto, com o valor de p explicitado é possível avaliar essa consideração e as tendências das amostras e dos testes. Considerou-se relevante explicitar p devido se tratar de uma aplicação piloto, cujas limitações já foram comentadas, de forma que os testes não possibilitam que todas as conclusões sejam definitivas, sendo algumas de caráter exploratório.

Para aplicação do teste foram montados 10 cenários, detalhados mais adiante na Tabela 4.5. A formação das amostras é função direta do tipo de comparação que será realizada, observando-se que existem cinco valores de raios (resultando em cinco tamanhos de áreas) para cada um dos três postos, oito durações distintas e três ordens de eventos considerados na aplicação.

Estes testes foram estabelecidos conforme o desenvolvimento da pesquisa. Como será melhor abordado na seção de resultados, primeiramente se verificou uma forte dependência do FRA com a área, o que já era fato esperado (cenários A1, B1, C1 e D1). Depois uma dependência relativa com a duração (cenários A2, B2, C2 e D2).

Objetivando então observar a influência do período de retorno (cenário E), considerou-se também que as amostras deveriam ser avaliadas separadamente por duração, ou seja, se o comportamento relativo à ordem variaria para cada duração (cenário F). O mesmo não foi realizado separadamente por área, já que esta já havia mostrado forte influência, mesmo independente de qualquer outra variável. Além do mais, assume-se neste método e nos demais que a variação do FRA em relação à área é básica, porém seria questionável se para a faixa de durações escolhidas, haveria distinção sensível nas curvas, bem como para os períodos de retorno (menores ou iguais a um ano) traduzidos em função da ordem.

Tabela 4.5 - Detalhamento dos testes estatísticos realizados.

Cenário	Descrição	Objetivo	Tamanho das amostras e número de testes
A1	São usados todos os resultados de F_{ij} , separando as amostras apenas em função da área (raio)	Verificar se o FRA varia com a área	5 amostras (uma por tamanho de área) com 72 elementos, comparadas entre si, resultando em 10 testes distintos.
A2	São usados todos os resultados de F_{ij} , separando as amostras apenas em função da duração	Verificar se o FRA varia com a duração	8 amostras (uma por duração) com 45 elementos, comparadas entre si, resultando em 28 testes distintos.
B1	São usados os resultados de F_{ij} apenas para os eventos de ordem 1, separando as amostras apenas em função da área (raio)	Verificar se o FRA varia com a área	5 amostras (uma por tamanho de área) com 24 elementos cada, comparadas entre si, resultando em 10 testes distintos.
B2	São usados os resultados de F_{ij} apenas para os eventos de ordem 1, separando as amostras apenas em função da área (raio)	Verificar se o FRA varia com a duração	8 amostras (uma por tamanho de área) com 15 elementos cada, comparadas entre si, resultando em 28 testes distintos.
C1	São usados os resultados de F_{ij} apenas para os eventos de ordem 2, separando as amostras apenas em função da área (raio)	Verificar se o FRA varia com a área	5 amostras (uma por tamanho de área) com 24 elementos cada, comparadas entre si, resultando em 10 testes distintos.
C2	São usados os resultados de F_{ij} apenas para os eventos de ordem 2, separando as amostras apenas em função da área (raio)	Verificar se o FRA varia com a duração	8 amostras (uma por tamanho de área) com 15 elementos cada, comparadas entre si, resultando em 28 testes distintos.
D1	São usados os resultados de F_{ij} apenas para os eventos de ordem 3, separando as amostras apenas em função da área (raio)	Verificar se o FRA varia com a área	5 amostras (uma por tamanho de área) com 24 elementos cada, comparadas entre si, resultando em 10 testes distintos.
D2	São usados os resultados de F_{ij} apenas para os eventos de ordem 3, separando as amostras apenas em função da área (raio)	Verificar se o FRA varia com a duração	8 amostras (uma por tamanho de área) com 15 elementos cada, comparadas entre si, resultando em 28 testes distintos.
E	São usados todos os resultados de F_{ij} , separando as amostras apenas em função da ordem.	Verificar se o FRA varia com a ordem	3 amostras (uma por ordem) com 120 elementos cada, comparadas entre si, resultando em 3 testes distintos.
F	São usados todos os resultados de F_{ij} , separando as amostras em função da ordem e também por durações.	Verificar se o FRA varia com a ordem em função da duração	3 amostras (uma por ordem) por duração, com 15 elementos cada, comparadas entre si, resultando em 3 testes por duração totalizando 24 testes distintos.

4.2.5 Comparação dos resultados obtidos para o FRA com valores da literatura

Após a conclusão das etapas anteriores, o método proposto teve seus valores calculados para o FRA e então comparados com os propostos pelos seguintes modelos empíricos citados: USWB, UK e DNIT. Para comparação com os dois primeiros, foi verificado que ambos apresentam curvas ajustadas para duas durações em comum com as calculadas na implementação piloto, sejam elas 30 e 60 minutos. No caso do ultimo, foi empregada diretamente a equação apresentada pelo DNIT nas durações 5, 15, 30 e 60 minutos.

Em todos os casos o FRA foi obtido para áreas de 5, 10, 20 e 50 km². Mesmo este ultimo valor estando fora do intervalo em que o FRA foi ajustado no modelo proposto,

considerou-se oportuno compará-lo também nestas condições. Os resultados do modelo em estudo comparados são aqueles provenientes das curvas ajustadas apenas em função da área e com os eventos de primeira ordem.

Os três métodos foram escolhidos por não considerarem o período de retorno bem como pelo fato de que, no caso do USWB e UK, dispõe-se das curvas bem definidas e no caso do DNIT uma equação explícita. O método de Bell foi excluído porque o mesmo realiza uma determinação do FRA em função do período de retorno e no caso estudado não existe dados resultados para dois anos de observação, que seria um mínimo razoável para esta comparação, apesar do período de retorno ter sido observado na formulação do modelo deste trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DA SELEÇÃO DO MÉTODO DE CÁLCULO DA CHUVA MÉDIA

Os resultados obtidos nesta etapa se referem à escolha do método de referência para determinação da chuva média empregado posteriormente na metodologia de cálculo do FRA em desenvolvimento, conforme detalhado em 4.2.4. A Tabela 5.1 adiante expõe os resultados obtidos por cada método quanto ao cálculo da chuva média sobre a Bacia do Córrego do Botafogo em cada evento. A Figura 5.1 apresenta o "Índice de Erro" (IE), definido conforme Equação 4.2. A título ilustrativo, a Figura 5.2 ilustra a distribuição espacial da precipitação obtida pelos três métodos para o evento H, com duração de 120 minutos, no cenário de referência - REF.

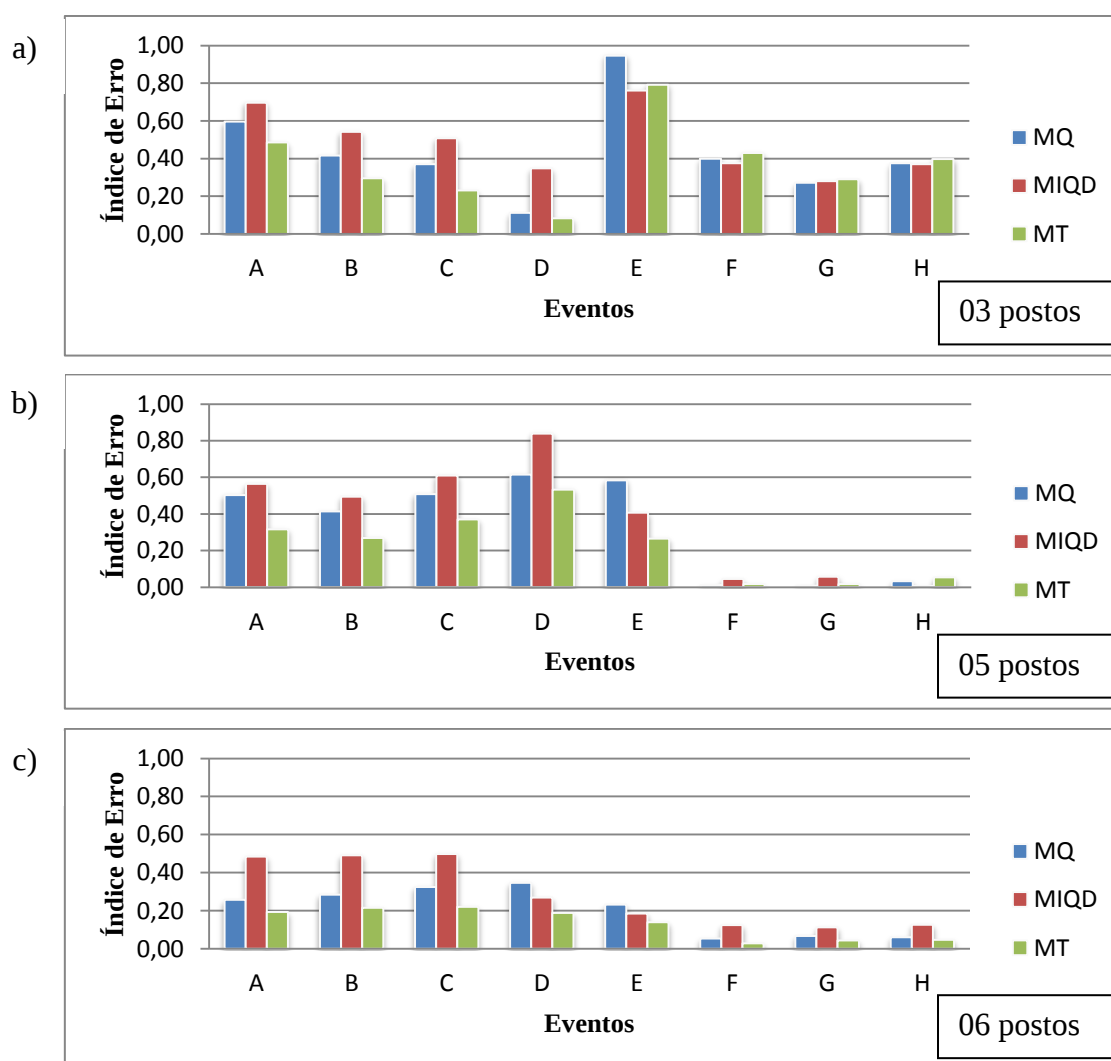


Figura 5.1 - Valores dos Índices de Erro obtidos pelos métodos para cada cenário: SC-01 (a); SC-02 (b); e SC-03 (c).

Tabela 5.1 - Precipitação média (mm) sobre a bacia estimada por cada método: a. MQ; b. MIQD e c. MT; Para cada método apresenta-se o erro cometido entre o valor calculado no cenário frente àquele obtido no cenário de referência. Também é indicado o valor do índice de erro (*IE*), que considera o erro diante da disponibilidade de dados do cenário. As últimas três linhas apontam o valor médio do erro, seu valor máximo e o desvio padrão.

a.										
Evento	SC-01	Erro (%)	<i>IE</i>	SC-02	Erro (%)	<i>IE</i>	SC-03	Erro (%)	<i>IE</i>	REF
A	1,67	37,24	0,60	2,16	18,88	0,50	2,83	6,43	0,26	2,66
B	3,47	26,09	0,42	3,97	15,51	0,41	5,03	7,12	0,28	4,70
C	4,81	23,19	0,37	5,06	19,07	0,51	6,77	8,14	0,33	6,26
D	7,75	7,07	0,11	6,42	23,05	0,61	9,06	8,66	0,35	8,34
E	23,97	59,14	0,95	18,35	21,84	0,58	15,93	5,80	0,23	15,06
F	13,28	24,96	0,40	17,62	0,45	0,01	17,94	1,36	0,05	17,70
G	17,12	16,99	0,27	20,69	0,33	0,01	20,97	1,68	0,07	20,62
H	18,88	23,44	0,38	24,96	1,19	0,03	25,03	1,50	0,06	24,66
Médio		27,27			12,54			5,08		
Máximo		59,14			23,05			8,66		
Desvio		15,43			10,09			3,09		
b.										
Evento	SC-01	Erro (%)	<i>IE</i>	SC-02	Erro (%)	<i>IE</i>	SC-03	Erro (%)	<i>IE</i>	REF
A	1,52	43,59	0,70	2,13	21,12	0,56	3,02	12,11	0,48	2,70
B	3,17	33,88	0,54	3,91	18,53	0,49	5,38	12,28	0,49	4,79
C	4,40	31,72	0,51	4,97	22,84	0,61	7,24	12,46	0,50	6,44
D	7,10	21,77	0,35	6,22	31,44	0,84	9,69	6,72	0,27	9,08
E	23,06	47,57	0,76	18,01	15,23	0,41	16,36	4,65	0,19	15,63
F	13,44	23,51	0,38	17,27	1,68	0,04	18,11	3,11	0,12	17,57
G	17,06	17,56	0,28	20,24	2,17	0,06	21,28	2,83	0,11	20,69
H	18,87	23,20	0,37	24,51	0,22	0,01	25,34	3,16	0,13	24,57
Médio		30,35			14,15			7,16		
Máximo		47,57			31,44			12,46		
Desvio		10,83			11,57			4,42		
c.										
Evento	SC-01	Erro (%)	<i>IE</i>	SC-02	Erro (%)	<i>IE</i>	SC-03	Erro (%)	<i>IE</i>	REF
A	1,74	30,43	0,49	2,21	11,84	0,32	2,63	4,83	0,19	2,51
B	3,63	18,55	0,30	4,01	10,08	0,27	4,70	5,38	0,22	4,46
C	5,03	14,47	0,23	5,07	13,85	0,37	6,21	5,51	0,22	5,88
D	8,12	5,28	0,08	6,18	19,94	0,53	8,08	4,72	0,19	7,71
E	24,25	49,55	0,79	17,83	9,93	0,26	16,78	3,48	0,14	16,22
F	13,28	26,84	0,43	18,26	0,60	0,02	18,28	0,71	0,03	18,15
G	17,26	18,14	0,29	21,21	0,60	0,02	21,31	1,10	0,04	21,08
H	18,90	24,88	0,40	25,66	1,99	0,05	25,45	1,16	0,05	25,16
Médio		23,52			8,60			3,36		
Máximo		49,55			19,94			5,51		
Desvio		13,13			6,99			2,06		

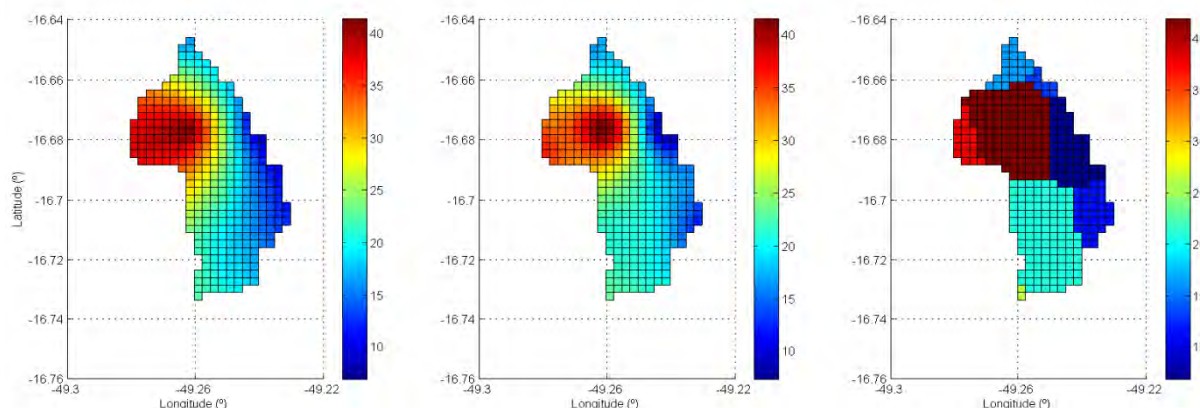


Figura 5.2 - Superfícies de precipitação calculadas pelo MQ, MIQD e MT (da esquerda para direita) para o evento H no cenário de referência. Observa-se semelhança entre MQ e MIQD.

Como pode ser observado nos resultados relativos ao erro médio, o MT apresentou o melhor comportamento de convergência, o que poderia sugerir sua melhor performance na estimativa da chuva média para eventos extremos, como os empregados. Mas algumas particularidades precisam ser apontadas. Dos três métodos testados, o MT é o único que não é indicado para estimar a chuva em um ponto qualquer da bacia, porque assume que este valor será idêntico ao valor observado na estação mais próxima, o que não parece maior problema para determinação da chuva média, mas não é razoável para a aplicação que se pretende na escala em questão devido à perda de sensibilidade espacial em escalas inferiores à da rede de postos (figura 5.2).

Adicionalmente, apesar dos melhores resultados em termos de convergência, o MT também pode conduzir a erros significativos em eventos que tenham grande variabilidade espacial por causa de sua própria formulação, podendo conduzir a resultados superestimados no caso de uma estação com grande influência na área de interesse registrar um valor considerável precipitado.

Neste sentido, MIQD e MQ, além da vantagem de poder estimar a superfície de precipitação, também reduzem os efeitos oriundos de observações esporádicas, altas ou baixas, na estimativa da chuva média, porque usam as observações existentes em todos os pontos. Além disso, o MQ pode ter melhores efeitos de atenuação devido ao fato de que seus coeficientes de ponderação são derivados das medições e de suas estruturas espaciais como um todo e não apenas do posicionamento dos postos como no caso do MIQD.

Ao se comparar o MQ com o MIQD é perceptível que o MQ foi um pouco melhor no aspecto de convergência, na maioria dos eventos. A comparação quantitativa do índice de

Tabela 5.3 - Comparação do MIQD em relação ao MQ pelo método de pontuação proposto.

Evento	Valores dos Índices de Erro				Respectiva Pontuação			Pontos totais
	MIQD SC-01	MQ SC-01	MQ SC-02	MQ SC-03	Pontos 1	Pontos 2	Pontos 3	
A	0,70	0,60	0,50	0,26	0	0	0	0
B	0,54	0,42	0,41	0,28	0	0	0	0
C	0,51	0,37	0,51	0,33	0	1,5	0	1,5
D	0,35	0,11	0,61	0,35	0	1,5	0	1,5
E	0,76	0,95	0,58	0,23	1	0	0	1
F	0,38	0,40	0,01	0,05	1	0	0	1
G	0,28	0,27	0,01	0,07	0	0	0	0
H	0,37	0,38	0,03	0,06	1	0	0	1
Total								6,0

Evento	Valores dos Índices de Erro				Respectiva Pontuação			Pontos totais
	MIQD SC-02	MQ SC-01	MQ SC-02	MQ SC-03	Pontos 1	Pontos 2	Pontos 3	
A	0,56	0,60	0,50	0,26	0,5	0	0	0,5
B	0,49	0,42	0,41	0,28	0	0	0	0
C	0,61	0,37	0,51	0,33	0	0	0	0
D	0,84	0,11	0,61	0,35	0	0	0	0
E	0,41	0,95	0,58	0,23	0,5	1	0	1,5
F	0,04	0,40	0,01	0,05	0,5	0	1,5	2
G	0,06	0,27	0,01	0,07	0,5	0	1,5	2
H	0,01	0,38	0,03	0,06	0,5	1	1,5	3
Total								9,0

Evento	Valores dos Índices de Erro				Respectiva Pontuação			Pontos totais
	MIQD SC-03	MQ SC-01	MQ SC-02	MQ SC-03	Pontos 1	Pontos 2	Pontos 3	
A	0,48	0,60	0,50	0,26	0	0,5	0	0,5
B	0,49	0,42	0,41	0,28	0	0	0	0
C	0,50	0,37	0,51	0,33	0	0,5	0	0,5
D	0,27	0,11	0,61	0,35	0	0,5	1	1,5
E	0,19	0,95	0,58	0,23	0	0,5	1	1,5
F	0,12	0,40	0,01	0,05	0	0	0	0
G	0,11	0,27	0,01	0,07	0	0	0	0
H	0,13	0,38	0,03	0,06	0	0	0	0
Total								4,0

Somando-se as pontuações de cada método, o MQ totaliza 39,0 pontos contra 19,0 do MIQD. Isso significa que o MQ, em alguns eventos, teve menores erros do que o MIQD mesmo utilizando menor quantidade de dados.

Entretanto, é claro que apenas os resultados apresentados não são suficientes para apontar o MQ como melhor alternativa de método do que o MIQD na generalidade dos casos, mas por outro lado, corroboram no sentido de que, para o estudo de eventos extremos como na escala avaliada, pode ser mais indicado para tal cálculo, considerando é claro uma rede de postos suficiente e homogeneamente distribuídos. Desta maneira o MQ foi a técnica escolhida para este trabalho, por que, dentre as que possuem a possibilidade de estimativa da distribuição espacial, ser a com melhores resultados para o caso estudado.

5.2 RESULTADOS DO MODELO PROPOSTO

Diante das condições estabelecidas anteriormente (item 4), foram identificados os eventos extremos pontuais ocorridos em cada nos postos Pluv-03, Pluv-07 e Pluv-10, considerando o intervalo de durações e ordens escolhido (Tabela 5.4). Logo após foram calculadas todas as chuvas médias ocorridas nas 15 áreas circulares delimitadas, empregando-se o MQ, e então identificadas aquelas de valores máximos com as mesmas durações e ordens (Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7). Finalmente, foi calculado a correspondente razão F_{ij} dividindo-se os valores de chuva média pelos valores de chuva pontuais, com mesma duração, ordem e posto de referência (Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10).

Tabela 5.4- Precipitação pontual extrema observada nos três postos de referência.

Precipitação Pontual Extrema (mm)									
Posto	Ordem	Durações (min)							
		05	10	15	30	45	60	90	120
Pluv-03	1	18.0	31.6	43.4	63.4	76.4	77.2	77.4	77.4
	2	16.8	29.2	41.4	63.0	73.2	74.4	74.6	74.8
	3	12.8	21.0	26.0	41.8	46.6	48.0	48.6	48.6
Pluv-07	1	12.6	21.2	33.0	54.2	61.4	67.8	70.2	70.2
	2	10.0	19.4	25.8	42.8	52.6	53.4	53.4	53.4
	3	9.4	15.8	21.2	31.2	35.6	37.0	39.0	39.2
Pluv-10	1	12.0	20.4	27.0	39.4	47.2	53.0	54.8	54.8
	2	10.2	18.0	24.2	38.0	45.0	48.8	51.0	51.4
	3	9.0	17.4	23.8	36.6	42.8	46.0	49.0	49.0

Tabela 5.5 - Precipitação média extrema observada nas áreas circulares ao redor de Pluv-03.

Precipitação Média Extrema - Bacias ao redor do posto Pluv-03 (mm)									
Área (km ²)	Ordem	Durações (min)							
		05	10	15	30	45	60	90	120
0,79	1	15.80	27.95	38.38	57.64	69.74	70.69	70.90	70.90
	2	14.82	25.52	37.10	56.48	65.49	66.68	67.63	67.63
	3	10.98	18.00	22.91	38.40	43.26	44.66	45.28	45.69
3,14	1	13.73	24.49	33.18	52.03	63.34	64.47	64.72	64.72
	2	12.79	21.80	32.95	49.50	57.31	58.48	59.96	59.96
	3	9.40	15.70	20.30	35.33	40.20	41.61	42.31	43.24
7,07	1	12.11	21.73	29.51	47.32	57.99	59.30	59.61	59.61
	2	10.91	18.44	28.30	42.75	49.45	50.83	52.36	52.36
	3	8.21	14.03	18.35	32.82	37.57	39.00	39.80	41.10
12,57	1	10.78	19.43	26.54	43.18	53.34	54.80	55.17	55.17
	2	9.14	15.43	23.66	36.15	41.82	43.47	44.80	44.81
	3	7.31	12.53	16.91	30.62	35.24	36.69	38.13	39.20
19,63	1	9.67	17.50	24.01	39.58	49.26	50.83	51.27	51.27
	2	7.59	12.81	19.57	30.29	35.07	36.94	38.09	38.10
	3	6.59	11.26	15.74	28.65	33.16	34.62	36.56	37.45

Tabela 5.6 - Precipitação média extrema observada nas áreas circulares ao redor de Pluv-07.

Precipitação Média Extrema - Bacias ao redor do posto Pluv-07 (mm)									
Área (km ²)	Ordem	Durações (min)							
		05	10	15	30	45	60	90	120
0,79	1	11.69	19.89	31.14	50.45	57.47	63.06	65.23	65.24
	2	9.98	18.81	26.22	43.63	53.80	54.87	54.98	54.98
	3	8.61	14.58	19.85	30.84	35.43	37.10	38.35	38.63
3,14	1	10.82	18.36	28.85	46.14	54.35	57.65	59.59	59.60
	2	9.82	18.16	26.24	43.86	52.85	55.69	55.91	55.91
	3	7.82	13.36	18.50	30.33	35.17	37.00	37.92	38.05
7,07	1	9.75	17.82	25.86	42.81	53.31	54.87	55.19	55.19
	2	9.58	16.49	25.55	41.15	47.33	51.65	53.36	53.38
	3	7.09	12.25	17.23	29.51	34.21	36.15	37.33	37.47
12,57	1	9.20	17.05	24.25	40.79	51.10	52.84	53.23	53.23
	2	8.49	14.35	22.41	35.73	41.26	45.28	46.77	46.81
	3	6.53	11.19	15.95	28.18	32.67	34.71	36.20	36.41
19,63	1	8.70	16.10	22.80	38.54	48.49	50.32	50.78	50.78
	2	7.33	12.41	19.25	30.90	35.88	39.69	41.01	41.05
	3	6.04	10.21	14.67	26.54	30.82	32.86	34.69	34.95

Tabela 5.7 - Precipitação média extrema observada nas áreas circulares ao redor de Pluv-10.

Precipitação Média Extrema - Bacias ao redor do posto Pluv-10 (mm)									
Área (km ²)	Ordem	Durações (min)							
		05	10	15	30	45	60	90	120
0,79	1	10.89	18.59	24.62	37.99	47.94	53.21	54.88	54.88
	2	9.34	16.62	23.17	37.12	43.00	46.48	48.51	48.89
	3	8.59	16.55	22.15	34.93	40.78	43.83	46.78	47.63
3,14	1	9.85	16.87	22.35	37.89	48.45	53.23	54.78	54.78
	2	8.49	15.74	22.16	34.79	40.90	44.10	46.03	47.22
	3	8.21	15.24	20.52	33.21	38.73	41.65	44.59	46.40
7,07	1	8.92	15.33	21.42	37.70	48.62	52.97	54.41	54.41
	2	7.84	14.98	20.34	32.62	38.92	41.89	43.80	47.03
	3	7.76	13.99	19.08	31.66	36.91	39.72	42.64	44.17
12,57	1	8.08	14.27	20.94	37.29	48.45	52.41	53.76	53.76
	2	7.49	13.93	18.51	30.51	36.94	39.73	41.72	47.21
	3	7.10	12.82	17.81	30.17	35.21	37.91	40.84	42.10
19,63	1	7.37	13.62	20.38	36.60	47.78	51.42	52.69	52.69
	2	7.15	12.74	16.95	28.78	34.99	37.66	41.39	47.79
	3	6.49	11.77	16.74	28.50	33.72	36.28	39.85	40.24

Tabela 5.8 - Resultados de F_{ij} obtidos no posto Pluv-03.

Razão entre precipitações médias e pontuais (F_{ij}) com mesmo posto de referência									
Área (km ²)	Ordem	Durações (min)							
		05	10	15	30	45	60	90	120
0,79	1	0.878	0.884	0.884	0.909	0.913	0.916	0.916	0.916
	2	0.882	0.874	0.896	0.896	0.895	0.896	0.907	0.904
	3	0.858	0.857	0.881	0.919	0.928	0.930	0.932	0.940
3,14	1	0.763	0.775	0.764	0.821	0.829	0.835	0.836	0.836
	2	0.761	0.746	0.796	0.786	0.783	0.786	0.804	0.802
	3	0.735	0.748	0.781	0.845	0.863	0.867	0.871	0.890
7,07	1	0.673	0.688	0.680	0.746	0.759	0.768	0.770	0.770
	2	0.649	0.632	0.684	0.679	0.676	0.683	0.702	0.700
	3	0.641	0.668	0.706	0.785	0.806	0.812	0.819	0.846
12,57	1	0.599	0.615	0.612	0.681	0.698	0.710	0.713	0.713
	2	0.544	0.528	0.571	0.574	0.571	0.584	0.601	0.599
	3	0.571	0.596	0.650	0.733	0.756	0.764	0.785	0.807
19,63	1	0.537	0.554	0.553	0.624	0.645	0.658	0.662	0.662
	2	0.452	0.439	0.473	0.481	0.479	0.497	0.511	0.509
	3	0.515	0.536	0.605	0.685	0.712	0.721	0.752	0.771

Tabela 5.9 - Resultados de F_{ij} obtidos no posto Pluv-07.

Razão entre precipitações médias e pontuais (F_{ij}) com mesmo posto de referência									
Área (km ²)	Ordem	Durações (min)							
		05	10	15	30	45	60	90	120
0,79	1	0.928	0.938	0.944	0.931	0.936	0.930	0.929	0.929
	2	0.998	0.970	1.016	1.019	1.023	1.028	1.030	1.030
	3	0.916	0.923	0.936	0.989	0.995	1.003	0.983	0.985
3,14	1	0.859	0.866	0.874	0.851	0.885	0.850	0.849	0.849
	2	0.982	0.936	1.017	1.025	1.005	1.043	1.047	1.047
	3	0.832	0.846	0.873	0.972	0.988	1.000	0.972	0.971
7,07	1	0.774	0.841	0.784	0.790	0.868	0.809	0.786	0.786
	2	0.958	0.850	0.991	0.961	0.900	0.967	0.999	1.000
	3	0.755	0.775	0.813	0.946	0.961	0.977	0.957	0.956
12,57	1	0.730	0.804	0.735	0.753	0.832	0.779	0.758	0.758
	2	0.849	0.740	0.869	0.835	0.784	0.848	0.876	0.877
	3	0.694	0.708	0.752	0.903	0.918	0.938	0.928	0.929
19,63	1	0.690	0.759	0.691	0.711	0.790	0.742	0.723	0.723
	2	0.733	0.640	0.746	0.722	0.682	0.743	0.768	0.769
	3	0.642	0.646	0.692	0.851	0.866	0.888	0.889	0.892

Tabela 5.10 - Resultados de F_{ij} obtidos no posto Pluv-10.

Razão entre precipitações médias e pontuais (F_{ij}) com mesmo posto de referência									
Área (km ²)	Ordem	Durações (min)							
		05	10	15	30	45	60	90	120
0,79	1	0.908	0.911	0.912	0.964	1.016	1.004	1.001	1.001
	2	0.916	0.923	0.958	0.977	0.956	0.953	0.951	0.951
	3	0.954	0.951	0.931	0.954	0.953	0.953	0.955	0.972
3,14	1	0.821	0.827	0.828	0.962	1.026	1.004	1.000	1.000
	2	0.833	0.874	0.916	0.915	0.909	0.904	0.903	0.919
	3	0.912	0.876	0.862	0.907	0.905	0.905	0.910	0.947
7,07	1	0.743	0.751	0.793	0.957	1.030	0.999	0.993	0.993
	2	0.769	0.832	0.840	0.858	0.865	0.858	0.859	0.915
	3	0.862	0.804	0.802	0.865	0.862	0.863	0.870	0.902
12,57	1	0.673	0.700	0.776	0.946	1.026	0.989	0.981	0.981
	2	0.734	0.774	0.765	0.803	0.821	0.814	0.818	0.919
	3	0.789	0.737	0.748	0.824	0.823	0.824	0.833	0.859
19,63	1	0.614	0.667	0.755	0.929	1.012	0.970	0.961	0.961
	2	0.701	0.708	0.701	0.757	0.778	0.772	0.812	0.930
	3	0.721	0.676	0.703	0.779	0.788	0.789	0.813	0.821

De posse então dos valores calculados da razão entre a chuva média sobre as áreas circulares e a chuva pontual medida nos postos centrais das áreas, de mesma ordem e duração, foram realizadas as análises estatísticas propostas na metodologia. Finalmente os valores foram empregados na construção das curvas para estimativa do FRA e os resultados comparados com as outras metodologias empíricas indicadas.

Nestes resultados, com auxílio das Figuras apresentadas adiante (Figuras 5.3, 5.4 e 5.5), é possível verificar as seguintes características:

- O FRA decaí com o aumento da área, conforme se esperava (Figura 5.3);
- O FRA tende a aumentar com a duração (Figura 5.4);
- O período de retorno, representado pela ordem dos eventos, teve influência nos valores do FRA, porém indeterminada no comportamento em si dos mesmos e necessitando de maiores estudos (Figura 5.5);
- O comportamento do FRA é semelhante para os três conjuntos de áreas circulares delimitados (um ao redor de cada posto), porém os resultados dos valores precipitados comprovam a variabilidade espacial dos eventos extremos e a necessidade de estudos regionais com redes suficientemente densas para aplicação deste coeficiente com maior segurança;

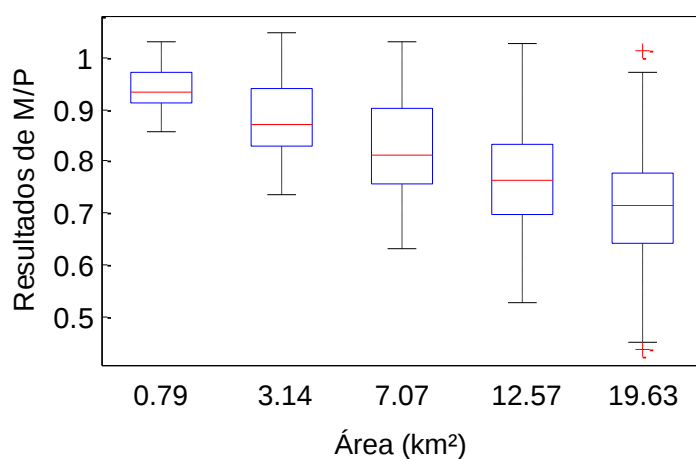


Figura 5.3 - Gráfico *boxplot* dos resultados em função do raio.

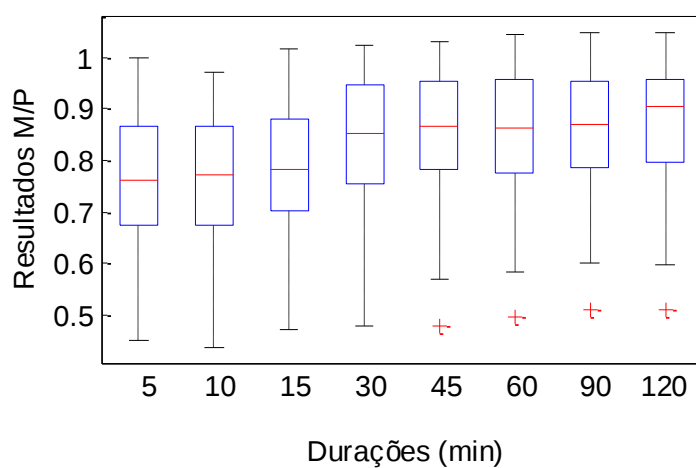


Figura 5.4 - Gráfico *boxplot* dos resultados em função da duração.

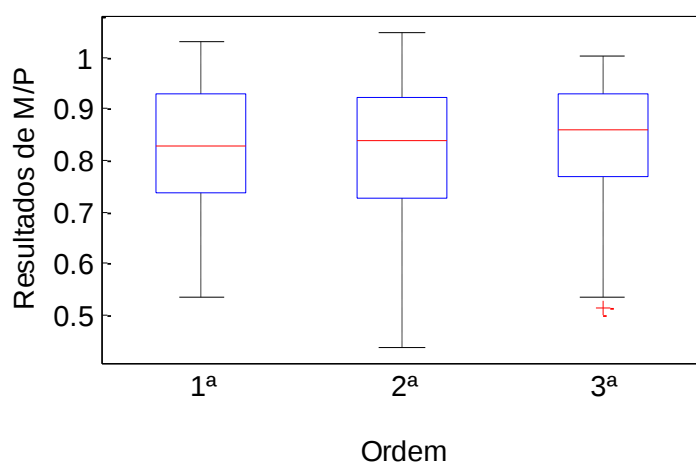


Figura 5.5 - Gráfico *boxplot* dos resultados em função da ordem (período de retorno).

O método proposto obedeceu às premissas estabelecidas e se mostrou aplicável e sensível na avaliação do FRA dentro das condições definidas para a implementação piloto,

conforme se percebe nas Figuras 5.3 e 5.4. Contudo, ressalva-se mais uma vez que os resultados apresentados não possuem condições para aplicações práticas devido a extensão dos registros até então obtidos. Entretanto, havendo uma série suficientemente extensa de observações, o modelo pode ser adequadamente empregado na determinação do FRA.

Um aspecto interessante dos resultados que pode levar a um pré-julgamento em desfavor do método é a quantidade de valores da razão F_{ij} superiores à unidade. À princípio, isso iria de encontro com a própria argumentação para emprego do FRA. No entanto, este tipo de resultado é aceitável dentro da metodologia proposta já que não é feita uma análise de dados distribuídos na qual as ocorrências pontuais passem despercebidas. Porém, este fato não pode ser avaliado isoladamente.

Como ressaltado desde o começo, a série de dados empregadas é curta e se refere a apenas uma bacia, havendo uma proximidade considerável entre os três postos empregados, um conjunto de fatores que favorece este tipo de observação: eventos médios superiores aos eventos pontuais. Em contrapartida, se em um dado ponto o valor medido àquele instante foi inferior à média, os valores medidos em outras localidades serão provavelmente superiores. Para um dado período suficientemente longo, essas situações tendem a se compensar entre os postos de forma que os resultados próximos à unidade reduzirão.

Além do mais, ao se avaliar os resultados como um todo, estes valores não prejudicaram o FRA em sua tendência geral, como será observado adiante no item 5.4, pois as médias dos resultados ainda são menores que a unidade.

Analisando ainda por outro ângulo, resultados superiores à unidade influenciam os resultados a favor da segurança. Porém, como se observa das tabelas anteriores, estes valores ocorreram justamente em eventos extremos locais menos expressivos dentro da bacia como um todo. Novamente, à medida que se expandam as séries de dados, os eventos extremos pontuais observados serão mais significantes e condizentes com as condições para projetos, e a tendência esperada dos resultados é que se afastem da unidade.

Em última instância, se mesmo após um longo período de observação, a existência de resultados superiores a 1,0 for o impactante na determinação das curvas do FRA, a constatação que se chegaria é de que os valores de chuva média não poderiam ser reduzidos demasiadamente sem prejudicar a segurança. Neste sentido, a formulação desenvolvida permite que quando da aplicação prática desta metodologia, possam ser realizadas análises estatísticas de forma se determinar o risco associado a cada curva, uma conduta mais condizente no balanço entre segurança e custos.

Essa por sua vez é uma vantagem verificada decorrente diretamente da formulação proposta, na qual os resultados iniciais a serem avaliados e trabalhados são obtidos de uma comparação localizada entre a chuva média e a chuva pontual, permitindo a análise pura do comportamento do FRA.

5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Como proposto no item 4.2.4 deste trabalho, foi aplicado o teste de *Kolmogorov-Smirnov* para comparação estatística entre amostras retiradas dos resultados de F_{ij} com a finalidade de verificar, com maior segurança, a dependência dos resultados encontrados em relação à área, à duração e ao período de retorno comparando-se a curva de distribuição acumulada de frequências dos resultados, agrupados nos dez cenários estabelecidos anteriormente.

Adiante são apresentados os resultados de cada cenário e as conclusões parciais decorrentes. De acordo com os parâmetros adotados, considerou-se que quando a estatística do teste $p \geq 0,05$ as amostras comparadas possuem distribuições semelhantes, prevalecendo, portanto a hipótese nula.

5.3.1 Cenários A1 e A2

Recordando, no cenário A1 as amostras são agrupadas em função apenas dos raios das áreas circulares, independentemente das demais variáveis. Já em A2 elas são agrupadas em função unicamente da duração das precipitações. A Tabela 5.11 apresenta os resultados da estatística p e a Tabela 5.12 as hipóteses confirmadas (H_0 : 0, H_1 : 1) no cenário A1, analogamente as Tabelas 5.13 e 5.14 apresentam os resultados para o cenário A2:

Tabela 5.11 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário A1.

Raios (km)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,5	---	0.000	0.000	0.000	0.000
1,0	0.000	---	0.000	0.000	0.000
1,5	0.000	0.000	---	0.018	0.000
2,0	0.000	0.000	0.018	---	0.018
2,5	0.000	0.000	0.000	0.018	---

Tabela 5.12 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário A1.

Raios (km)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,5	---	1	1	1	1
1,0	1	---	1	1	1
1,5	1	1	---	1	1
2,0	1	1	1	---	1
2,5	1	1	1	1	---

Dos resultados apresentados, verifica-se que a razão entre a chuva média e a chuva pontual, e portanto o FRA, varia em função da área que se considera, ou seja, o FRA tem uma distribuição estatística que depende do tamanho da área. É provável no entanto que esta tendência reduza conforme as áreas comparadas aumentem. Este comportamento é razoável, pois no caso de eventos extremos para grandes áreas, os fenômenos envolvidos são mais amplos e duradouros, e assim sendo há maior probabilidade de que a distribuição espacial da chuva seja mais homogênea.

Por exemplo, em uma região na qual os eventos mais importantes sejam provocados por chuvas frontais, a duração e área atingida são relativamente grandes e o valor do FRA tende a ficar próximo da unidade para um certo intervalo de durações inferior à da própria frente. No caso de eventos convectivos, a variabilidade espaço-temporal dos eventos é alta e isso se reflete nos resultados do FRA, se distanciando da unidade. Contudo, em uma mesma região climatológica, variando-se suficientemente a área, ambos os tipos de chuvas podem influenciar a determinação do FRA o que irá alterar a distribuição estatística dos resultados conforme a escala de áreas estudadas.

Este cenário reforça a constatação de que o FRA deve se basear em estudos locais e compatíveis com a realidade climatológica da região de emprego, ou seja, focado nas escalas de tempo e espaço que se mostram mais relevantes nos projetos em que será empregado com mais frequência. No caso de estudos com enfoque para pequenas áreas no qual chuvas convectivas sejam os eventos extremos de interesse, como é o caso da bacia empregada, existe uma necessidade de se avaliar o FRA para áreas e durações menores, buscando dimensionamentos mais econômicos e ainda assim seguros. No caso de regiões nas quais os eventos frontais se mostrem mais significativos, o estudo do FRA para áreas e durações mais elevadas deve ser baseado em redes que reflitam esta característica.

Tabela 5.13 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário A2.

Durações (min)	05	10	15	30	45	60	90	120
05	---	0.992	0.610	0.020	0.002	0.005	0.005	0.002
10	0.992	---	0.790	0.037	0.005	0.020	0.010	0.000
15	0.610	0.790	---	0.115	0.067	0.067	0.020	0.005
30	0.020	0.037	0.115	---	0.790	0.790	0.930	0.610
45	0.002	0.005	0.067	0.790	---	0.930	0.930	0.610
60	0.005	0.020	0.067	0.790	0.930	---	1.000	0.790
90	0.005	0.010	0.020	0.930	0.930	1.000	---	0.790
120	0.002	0.000	0.005	0.610	0.610	0.790	0.790	---

Tabela 5.14 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário A2.

Durações (min)	05	10	15	30	45	60	90	120
05	---	0	0	1	1	1	1	1
10	0	---	0	1	1	1	1	1
15	0	0	---	0	0	0	1	1
30	1	1	0	---	0	0	0	0
45	1	1	0	0	---	0	0	0
60	1	1	0	0	0	---	0	0
90	1	1	1	0	0	0	---	0
120	1	1	1	0	0	0	0	---

Em relação às durações observa-se que a distribuição dos resultados somente apresenta diferenças significativas entre durações mais distintas. Entretanto, a tendência de variação da distribuição dos resultados é perceptível e por isso a duração não pode ser negligenciada na construção de equações para o FRA. Portanto, a linha adotada pelo modelo proposto e nos demais, de buscar coeficientes em função não somente da própria área mas como também das durações, é condizente com o comportamento real dos fenômenos.

5.3.2 Cenários B1, B2, C1, C2, D1 e D2

Estas comparações são semelhantes às realizadas anteriormente, entretanto nestes cenários não foram agrupados eventos de ordens diferenciadas como em A1 e A2. Em B foram avaliados o comportamento em função do raio (B1) e da duração (B2) para os eventos de ordem 1 apenas. Da mesma maneira foi feita análise para os eventos de ordem 2 (C1 e C2) e de ordem 3 (D1 e D2). Os resultados para a estatística p e para as hipóteses resultantes são também indicados, nas Tabelas 5.15 a 5.26.

Tabela 5.15 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário B1.

Raios (km)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,5	---	0.000	0.000	0.000	0.000
1,0	0.000	---	0.000	0.000	0.000
1,5	0.000	0.000	---	0.051	0.001
2,0	0.000	0.000	0.051	---	0.216
2,5	0.000	0.000	0.001	0.216	---

Tabela 5.16 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário B1.

Raios (km)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,5	---	1	1	1	1
1,0	1	---	1	1	1
1,5	1	1	---	0	1
2,0	1	1	0	---	0
2,5	1	1	1	0	---

Tabela 5.17 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário B2.

Durações (min)	05	10	15	30	45	60	90	120
05	---	0.890	0.890	0.136	0.051	0.136	0.136	0.136
10	0.890	---	0.998	0.308	0.136	0.136	0.136	0.136
15	0.890	0.998	---	0.308	0.051	0.136	0.136	0.136
30	0.136	0.308	0.308	---	0.308	0.308	0.589	0.589
45	0.051	0.136	0.051	0.308	---	0.308	0.308	0.308
60	0.136	0.136	0.136	0.308	0.308	---	0.998	0.998
90	0.136	0.136	0.136	0.589	0.308	0.998	---	1.000
120	0.136	0.136	0.136	0.589	0.308	0.998	1.000	---

Tabela 5.18 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário B2.

Durações (min)	05	10	15	30	45	60	90	120
05	---	0	0	0	0	0	0	0
10	0	---	0	0	0	0	0	0
15	0	0	---	0	0	0	0	0
30	0	0	0	---	0	0	0	0
45	0	0	0	0	---	0	0	0
60	0	0	0	0	0	---	0	0
90	0	0	0	0	0	0	---	0
120	0	0	0	0	0	0	0	---

No caso dos eventos de maior magnitude observados, ordem 1, os resultados dos testes estatísticos indicam que o FRA permanece dependente da área, porém conforme o tamanho das áreas se eleva, as diferenças entre as distribuições diminuem e o FRA começa a apresentar comportamentos distributivos semelhante. Ressalva-se que o comportamento diz

respeito à distribuição estatística dos valores (frequências acumuladas) e não de valores em si. Em relação à duração, para os eventos de 1ª ordem, cabendo ressaltar que os dados dizem respeito a pouco mais de um ano, as diferenças de comportamento das distribuições dos resultados mostraram-se sem significância suficiente para indicar claramente uma variação. Porém os resultados do valor p indicam que esse quadro poderia ser diferente caso o intervalo de durações fosse maior.

Em outras palavras, a influência da duração na distribuição acumulada de frequência dos resultados para os eventos de 1ª ordem foi pequena. Isso pode indicar que a variabilidade espacial dos eventos pouco se alterou no intervalo de durações testados, sendo portanto, eventos de mesma natureza provavelmente. Novamente, cabe reforçar que esta é uma análise da distribuição de frequência dos resultados e não dos valores em si, que são perceptivelmente diferenciados para cada duração (Figura 5.4 e Tabela 5.30).

Tabela 5.19 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário C1.

Raios (km)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,5	---	0.051	0.000	0.000	0.000
1,0	0.051	---	0.109	0.001	0.000
1,5	0.000	0.109	---	0.051	0.000
2,0	0.000	0.001	0.051	---	0.021
2,5	0.000	0.000	0.000	0.021	---

Tabela 5.20 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário C1.

Raios (km)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,5	---	0	1	1	1
1,0	0	---	0	1	1
1,5	1	0	---	0	1
2,0	1	1	0	---	1
2,5	1	1	1	1	---

Tabela 5.21 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário C2.

Durações (min)	05	10	15	30	45	60	90	120
05	---	0.998	0.998	0.890	0.589	0.589	0.589	0.308
10	0.998	---	0.890	0.890	0.589	0.890	0.589	0.051
15	0.998	0.890	---	0.998	0.998	0.998	0.890	0.589
30	0.890	0.890	0.998	---	0.998	0.998	0.890	0.589
45	0.589	0.589	0.998	0.998	---	0.998	0.890	0.308
60	0.589	0.890	0.998	0.998	0.998	---	0.998	0.308
90	0.589	0.589	0.890	0.890	0.890	0.998	---	0.589
120	0.308	0.051	0.589	0.589	0.308	0.308	0.589	---

Tabela 5.22 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário C2.

Durações (min)	05	10	15	30	45	60	90	120
05	---	0	0	0	0	0	0	0
10	0	---	0	0	0	0	0	0
15	0	0	---	0	0	0	0	0
30	0	0	0	---	0	0	0	0
45	0	0	0	0	---	0	0	0
60	0	0	0	0	0	---	0	0
90	0	0	0	0	0	0	---	0
120	0	0	0	0	0	0	0	---

Para os eventos de ordem 2, os resultados apontam que o comportamento dos coeficientes de FRA também varia em função da área, porém com menor sensibilidade do que a observada para os eventos de ordem 1. Em relação às durações, novamente o FRA se mostrou pouco dependente em termos de distribuição de frequência acumulada, valendo as mesmas considerações para o cenários B2 quanto à possibilidade de que, para intervalos mais amplos de durações, possa haver alteração de comportamento na distribuição de frequências.

Tabela 5.23 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário D1.

Raios (km)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,5	---	0.000	0.000	0.000	0.000
1,0	0.000	---	0.051	0.000	0.000
1,5	0.000	0.051	---	0.216	0.008
2,0	0.000	0.000	0.216	---	0.216
2,5	0.000	0.000	0.008	0.216	---

Tabela 5.24 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por raio conforme linha e coluna indicada - Cenário D1.

Raios (km)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
0,5	---	1	1	1	1
1,0	1	---	0	1	1
1,5	1	0	---	0	1
2,0	1	1	0	---	0
2,5	1	1	1	0	---

Tabela 5.25 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário D2.

Durações (min)	05	10	15	30	45	60	90	120
05	---	0.998	0.890	0.136	0.051	0.051	0.051	0.017
10	0.998	---	0.890	0.051	0.051	0.051	0.017	0.005
15	0.890	0.890	---	0.136	0.136	0.136	0.017	0.017
30	0.136	0.051	0.136	---	0.998	0.998	0.890	0.890
45	0.051	0.051	0.136	0.998	---	0.998	0.890	0.890
60	0.051	0.051	0.136	0.998	0.998	---	0.998	0.890
90	0.051	0.017	0.017	0.890	0.890	0.998	---	0.890
120	0.017	0.005	0.017	0.890	0.890	0.890	0.890	---

Tabela 5.26 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas por duração conforme linha e coluna indicada - Cenário D2.

Durações (min)	05	10	15	30	45	60	90	120
05	---	0	0	0	0	0	0	1
10	0	---	0	0	0	0	1	1
15	0	0	---	0	0	0	1	1
30	0	0	0	---	0	0	0	0
45	0	0	0	0	---	0	0	0
60	0	0	0	0	0	---	0	0
90	0	1	1	0	0	0	---	0
120	1	1	1	0	0	0	0	---

Os resultados referentes à variabilidade do FRA em função da área indicam novamente sensibilidade significativa nos eventos de ordem 3. Quanto à variabilidade em função da duração dos eventos, nesta ordem, para as maiores durações o FRA apresenta comportamentos diferenciados na distribuição de frequências, diferentemente do observado para os eventos de ordens 1 e 2.

Em uma análise global dos cenários B1, B2, C1, C2, D1 e D2 verifica-se que, com pouca diferença relativa à ordem de magnitude, os resultados da taxa entre a chuva média e a chuva pontual, e portanto dos coeficientes de FRA, variam sensivelmente em função da área e também em função da duração, porém como menor sensibilidade no caso do intervalo selecionado, de 05 a 120 minutos. Os resultados estão alinhados com a avaliação geral dos resultados feita por meio dos cenários A1 e A2, porém a desagregação para as diferentes ordens, alterou a sensibilidade evidenciada nas análises.

Na verdade, os resultados relativos às 2ª e 3ª ordens apresentaram uma tendência de menor sensibilidade no comportamento em função da duração e da área. Entretanto, estes eventos quando observados dentro de uma escala absoluta de magnitude não representam na verdade eventos extremos, tendo sido usados apenas para demonstrar as etapas do método proposto quando do interesse na separação de equações diferenciadas em função do período

de retorno. Diante destas considerações, o fato é que são eventos de magnitude mediana e portanto, o comportamento de suas distribuições de frequências acumuladas não pode tem o mesmo impacto que o observado para os eventos de primeira ordem, que são os únicos que realmente representam máximos anuais, ainda que para um período pouco maior que um ano.

5.3.3 Cenários E e F

No cenário E foi avaliada a variação da distribuição acumulada de frequências em função apenas da ordem dos eventos, sem considerar as diferenças existentes devido a área ou duração, já avaliadas isoladamente nos testes anteriores. Os resultados são mostrados nas Tabelas 5.27 e 5.28:

Tabela 5.27 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas apenas em pela ordem conforme linha e coluna indicada - Cenário E.

Ordem	1	2	3
1	---	0.564	0.220
2	0.564	---	0.367
3	0.220	0.367	---

Tabela 5.28 - Resultado do teste de hipóteses nas comparações entre as amostras agrupadas pela ordem conforme linha e coluna indicada - Cenário E.

Ordem	1	2	3
1	---	0	0
2	0	---	0
3	0	0	---

Constata-se que para as amostras deste cenário as distribuições acumuladas de frequências do FRA não variam em função da ordem dos eventos. Por outro lado, os valores da estatística p apontam uma tendência de que para ordens com maior distinção que as testadas possam surgir mudanças no comportamento das distribuições. Ainda, deve ser considerado o fato de que as ordens testadas todas se incluem em um período de observação de aproximadamente um ano e esta análise indireta sobre a influência do período de retorno na distribuição acumulada de frequências do FRA não pode ser conclusiva.

A Tabela 5.29 ilustra os resultados de p no Cenário F, no qual as amostras são agrupadas em função da ordem, porém foram formados grupos distintos de comparação para

cada duração. Isto é, neste caso, foi verificado se em cada duração os testes apontariam diferenças na distribuição acumulada de frequência ao se variar o período de retorno.

Tabela 5.29 - Valor de p nas comparações entre as amostras agrupadas pela duração e ordem conforme linha e coluna indicada - Cenário F.

Duração (min)	Ordem		
	1	2	3
05	---	0.890	0.998
	0.890	---	0.890
	0.998	0.890	---
10	---	0.998	0.890
	0.998	---	0.998
	0.890	0.998	---
15	---	0.589	0.998
	0.589	---	0.589
	0.998	0.589	---
30	---	0.890	0.890
	0.890	---	0.890
	0.890	0.890	---
45	---	0.589	0.308
	0.589	---	0.308
	0.308	0.308	---
60	---	0.890	0.890
	0.890	---	0.589
	0.890	0.589	---
90	---	0.890	0.589
	0.890	---	0.589
	0.589	0.589	---
120	---	0.890	0.308
	0.890	---	0.589
	0.308	0.589	---

Conforme se deduz dos valores da estatística p , todos os testes apontaram a hipótese nula, ou seja, as distribuições das amostras permanecem semelhantes mesmo com este detalhamento. Dos valores acima apontados, verifica-se que os resultados não apresentam uma tendência uniforme e clara. A tendência tênue apontada anteriormente nos testes sem separação em função da duração não se repetiu (Tabela 5.27). Neste sentido, se reforça a necessidade de maiores estudos quanto ao impacto do período de retorno no FRA.

5.4 AJUSTE DAS CURVAS PARA DETERMINAÇÃO DO FRA

O ajuste de curvas e superfícies foi feito considerando-se a média dos resultados fornecidos por cada posto de referência. Isto é, para cada duração e ordem foi ajustada uma curva com cinco pontos. Cada ponto (A, FRA) foi marcado considerando o valor médio de F_{ij} obtido para os três postos. No caso das superfícies a diferença é que todos os pontos para uma mesma ordem foram agrupados, resultando em três superfícies em função da área da duração simultaneamente.

Para casos práticos de aplicação com séries mais longas, é possível e recomendável se realizar um análise estatística dos resultados por área e duração ao invés do emprego da média, possibilitando uma avaliação dos riscos inerentes ao emprego do coeficiente FRA, como já foi abordado anteriormente. Essa análise de riscos pode ser feita mediante a avaliação do comportamento estatístico dos valores de F_{ij} , traçando-se curvas com intervalos de confiança por exemplo.

As regressões para uma variável foram realizadas com emprego do programa EXCEL 2007, usando a ferramenta "Linha de Tendência", com equação logarítmica. Este tipo de equação foi empregado apenas com fins demonstrativos, considerando que o ajuste produzido foi satisfatório na maioria dos casos. Para as regressões em função de duas variáveis foi usado o MATLAB. Para áreas inferiores à menor empregada, 0,79km², os valores indicados pelas equações das curvas não são válidos já que as curvas são assintóticas ao eixo das ordenadas.

A Tabela 5.30 adiante apresenta os valores médios calculados como descrito anteriormente e empregados no ajuste de curvas. As Figuras 5.6 a 5.13 ilustram os resultados obtidos para os ajustes em função apenas da área bem como as equações resultantes. Por fim a Figura 5.14 apresenta as superfícies ajustadas em função tanto da área como da duração.

Tabela 5.30 - Valores médios de F_{ij} empregados no ajuste de curvas FRA.

Duração (min)	Área (km ²)	Ordem 1	Ordem 2	Ordem 3
05	0,79	0.904	0.932	0.909
	3,14	0.814	0.859	0.826
	7,07	0.730	0.792	0.753
	12,57	0.668	0.709	0.685
	19,63	0.614	0.629	0.626
10	0,79	0.911	0.922	0.910
	3,14	0.823	0.852	0.823
	7,07	0.760	0.771	0.749
	12,57	0.706	0.681	0.681
	19,63	0.660	0.595	0.620
15	0,79	0.913	0.957	0.916
	3,14	0.822	0.910	0.839
	7,07	0.752	0.838	0.773
	12,57	0.707	0.735	0.717
	19,63	0.666	0.640	0.667
30	0,79	0.935	0.964	0.954
	3,14	0.878	0.909	0.908
	7,07	0.831	0.833	0.865
	12,57	0.793	0.737	0.820
	19,63	0.755	0.653	0.772
45	0,79	0.955	0.958	0.959
	3,14	0.914	0.899	0.918
	7,07	0.886	0.813	0.877
	12,57	0.852	0.726	0.832
	19,63	0.816	0.646	0.788
60	0,79	0.950	0.959	0.962
	3,14	0.897	0.911	0.924
	7,07	0.859	0.836	0.884
	12,57	0.826	0.749	0.842
	19,63	0.790	0.671	0.799
90	0,79	0.949	0.962	0.957
	3,14	0.895	0.918	0.918
	7,07	0.850	0.853	0.882
	12,57	0.817	0.765	0.849
	19,63	0.782	0.697	0.818
120	0,79	0.949	0.962	0.966
	3,14	0.895	0.922	0.936
	7,07	0.850	0.872	0.901
	12,57	0.817	0.798	0.865
	19,63	0.782	0.736	0.828

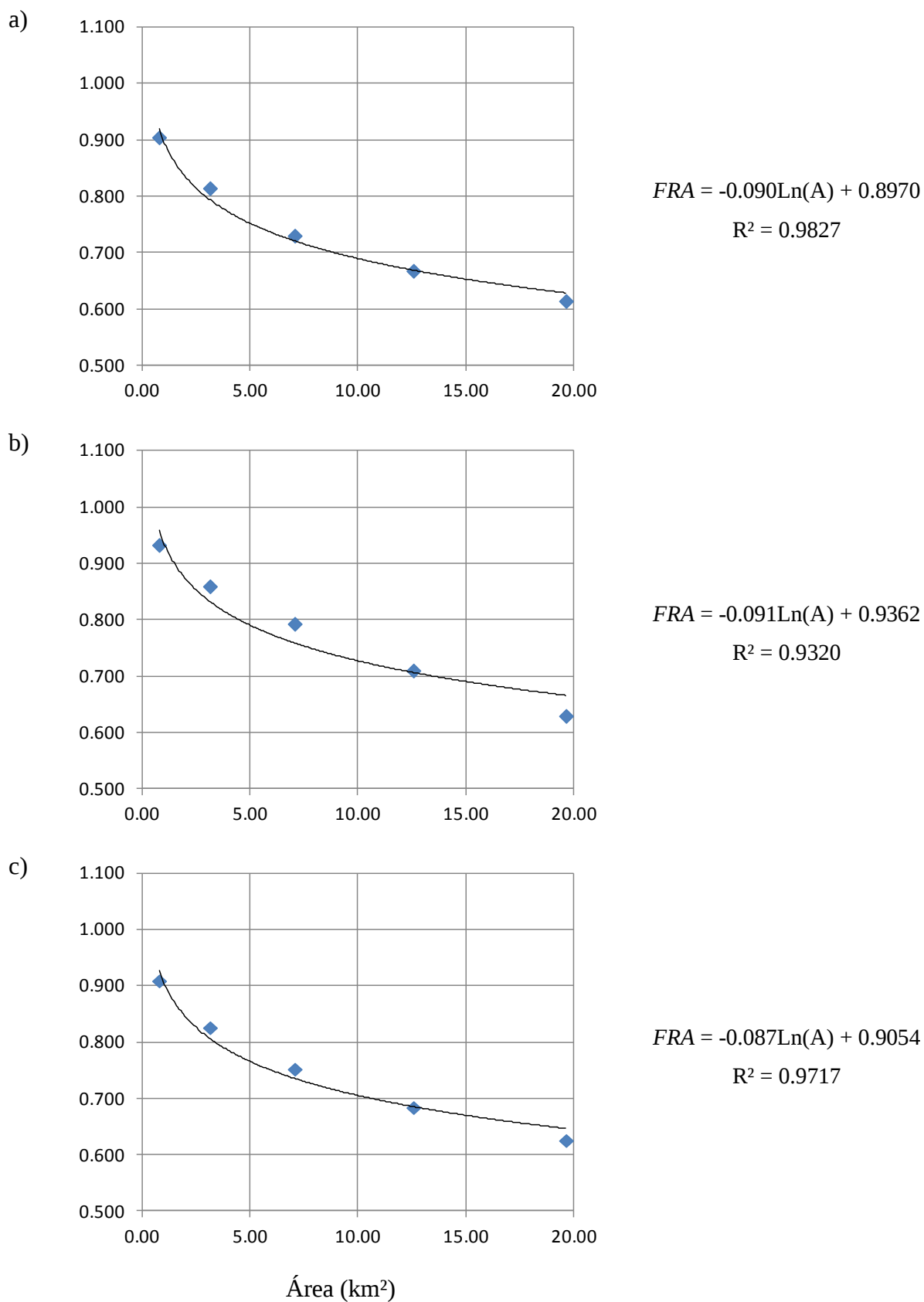


Figura 5.6 - Curvas do FRA - $d = 05$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

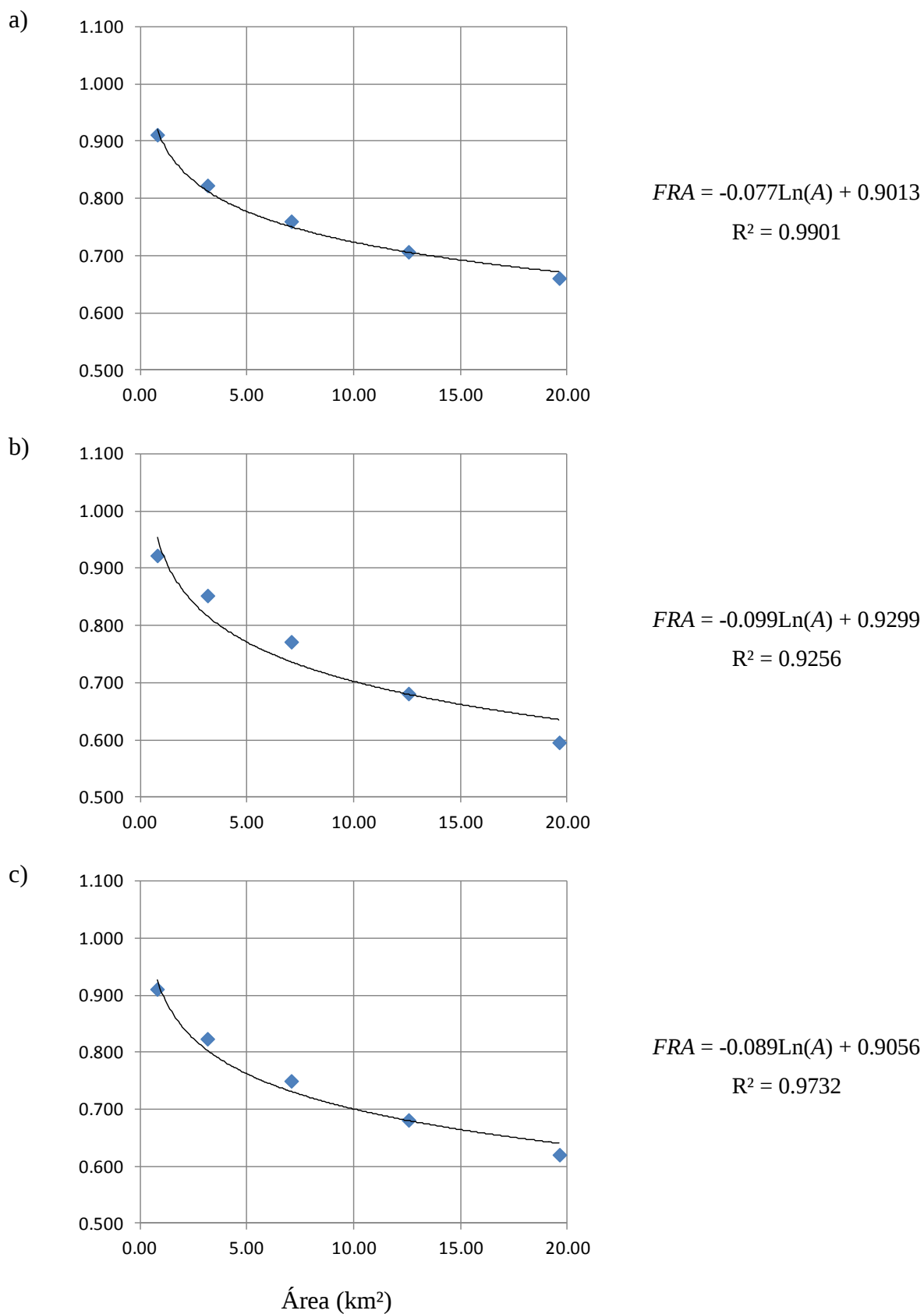


Figura 5.7 - Curvas do FRA - $d = 10$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

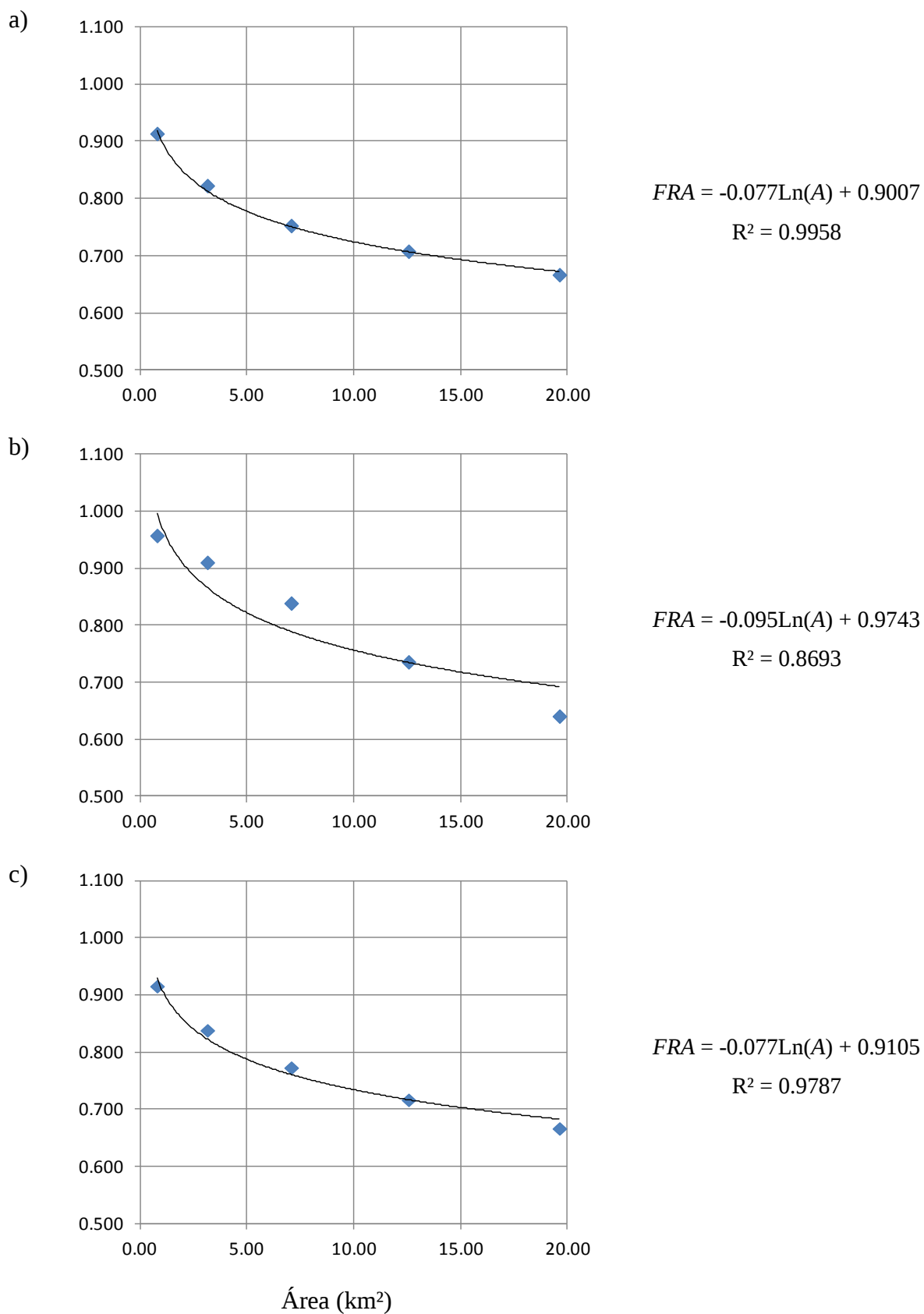


Figura 5.8 - Curvas do FRA - $d = 15$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

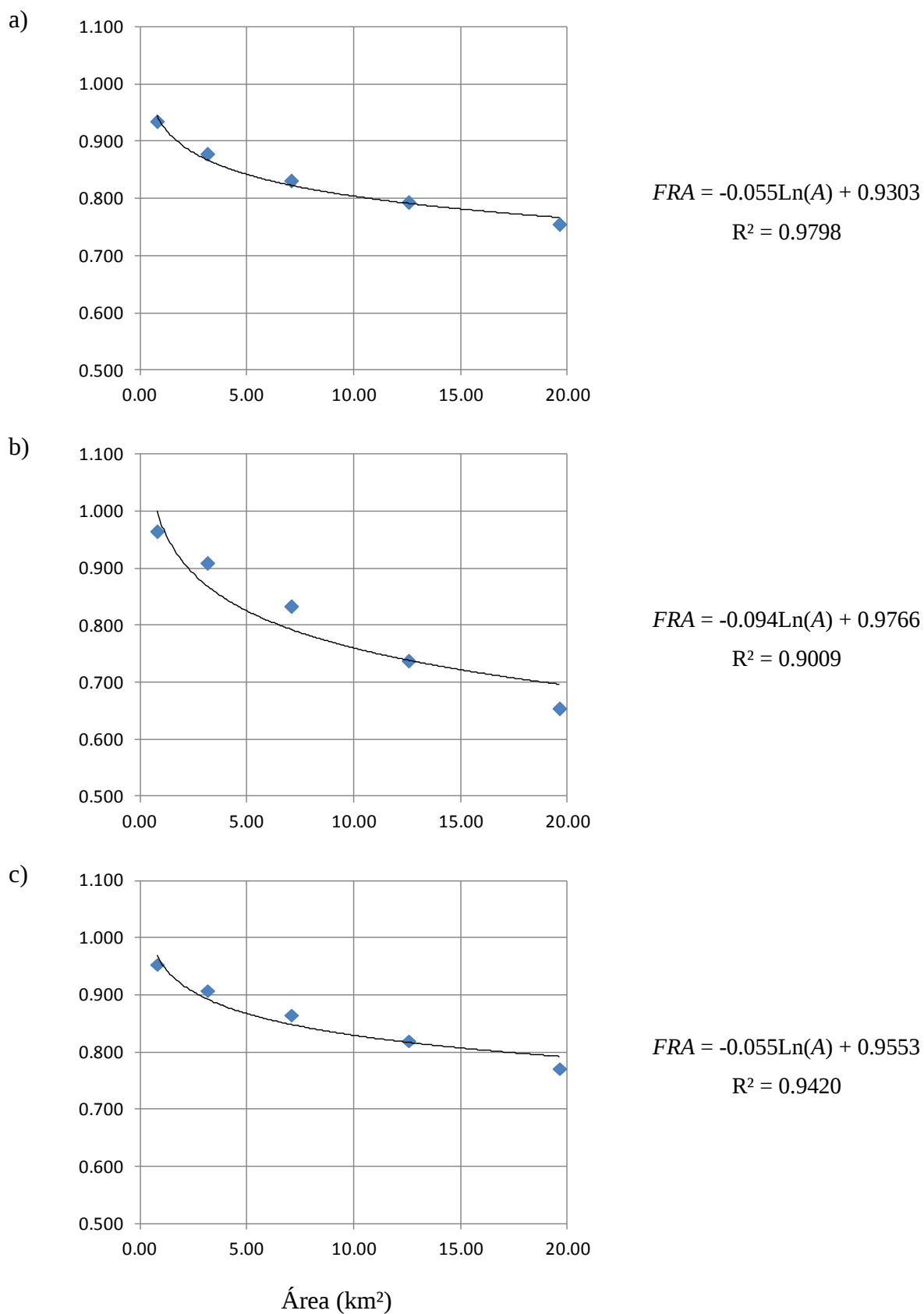


Figura 5.9 - Curvas do FRA - $d = 30$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

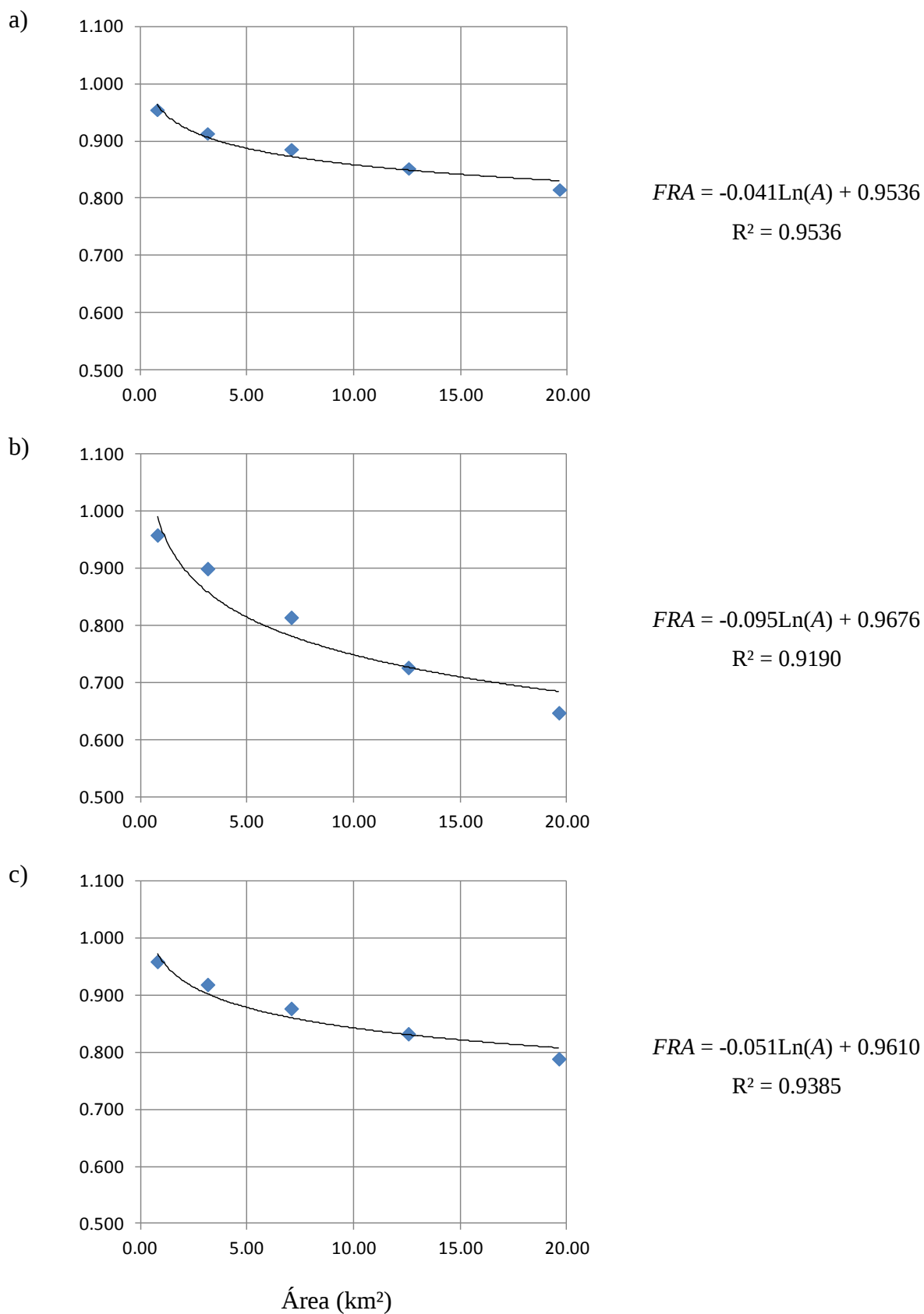


Figura 5.10 - Curvas do FRA - $d = 45$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

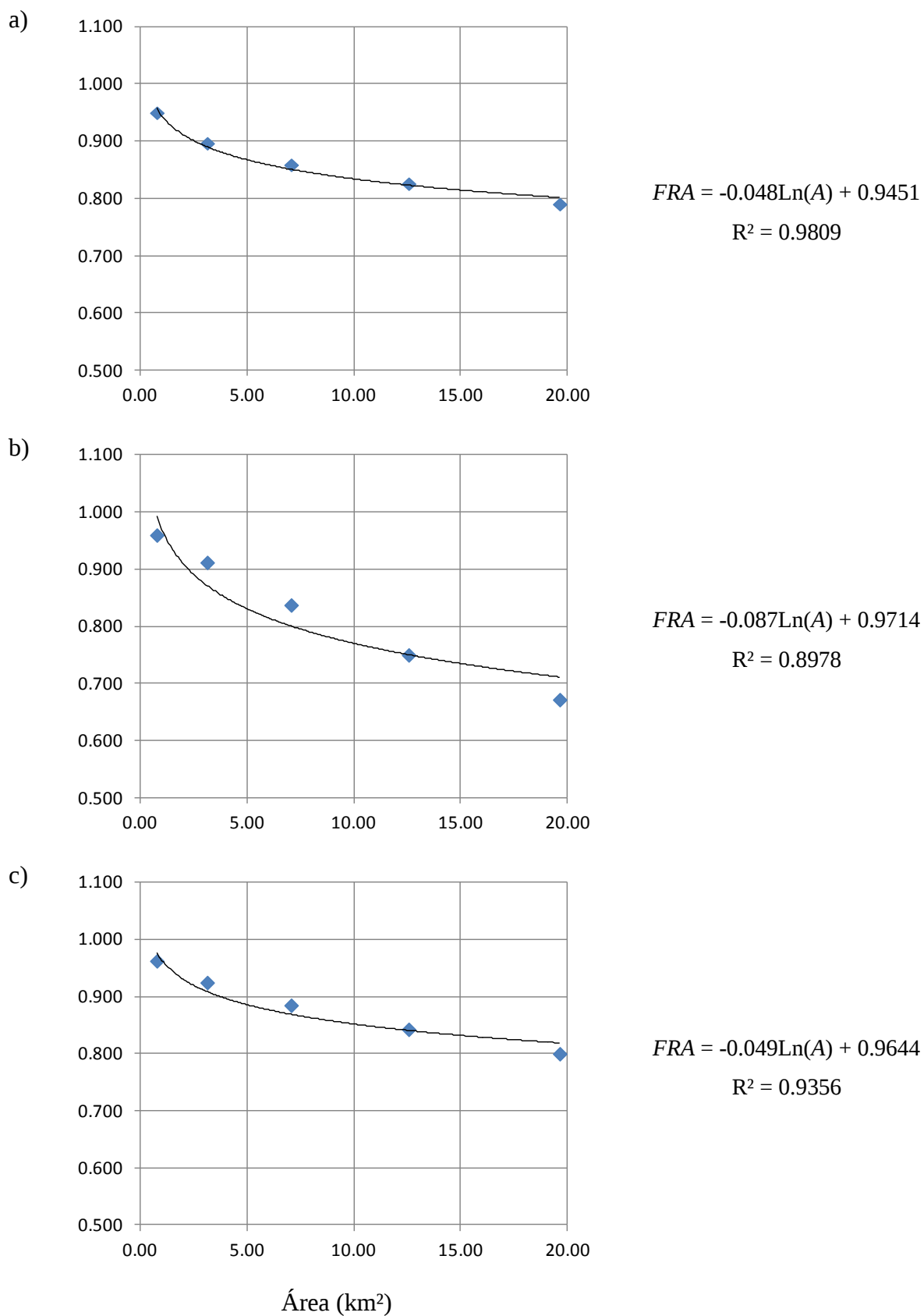


Figura 5.11 - Curvas do FRA - $d = 60$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

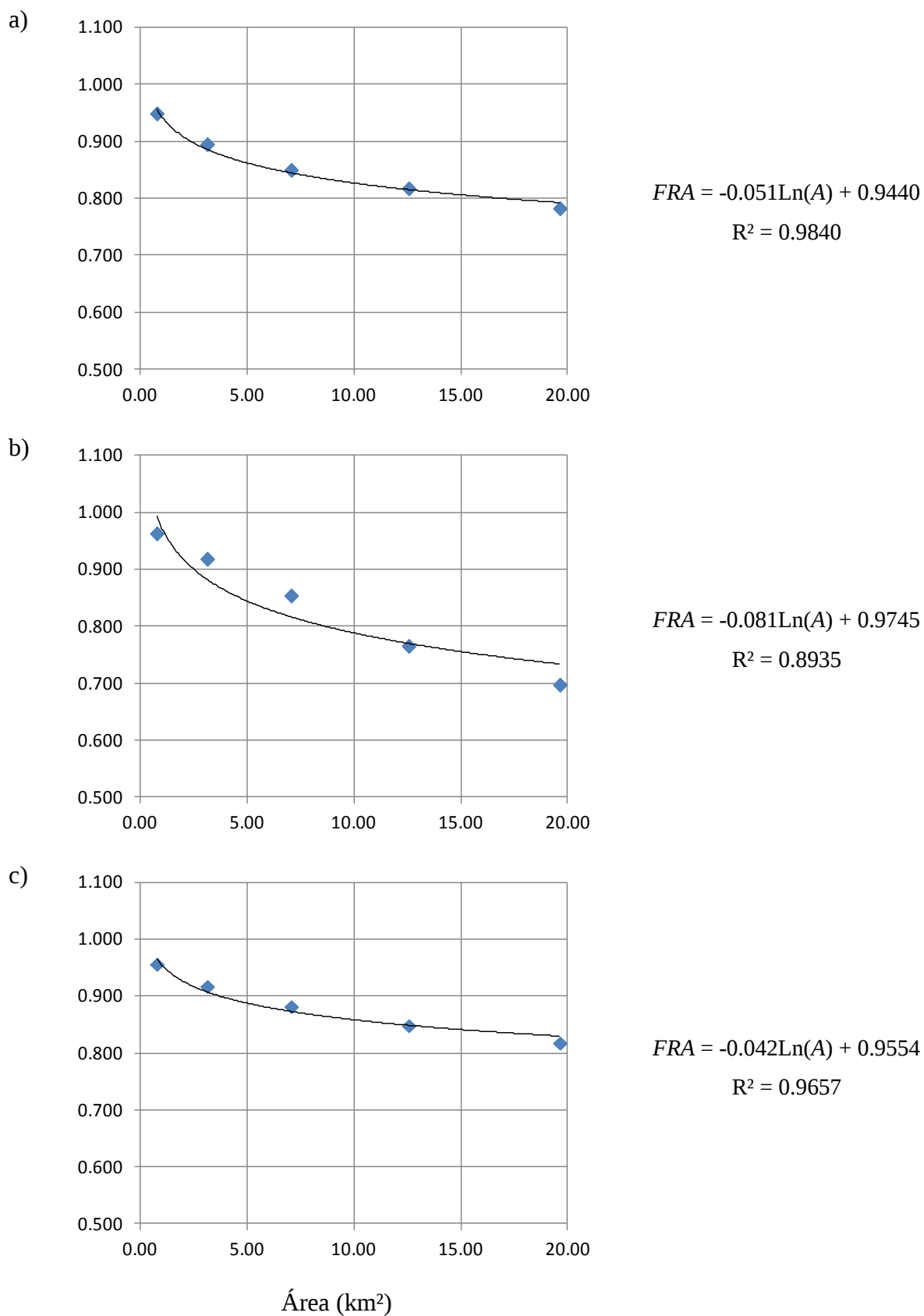


Figura 5.12 - Curvas do FRA - $d = 90$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

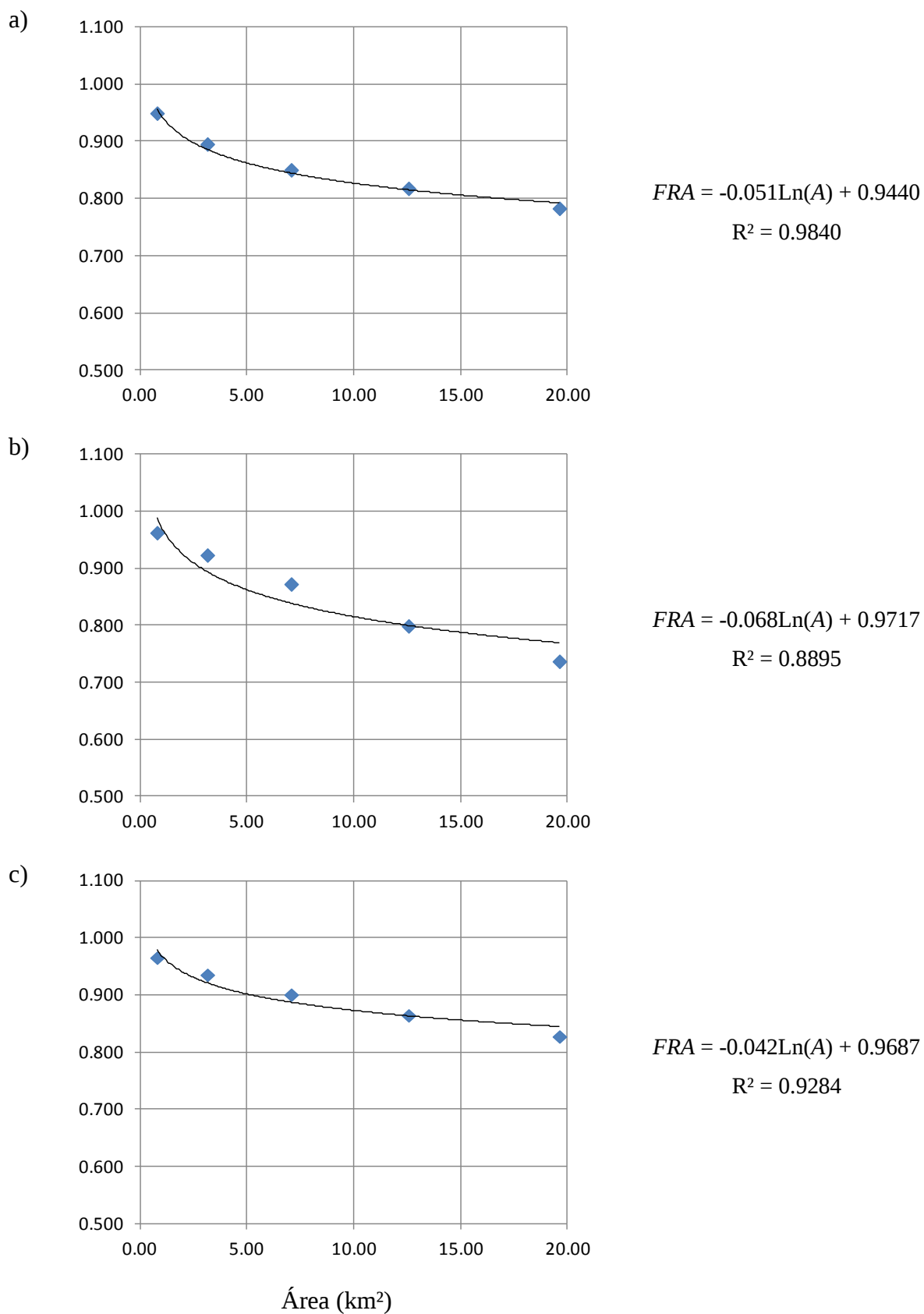


Figura 5.13 - Curvas do FRA - $d = 120$ minutos, eventos de ordem 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

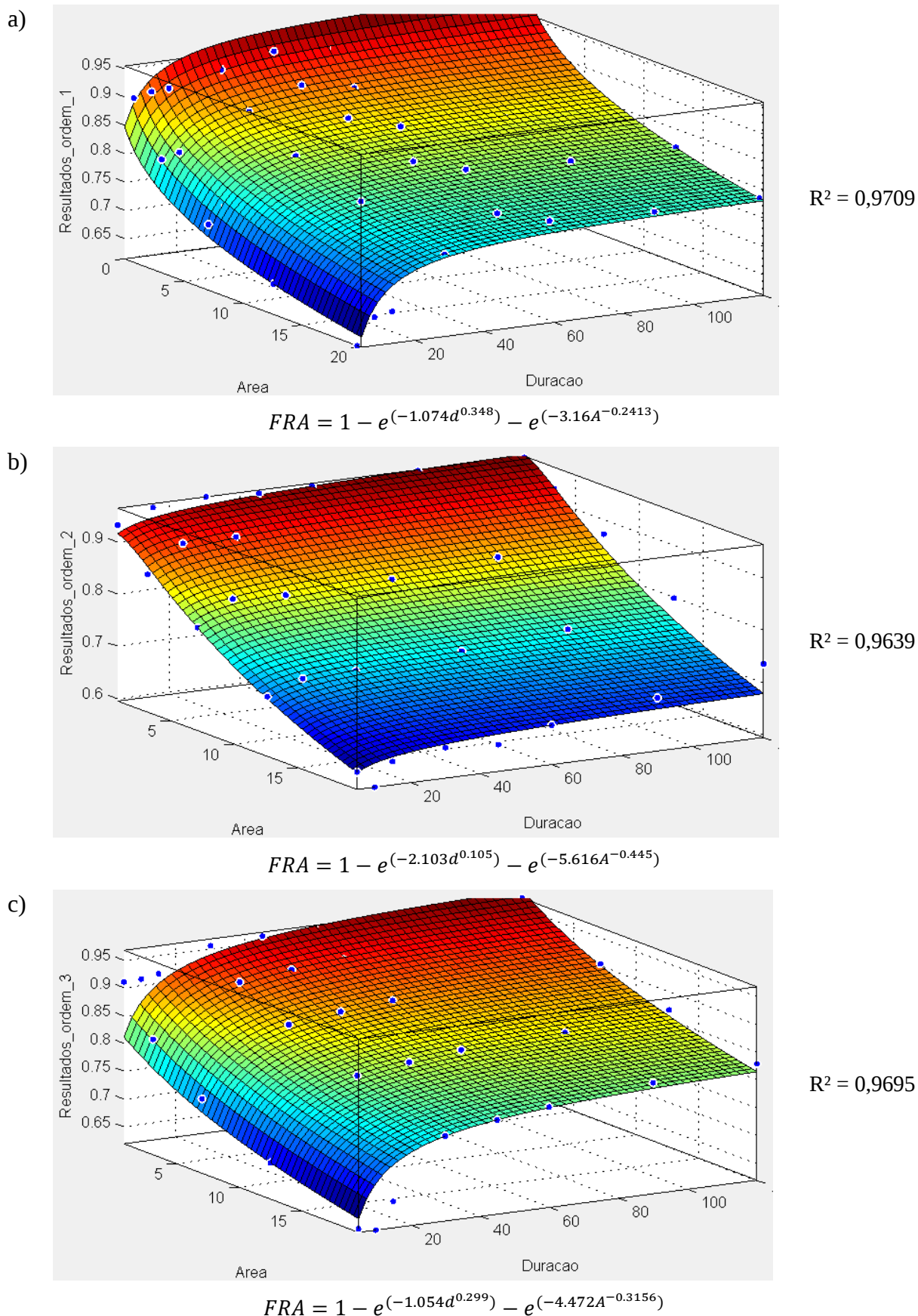


Figura 5.14 - Superfícies do FRA: duração em minutos (d) e área (A) em km² - ordens 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

5.5 COMPARAÇÃO COM VALORES DA LITERATURA PARA O FRA

Conforme disposto na metodologia, item 4.2.5, os resultados obtidos nesta aplicação piloto do método proposto para cálculo do FRA em bacias urbanas foram comparados com valores apresentados pelo USWB, UK e DNIT. Os resultados para o FRA segundo a metodologia proposta são aqueles obtidos com as equações de superfície obtidas para os eventos de ordem 1. A Tabela 5.31 apresenta os valores para comparação direta:

Tabela 5.31 - Comparativo com os valores de FRA sugeridos por diversas metodologias.

Duração (min)	Área (km ²)	USWB	UK	DNIT	Método Proposto
5	5			1,000	0,752
	10			0,905	0,690
	20			0,704	0,627
	50			0,463	0,545
15	5			1,000	0,777
	10			0,964	0,723
	20			0,871	0,670
	50			0,710	0,599
30	5	0,920	0,895	1,000	0,842
	10	0,870	0,875	0,981	0,804
	20	0,800	0,840	0,926	0,766
	50	0,690	0,770	0,820	0,715
60	5	0,965	0,920	1,000	0,868
	10	0,930	0,905	0,989	0,835
	20	0,890	0,880	0,957	0,801
	50	0,795	0,825	0,890	0,757

Observa-se que os valores para o FRA apontados pelos três modelos empíricos escolhidos dentre aqueles da literatura são significativamente diferentes. Entretanto o comportamento de todos é semelhante: decaindo rapidamente com a área e aumentando com a duração. Os resultados obtidos com a equação do DNIT foram os mais conservadores contrapondo-se aos resultados do modelo proposto. É importante ressaltar que o modelo do DNIT é uma adaptação do USWB, desenvolvido com dados dos Estados Unidos da América, porém o mais regional dentre as técnicas revisadas.

Da comparação constata-se suas conclusões: a metodologia desenvolvida deve claramente ser reaplicada em situações com maior disponibilidade temporal de dados, mas

verifica-se que a formulação do mesmo gerou resultados de comportamento semelhantes. A grande diferença dos valores de FRA, indicados por cada um dos métodos consolidados na literatura, revela que, de fato, além do aprimoramento de técnicas para determinação do FRA de forma segura, explicitando-se os riscos preferencialmente, cada técnica deve ser aplicada sobre valores locais ou regionais, condizentes com a realidade climatológica de cada local.

Neste sentido, acredita-se que o modelo proposto corrobore no preenchimento da primeira lacuna, já que é sensível à variabilidade espacial dos eventos e mais fiel ao conceito elementar do FRA.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A adequada avaliação do comportamento espacial dos eventos chuvosos extremos pode conduzir a projetos mais seguros e econômicos, em especial os de drenagem urbana. Neste contexto, o fator de redução de área é o coeficiente empregado na transformação de chuvas de projeto pontuais para chuvas médias espaciais, com mesmo período de retorno. O FRA considera que existe uma redução da razão entre a chuva média e a chuva pontual, proporcional ao incremento da área de interesse. Há, no entanto, a necessidade de estudos regionais e adequados a escala dos problemas de interesse prático a fim de se reduzir incertezas e riscos. No Brasil, em especial na cidade de Goiânia, esta lacuna ainda precisa ser preenchida, principalmente devido a falta de dados contínuos em quantidade e qualidade suficientes.

Na literatura revisada verificou-se que existem diversos métodos e formulações desenvolvidas com o intuito de estabelecer o valor deste coeficiente. Entretanto, não há um consenso sobre qual técnica seria a mais adequada. Os modelos empíricos se mostram mais práticos, contudo a formulação dos mesmos, usualmente substitui a relação ponto área por uma avaliação rede bacia, distorcendo o conceito essencial do FRA. Já os modelos de cunho analítico, apesar da maior complexidade, não apresentam maiores garantias quanto aos resultados fornecidos, principalmente devidos às simplificações fenomenológicas introduzidas em seu equacionamento. Além disso, não foram encontrados modelos desenvolvidos especificamente nas condições climatológicas do Centro-Oeste brasileiro, o que gera insegurança quanto a eventual transposição de outros modelos empíricos, e consequentemente de suas considerações. Portanto, identificou-se a necessidade do desenvolvimento de estudos regionais para cálculo do FRA, na qual se insere a formulação de um método adequado, que é o objetivo deste trabalho.

Neste estudo, foi proposta uma metodologia empírica para o cálculo do FRA, buscando adequação às características climatológicas locais, em especial à variabilidade espacial dos eventos extremos observados em bacias urbanas. O modelo desenvolvido parte da obtenção de resultados locais da razão entre chuvas médias máximas calculadas em áreas circulares e as chuvas pontuais de mesmo período de retorno observadas nos postos centrais das áreas, definidos como F . Os resultados dessas razões nos diversos pontos de medição considerados são então agrupados conforme o tamanho da área, duração e tempo de retorno para então serem feitos os ajustes de regressão. Para o desenvolvimento do método foi necessário escolher uma técnica suficientemente sensível na determinação da chuva média,

tendo sido feitos estudos específicos que apontaram o Método Multiquadric como modelo satisfatório.

A abordagem proposta para cálculo do FRA se mostrou mais fiel ao conceito deste coeficiente, pois a espacialização da chuva pontual extrema é avaliada isoladamente entre cada posto e sua área de influência na etapa inicial, não havendo uma homogeneização de comportamento em função da rede de postos ou da bacia. Também é possível que os ajustes de curvas sejam aliados a análise de riscos por meio de ferramentas estatísticas.

O modelo foi então aplicado com dados obtidos de uma rede implantada na região da bacia do córrego Botafogo, zona urbana de Goiânia, com a intenção de avaliar o atendimento das premissas estabelecidas e a adequação do mesmo ao objetivo proposto. Também foi feita uma análise estatística dos resultados obtidos a fim de verificar a sensibilidade do método às variáveis área, duração e período de retorno. Para tanto foi empregado o teste de *Kolmogorov-Smirnov* entre amostras separadas em função destas variáveis.

Primeiramente, a variabilidade espacial e temporal dos eventos extremos em bacias urbanas foi confirmada após a determinação das séries de precipitação média nos locais e para os intervalos definidos. Os valores de F obtidos apontaram o decaimento do FRA em função da área, como esperado, havendo uma tendência assintótica de estabilização. Observou-se também que o aumento da duração dos eventos tende a aumentar o valor do coeficiente. Para o período de retorno, contudo, não foi possível verificar tendências claras, provavelmente devido ao curto período abrangido pela série de dados empregadas. Ainda, constatou-se que não só os valores do FRA são função das variáveis área e duração, como também sua própria distribuição estatística, ressaltando a necessidade de estudos locais e focados na escala dos problemas de interesse.

Após o ajuste de equações de FRA conforme os resultados do fator F_{ij} obtidos, foi feito um comparativo com demais valores sugeridos por outros modelos empíricos: USWB, UK e DNIT. Apesar da semelhança de comportamento nos resultados de todos os modelos, inclusive o proposto, notou-se que, de fato, os valores são bem diferentes entre si. Por outro lado, os valores encontrados no estudo de caso não tem ainda caráter de aplicação prática, devido ao curto período de observação disponível.

O modelo proposto satisfaz as condições pré-estabelecidas, sendo adequado para aplicação em bacias urbanas, porém não sendo limitado necessariamente a estas. Frente aos modelos empíricos encontrados na literatura, a técnica formulada apresenta, duas vantagens: a maior fidelidade ao conceito real do FRA, devido a análise local entre dos eventos extremos

máximos pontuais e espaciais médios; e a possibilidade de emprego de técnicas mais adequadas na estimativa da chuva média, considerando a variabilidade espacial da chuva; Ainda, é possível também avaliar estatisticamente os riscos das equações eventualmente ajustadas e a consideração da influência do período de retorno.

Sugere-se que sejam feitos novos testes, com maior quantidade de dados e séries mais longas a fim de se reavaliar oportunamente a sensibilidade do mesmo nas condições de interesse bem como para a produção de resultados práticos das equações para obtenção do FRA, ou seja, para emprego efetivamente em projetos.

7 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. J.; DEGAETENO, A. T. Areal reduction factors for two eastern United States regions with high rain-gauge density. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 10, n. 4, p. 327-335, jul./ago. 2005.

ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C.; USART-SANCHEZ, I.; LAVABRE, J. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. **Journal of Hydrology**, v. 250, p. 206-223, 2001.

ASQUITH, W. H.; FAMIGLIETTI, J. S. Precipitation areal-reduction factor estimation using an annual-maxima centered approach. **Journal of Hydrology**, v. 230, p. 55-69, 2000.

BALASCIO, C. C. Multiquadric equations and optimal areal rainfall estimation. **Journal of Hydrology Engineering**, v. 6, n. 6, p. 498-505, nov. 2001.

BARBALHO, F. D.; FORMIGA, K. T. M.; SIQUEIRA, E. Q. Comparison of methods for computation the average rainfall in watersheds. In: 12th International Conference on Urban Drainage, 2011, Porto Alegre. **Proceedings of 12th International Conference on Urban Drainage**, 2011.

BELL, F. C. **The areal reduction factor in rainfall frequency estimation**. Natural Environment Research Council, Report No. 35, Institute of Hydrology. Wallingford, U.K. 1976. 62 p.

BORGA, M.; VIZZACCARO, A. On the interpolation of hydrologic variables: formal equivalence of Multiquadric surface fitting and kriging. **Journal of hydrology**, v. 195, p. 160-171, 1997.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

CAMARGO, E. C.; DRUCKS, S.; CÂMARA, G. Análise Espacial de Superfícies. In: DRUCKS, S. *et al.* **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004, cap. 3.

CARUSO, C.; QUARTA, F. Interpolation methods comparison. **Computer Math. Applic**, v. 35, n. 12, p. 109-126.

DAMANT, C.; AUSTIN, G.L.; BELLON, A.; BROUGHTON, R.S. Errors in the Thiessen Technique for estimating areal rain amounts using weather radar data. **Journal of Hydrology**, v. 62, p. 81-94, 1983.

DIRKS, K. N., HAY, J. E.; STOW, C.D.; HARRIS, D. High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island - Part II: Interpolation of rainfall. **Journal of Hydrology**, v. 208, p. 187-193, 1998.

DISKIN, M.H. Thiessen coefficients by a Monte Carlo procedure. **Journal of hydrology**, v. 8, p. 323-335, 1969.

DISKIN, M.H. On the computer evaluation of Thiessen weights. **Journal of hydrology**, v. 11, p. 69-78, 1970.

DUBRALET, O. Comparing Splines and Kriging. **Computer & Geosciences**, v. 10, p. 327-338, 1984.

HARDY, R. L. Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. **Journal of Geophysical Research**, v. 76, n. 8, p. 1905-1915, 1971.

LEBEL, T.; LABORDE, J. P. A geostatistical approach for areal rainfall statistics assessment. **Stochastic Hydrology and Hydraulics**, v. 2, p. 245-261, 1988.

LEE, P. S.; LYNN, P. P.; SHAW, E. M. Comparison of multiquadric surfaces for the estimation of areal rainfall. **Hydrology Sciences Journal**, v. 19, n. 3, p. 303-317, set. 1974.

MATHERON, G. **The Theory of Regionalized Variables and Its Applications**. 5. ed. Fontainebleau: Ecole Mines, 1971.

MEYNINK, W. J. C.; BRADY, D. K. Areal reduction factors for design storms. In: Hydrology and Water Resources Symposium, 1993, Newcastle, Australia. Institution of Engineers, Australia, **National Conference Publication**, n. 93, p. 257-271, 1993.

MICHELE, C. D.; KOTTEGODA, N. T.; ROSSO, R. The derivation of areal reduction factor of storm rainfall from its scaling properties. **Water Resources Research**, v. 37, n. 12, p. 3247-3252, dez 2001.

MIRANDA, E. E. de; (Coord.). **Brasil em Relevô**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 06 mar. 2011.

MYERS, V. A.; ZEHR, R. M. **A methodology for point-to-area rainfall frequency ratios**. Washington D. C.: U. S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, 1980, 176p.

NICKS, A. D. Space-time quantification of rainfall inputs for hydrological transport models. **Journal of Hydrology**, v. 59, p. 249-260, 1982.

OMOLAYO, A. S. On the transposition of areal reduction factors for rainfall frequency estimation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 145, p. 191-205, 1993.

PANIGRAHY, N; JAIN, S. K.; KUMAR, V.; BHUNYA, P. K. Algorithms for computerized estimation of Thiessen weights. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v.23, n. 4, p. 239-247, jul./ago. 2009.

PEGRAM, G. C.; PEGRAM, G. G. S. Integration of rainfall via multiquadric surfaces over polygons. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 119, n. 2, p. 151-163, fev. 1993.

RODRIGUEZ-ITURBE, I.; MEJÍA, J. M. On the Transformation of point rainfall to areal rainfall. **Water Resources Research**, v. 10, n. 4, p. 729-735, 1974.

SANTOS, E. C. X.; NAGHETTINI, M. Agregação do coeficiente de abatimento espacial à relação intensidade-duração-frequência das precipitações sobre a Região Metropolitana de Belo Horizonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 189-199, jan/mar 2003.

SHAW, E. M.; LYNN, P. P. Areal rainfall evaluation using two surface fitting techniques. **Bulletin of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 17, n. 4, p. 419-433, 1972.

SILVEIRA, A. L. L. Abatimento Espacial da Chuva em Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 2, p. 5-13, abr/jun 2001.

SINGH, V. P. **Hydrology Systems - Watershed Modeling**, v. 2. Englewood Cliffs. NJ.: Prentice Hall, 1988.

SIVALAPAN, M.; BLÖSCHL, G. Transformation of point rainfall to areal rainfall: Intensity-duration-frequency curves. **Journal of Hydrology**, v. 204, p. 150-167, 1998.

SRIKANTHAN, R. **A Review of the Methods for Estimating Areal Reduction Factors for Design Rainfalls**. Australia: Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, 1995. 36 p. ISBN 1 876006 01 3.

SVENSSON, C.; JONES, A. Review of methods for deriving areal reduction factors. **Journal of Flood Risk Management**, v. 3, p. 232-245, jul. 2010.

SYED, K. H.; GOODRICH, D. C.; MYERS, D. E.; SOROOSHIAN, S. Spatial characteristics of thunderstorm rainfall fields and their relation to runoff. **Journal of Hydrology**, v. 271, p. 1-21, 2003.

THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large areas. **Monthly Weather Review**, v. 39, p. 1082-1084, 1911.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2004.

VENEZIANO, D.; LANGOUSIS, A. The areal reduction factor: A multifractal analysis. **Water Resources Research**, v. 41, w07008, DOI 10.1029/2004WR003765, 15 p., 2005.

WEI, T. C.; MCGUINNESS, J. L. **Reciprocal distance squared method: a computer technique for estimating areal precipitation**. USDA-ARS-NC-8, p. 1-23, 1973.