

**Jorge Luís Rodrigues Pedreira de Cerqueira**

## **Estudo Radiometeorológico da Região Amazônica**

### **Tese de Doutorado**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Co-orientador: Mauro Soares de Assis

Rio de Janeiro - RJ, 07 de Abril de 2006



**Jorge Luís Rodrigues Pedreira de Cerqueira**  
**Estudo Radiometeorológico da**  
**Região Amazônica**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Dr. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**  
**Orientador**

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Dr. Mauro Soares de Assis**  
**Co-Orientador**  
UFF

**Dr. Roberto Vicente Calheiros**  
UNESP

**Dr. Erasmus Couto Brazil de Miranda**  
UCP

**Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante**  
UFPA

**Dr. Rodolfo Sabóia Lima de Souza**  
Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 07 de abril de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Jorge Luís Rodrigues Pedreira de Cerqueira**

Graduou-se em Engenharia de Comunicações pelo IME (Instituto Militar de Engenharia) em 1993. Recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Eletromagnetismo Aplicado também pelo IME em 1999. Trabalhou como engenheiro de desenvolvimento na Fábrica de Material de Comunicações e Eletrônica da IMBEL durante 3 anos. Após o mestrado exerceu a função de pesquisador no Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IPD) do Exército Brasileiro. Ministrou diversos cursos de graduação na Universidade Estácio de Sá e no Centro Universitário da Cidade. Foi professor do MBA Gerência em Telecomunicações da FGV. Atualmente é professor de graduação e pós-graduação do Departamento de Engenharia Elétrica do IME.

#### Ficha catalográfica

Cerqueira, Jorge Luís Rodrigues Pedreira de

Estudo radiometeorológico da Região Amazônica / Jorge Luís Rodrigues Pedreira de Cerqueira ; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello ; co-orientador: Mauro Soares de Assis. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

261 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Radiometeorologia. 3. Taxa de precipitação. 4. Radar. 5. Modelo de predição. 6. Diversidade de sítio. 7. Célula de chuva. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Assis, Mauro Soares de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Para Deus, pelo seu Amor.

Para Valeska, minha querida esposa, e para Gabriella, minha amada filha,  
por tudo que elas representam em minha existência;  
pelo amor a mim depositado;  
pela confiança, desprendimento e compreensão;  
e por serem os alicerces que sustentam a minha vida.

## Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Silva Mello, pelo apoio, orientação e suporte oferecidos durante a realização deste trabalho e pela disponibilização dos equipamentos de medição instalados na região.

Ao professor Mauro Assis, por sua amizade, orientação, companheirismo, apoio e disposição durante todo este período de trabalho conjunto, sendo um dos principais responsáveis pela escolha do tema aqui abordado.

Ao Exército Brasileiro e à PUC-Rio pela oportunidade, confiança e meios disponibilizados para a realização desta pesquisa.

As unidades militares do Comando Militar da Amazônia, em especial as equipes pertencentes ao Serviço Rádio do Exército Brasileiro, pelo esforço e dedicação prestados na instalação, manutenção e obtenção das medidas provenientes dos pluviógrafos instalados na região Amazônica.

Ao Sistema de Proteção da Amazônia, em particular ao Departamento de Meteorologia, pela paciência e apoio dados a minha pessoa, disponibilizando os dados dos radares meteorológicos necessários ao êxito do trabalho aqui realizado.

Ao INMET e ao CPTEC do INPE pela disponibilização dos dados pluviométricos existentes na região norte brasileira.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro fornecido através do programa de Ciência e Tecnologia de responsabilidade do Instituto Militar de Engenharia, denominado CT Amazônia, que proporcionou a verba necessária à viabilização da instalação do sistema de medição na região.

A todos os amigos e familiares que de uma certa me apoiaram, incentivaram e ajudaram no cumprimento de minha missão e no êxito deste trabalho.

## Resumo

Cerqueira, Jorge Luis Rodrigues Pedreira de. **Estudo Radiometeorológico da Região Amazônica**. Rio de Janeiro – RJ. 2006. 261p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A região amazônica é uma extensa área de grande importância política e estratégica para o futuro do Brasil. Por suas características, tais como, a distâncias entre cidades e vilarejos, a impenetrabilidade da floresta, a dificuldade de construção de rodovias, etc. é imediato constatar a importância primordial de ser atendida por sistemas de telecomunicações sem fio, particularmente de redes via satélite, eficientes e confiáveis. Qualquer operação militar ou civil na região, como o próprio sistema SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia) ou qualquer sistema de comando e controle necessita, para o seu êxito, do planejamento correto dos sistemas de comunicações via satélite fundamentais para a defesa e a manutenção da soberania e da integridade territorial da região, diretamente relacionado ao conceito de segurança nacional. O problema é que, devido à necessidade de descongestionar o uso do espectro, tais sistemas passaram a utilizar frequências acima de 10 GHz de forma mais intensa. Esta situação tornou primordial a avaliação dos efeitos da precipitação sobre a propagação dos sinais radioelétricos. O planejamento dos atuais sistemas de comunicações por satélite que operam nas bandas Ka (12 – 18 GHz) e Ku (18 – 30 GHz) está, nos dias de hoje, fortemente dependente da atenuação produzida pela chuva, que delimita, na maioria dos casos, até mesmo a sua disponibilidade. Neste contexto, o presente trabalho procura contribuir através de um estudo radiometeorológico da região Amazônica. O levantamento e a análise de informações sobre a chuva permite a obtenção de parâmetros a serem utilizados no aprimoramento e no desenvolvimento de modelos que visam à otimização dos projetos de novos sistemas de comunicações e/ou a expansão de sistemas existentes. Tendo em vista que, no processo de avaliação do efeito da chuva sobre o sinal, a distribuição estatística da taxa de precipitação de um determinado local é um parâmetro meteorológico essencial, foram realizadas medidas em nove localidades da

Amazônia, por uma rede de pluviógrafos do tipo caçamba basculante, instalada na região com este objetivo específico. As distribuições estatísticas cumulativas da taxa de precipitação, anual e para o pior mês, foram levantadas e processadas, assim como confrontadas com os modelos de predição atuais de forma a avaliá-los quanto à aplicabilidade na região. O modelo atualmente adotado pela Recomendação do UIT-R<sup>1</sup> P.837-4, foi cuidadosamente investigado, sendo proposta a atualização de alguns de seus parâmetros, objetivando aprimorar o desempenho na região. O comportamento dinâmico da precipitação e o conseqüente efeito sobre a propagação dos sinais foram discutidos e comentados os aspectos onde este conhecimento é fundamental para a implementação de técnicas de melhoria para aumentar a confiabilidade dos sistemas. Foi também realizado, com base em dados provenientes dos radares meteorológicos do SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia), um estudo da estrutura espacial da precipitação, de grande utilidade no aprimoramento de modelos físicos de predição da atenuação por chuva. Neste particular, foi possível tratar nesta tese questões como a relação Z-R (refletividade-precipitação) para os radares e a determinação das dimensões horizontais e vertical da célula de chuva. Por fim, foi desenvolvido um modelo matemático para representar o comportamento estatístico de duas células de chuva, separadas por uma dada distância, com a finalidade de fornecer subsídios para a interpretação física do funcionamento da técnica de diversidade de sítio em um sistema de comunicações por satélite.

## Palavras-chave

Radiometeorologia; precipitação, radar, distribuição estatística da taxa de precipitação, modelo de predição, diversidade de sítio, célula de chuva.

---

<sup>1</sup> UIT-R – Setor de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações

## Abstract

Cerqueira, Jorge Luis Rodrigues Pedreira de. **Radiometeorological Study in the Amazon Region**. Rio de Janeiro – RJ. 2006. 261p. DSc Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Brazilian Amazon is a very large equatorial region, covered by a dense jungle and located in the North of Brazil. Its political and strategic importance is nationally recognized. Consequently, wireless communications play a fundamental role under the point of view of its development, support to its inhabitants and state security. In this context, the main motivation for the work described in this dissertation was the possibility of contributing to the progress of the Amazon region. Nowadays, the use of frequencies above 10 GHz is growing fast, not only as a solution to overcome the problem of spectrum congestion, but also to increase the capacity of telecommunications systems. Unfortunately, these frequencies are strongly affected by precipitation. Once the equatorial climate is characterized by heavy rain, a radiometeorological study in the Amazon region seems to be essential for acquiring the information needed to improve the project criteria and the performance analysis of communication systems in this area. The first step in the investigation reported here was a study about the climate of the Amazon region. Köppen classification was adopted because its structure depends on temperature, precipitation and vegetation, factors that can be related to the statistical distribution of rain in a given area. According to this classification, the climate in the Amazon region is a tropical rainy (A), where 3 subtypes can be identified: Rainy equatorial (Af); Monsoon tropical (Am); Wet-and-dry tropical (Aw). The rainfall characteristics analysis was carried out with data from a pluviograph network covering the region of interest and consisting of 9 (nine) rain gauges. Tipping bucket rain gauges were used, in which, each tip corresponds to 0.1mm rainfall, the integration time being one minute and measuring a maximum precipitation rate of 240 mm/h. Complementary radar data from the SIPAM (Amazon system protection) network were also taken into account in this research. Radars operate in the frequency of 2.8 GHz (S-band),



with 4.3m parabolic antennas and a maximum coverage of 400km. Based on precipitation measurements carried out for a period of one year (June 2004 to May 2005), a detailed study of rainfall rate distribution was developed. Both annual and monthly cumulative distributions were derived. Three mathematical models available in the literature for predicting the cumulative distribution of rainfall rate were compared and tested against the experimental data available. The Salonen-Baptista (S-B) was taken as reference in this dissertation. The reason for choosing this model was its global coverage and its dependence on meteorological parameters available in the region under study, allowing to be continuously extended over a large area. Additionally, this model is the basis of ITU-R Recommendation P.837-4. On the other hand, as radar measurements are of paramount importance in the analysis of the spatial structure of rain, based on the classical relation  $Z(\text{mm}^6/\text{m}^3) = a[R(\text{mm/h})]^b$  the conversion between radar reflectivity ( $Z$ ) and rainfall rate ( $R$ ) were carefully investigated. The experimental data from rain gauge and radar networks have allowed the examination of different questions: a) Dynamic behaviour of the rainfall rate; b) Horizontal and vertical distribution of rain; c) Correlation of rainfall rate measured in two points separated by a given distance. In each case, the use of the final results to the analysis of problems related to telecommunication systems was pointed out. Due to its relevance in the Amazon region, the application to satellite communications was emphasized.

## Keywords

Radiometeorology; precipitation, radar, distribution of rainfall rate; prediction model; rain cell.

## Sumário

1 Introdução	24
1.1. Descrição do problema e motivação	24
1.2. Objetivos e contribuições	30
1.3. Roteiro do trabalho	32
2 Caracterização climática da região Amazônica	34
2.1. Caracterização da chuva em climas tropicais e equatoriais	34
2.2. Classificação climática de Köppen	37
2.3. Classificação climática de Köppen para região Amazônica	39
3 Medição de precipitação na região Amazônica	44
3.1. Rede de pluviômetros instalados	44
3.1.1. Pluviômetro utilizado no sistema de medição	44
3.1.2. Instalação dos sistemas de medição	45
3.2. Análise dos dados de taxa de precipitação	49
3.2.1. Formulação matemática	49
3.2.2. Distribuição cumulativa anual da taxa de precipitação	51
3.2.3 Análise das distribuições anuais	56
3.2.4. Distribuição cumulativa para o pior mês medida na região	57
3.2.5. Análise das distribuições para o pior mês	63
4 Modelos de predição de precipitação na região Amazônica	64
4.1. Introdução aos modelos de predição da distribuição estatística de precipitação	64
4.2. Modelos de predição da distribuição cumulativa anual da taxa de precipitação	65
4.2.1. Funções matemáticas	65
4.3. Modelo para distribuição cumulativa da taxa de precipitação para o pior mês	80
4.4. Variação ano a ano das distribuições cumulativas da taxa de precipitação	83
4.4.1. Variabilidade em Boa Vista	89
5 Análise do modelo da U.I.T.-R P. 837-4	92
5.1. Modelo Salonen-Baptista	92
5.2. Comparação de resultados entre o modelo da Recomendação U.I.T.-R P.837-4 e medidas na região em estudo	94
5.3. Proposta de alteração do modelo da Recomendação U.I.T.-R P.837-4	96
5.3.1. Análise de novos parâmetros meteorológicos para o modelo	96
5.3.2. Análise de uma nova formulação para o modelo	102
5.4. Análise de novas medidas para proposta de atualização do modelo da Recomendação U.I.T.-R P.837-4	106
5.5. Proposta de novos parâmetros meteorológicos para modelo da Recomendação U.I.T.-R P.837-4	111

6 Características dinâmicas da taxa de precipitação na região Amazônica	117
6.1 Introdução	117
6.2. Comportamento estatístico da duração e do número de eventos de chuva	119
6.3. Variações horárias e mensais da precipitação	130
7 Radar meteorológico	137
7.1. Conceitos básicos	137
7.2. Os radares do SIPAM	146
7.3. Definição da relação $Z \times R$ para radares meteorológicos	150
7.4. Distribuições estatísticas da refletividade e da taxa de precipitação obtida pelos radares	155
8 Estrutura horizontal da célula de chuva	170
8.1. Procedimentos iniciais	170
8.2. Considerações sobre o número de células	175
8.3. Considerações sobre as dimensões da célula de precipitação	180
8.4. Modelagem das dimensões horizontais da célula de precipitação	190
8.5. Aplicação na técnica de diversidade de sítio	195
9 Estrutura vertical da célula de chuva	202
9.1. Introdução	202
9.2. Altura da isoterma de 00 C	203
9.3. Tipo de chuva em função do perfil vertical	204
10 Conclusão	216
Referências bibliográficas	221
Anexo A Trabalhos Publicados	237

## Lista de figuras

Figura 1 Adaptação da classificação climática de Köppen para o Brasil [21].	38
Figura 2 Diferenciação das regiões quanto ao número de meses secos no ano [16].	40
Figura 3 Variação típica mensal da temperatura, eixo da direita em °C, e da precipitação acumulativa, eixo da esquerda em mm, para o subclima Af – localidade de Cruzeiro do Sul no Acre.	41
Figura 4 Variação típica mensal da temperatura, eixo da direita em °C, e da precipitação acumulativa, eixo da esquerda em mm, para o subclima Am – localidade de Santarém no Pará.	42
Figura 5 Variação típica mensal da temperatura, eixo da direita em °C, e da precipitação acumulativa, eixo da esquerda em mm, para o subclima Aw – localidade de Boa Vista em Roraima.	42
Figura 6 Diferenciação da região através da classificação climática de Köppen.	43
Figura 7 Pluviógrafo de caçamba basculante.	45
Figura 8 Foto de um dos pluviógrafos instalados na região Amazônica. Localidade de Santarém-PA.	46
Figura 9 Foto de um dos pluviógrafos instalados na região Amazônica. Localidade de Macapá-AM.	47
Figura 10 Distribuição geográfica dos sítios de medição na região Amazônica.	47
Figura 11 Comparação entre distribuições cumulativas de taxa de precipitação utilizando método 1 ( $\frac{3}{4}$ ) ou método 2 ( - - - ) no cálculo da taxa de precipitação média.	50
Figura 12 Comparação entre as distribuições cumulativa da taxa de precipitação em São Gabriel da Cachoeira para 82% de disponibilidade ( $\frac{3}{4}$ ) e para 100% (com preenchimento) de disponibilidade ( - - - ).	52
Figura 13 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em Belém ( $\frac{3}{4}$ ) e Cruzeiro do Sul ( - - - ).	53

Figura 14 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em Macapá ( $\frac{3}{4}$ ) e Boa Vista (- - -).	53
Figura 15 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em Santarém ( $\frac{3}{4}$ ) e Manaus (- - -).	54
Figura 16 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em São Gabriel da Cachoeira ( $\frac{3}{4}$ ) e Tabatinga (- - -).	54
Figura 17 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em Ponta das Lages ( $\frac{3}{4}$ ).	55
Figura 18 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em Belém: pior mês ( $\frac{3}{4}$ ) e anual (- - -).	58
Figura 19 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em Boa Vista: pior mês ( $\frac{3}{4}$ ) e anual (- - -).	59
Figura 20 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em Cruzeiro do Sul: pior mês ( $\frac{3}{4}$ ) e anual (- - -).	59
Figura 21 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em Macapá: pior mês ( $\frac{3}{4}$ ) e anual (- - -).	60
Figura 22 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em Manaus: pior mês ( $\frac{3}{4}$ ) e anual (- - -).	60
Figura 23 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em Santarém: pior mês ( $\frac{3}{4}$ ) e anual (- - -).	61
Figura 24 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em São Gabriel da Cachoeira: pior mês ( $\frac{3}{4}$ ) e anual (- - -).	61
Figura 25 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação em Tabatinga: pior mês ( $\frac{3}{4}$ ) e anual (- - -).	62
Figura 26 Comparação entre a distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida em Cruzeiro do Sul ( $\frac{3}{4}$ ) e as distribuições estimadas pela função de Weibull (3p) ( $\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$ ) e Paraboni (- - -).	72
Figura 27 Comparação entre a distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida em Cruzeiro do Sul ( $\frac{3}{4}$ ) e as distribuições estimadas pela função de Moupfouma (3p) ( $\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$ ) e Salonen-Baptista (- - -).	72

Figura 28 Comparação entre a distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida em Cruzeiro do Sul ( $\frac{3}{4}$ ) e as distribuições estimadas pela função de Weibull (3p) $(\frac{3}{4} - \frac{3}{4})$ e Paraboni ( - - - ) para percentagens de tempo menor do que 0,5%.	74
Figura 29 Comparação entre as distribuições cumulativa da taxa de precipitação no pior mês em Belém: medido ( - - - ) , ajuste com parâmetro da tabela 13 ( - - - ), ajuste com parâmetro global U.I.T. $(\frac{3}{4} - \frac{3}{4})$ e ajuste com parâmetro geral região $(\frac{3}{4}\frac{3}{4})$ .	82
Figura 30 Comparação entre as distribuições cumulativa da taxa de precipitação no pior mês em Santarém: medido ( - - - ) , ajuste com parâmetro da tabela 13 ( - - - ), ajuste com parâmetro global U.I.T. $(\frac{3}{4} - \frac{3}{4})$ e ajuste com parâmetro geral região $(\frac{3}{4}\frac{3}{4})$ .	82
Figura 31 Variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida em Belém: medidas anteriores $(\frac{3}{4})$ e atual ( - - - ).	84
Figura 32 Variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida em Manaus, medidas anteriores $(\frac{3}{4} - \frac{3}{4})$ e atual ( - - - ) e em Ponta das Lages $(\frac{3}{4})$ .	84
Figura 33 Variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação, variando janela de 1 mês, em Cruzeiro do Sul.	87
Figura 34 Variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação, variando janelas de 1 mês, em Macapá.	87
Figura 35 Variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação anual em Boa Vista. Primeiro ano de medição	89
Figura 36 Variação da distribuição cumulativa da taxa de precipitação, em Boa Vista, para o mês de setembro de 2003 $(\frac{3}{4}\frac{3}{4})$ e setembro de 2004 ( - - - ).	90
Figura 37 Comparação entre modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com parâmetros meteorológicos do modelo ( - - - ), modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com novos parâmetros meteorológicos (tabela 17) $(\frac{3}{4} - \frac{3}{4})$ e medida em Belém $(\frac{3}{4})$ .	98
Figura 38 Comparação entre modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com parâmetros meteorológicos do modelo ( - - - ), modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com novos parâmetros meteorológicos (tabela 17) $(\frac{3}{4} - \frac{3}{4})$ e medida em Boa Vista $(\frac{3}{4})$ .	99
Figura 39 Comparação entre modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com parâmetros meteorológicos do modelo ( - - - ), modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com novos parâmetros meteorológicos (tabela 17) $(\frac{3}{4} - \frac{3}{4})$ e medida em Cruzeiro do Sul $(\frac{3}{4})$ .	99

Figura 40 Comparação entre modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com parâmetros meteorológicos do modelo (- - -), modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com novos parâmetros meteorológicos (tabela 17) ( $\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$ ) e medida em Macapá ( $\frac{3}{4}$ ).	100
Figura 41 Comparação entre modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com parâmetros meteorológicos do modelo (- - -), modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com novos parâmetros meteorológicos (tabela 17) ( $\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$ ) e medida em Manaus ( $\frac{3}{4}$ ).	100
Figura 42 Comparação entre modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com parâmetros meteorológicos do modelo (- - -), modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com novos parâmetros meteorológicos (tabela 17) ( $\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$ ) e medida em Santarém ( $\frac{3}{4}$ ).	101
Figura 43 Comparação entre modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com parâmetros meteorológicos do modelo (- - -), modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com novos parâmetros meteorológicos (tabela 17) ( $\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$ ) e medida em São Gabriel da Cachoeira ( $\frac{3}{4}$ ).	101
Figura 44 Comparação entre modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com parâmetros meteorológicos do modelo (- - -), modelo da Rec. U.I.T.-R P.837-4 com novos parâmetros meteorológicos (tabela 17) ( $\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$ ) e medida em Tabatinga ( $\frac{3}{4}$ ).	102
Figura 45 Comparação entre melhor ajuste da função Salonen-Baptista (- - -), modelo da Recomendação U.I.T.-R P.837-4 com novos parâmetros meteorológicos (tabela 18) ( $\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$ ) e medida em Macapá ( $\frac{3}{4}$ ).	103
Figura 46 Plataforma de coleta de dados (PCD) do CPTEC.	106
Figura 47 Comparação entre modelo da recomendação da U.I.T.-R P. 837-4 com parâmetros meteorológicos da tabela 17 (- - -), e com parâmetros meteorológicos da tabela 21 ( $\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$ ) e medida ( $\frac{3}{4}$ ) para o sítio de Cruzeiro do Sul.	110
Figura 48 Distribuições cumulativas da duração de um evento relacionado à superação da taxa de 50mm/h pela chuva: Belém (- - - -) , Boa Vista (- - -), Cruzeiro do Sul ( $\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$ ) e Macapá ( $\frac{3}{4}$ $\frac{3}{4}$ ).	124
Figura 49 Distribuições cumulativas da duração de um evento relacionado à superação da taxa de 50mm/h pela chuva: Manaus (- - - -) , Santarém (- - -), São Gabriel da Cachoeira ( $\frac{3}{4}$ - $\frac{3}{4}$ ) e Tabatinga ( $\frac{3}{4}$ $\frac{3}{4}$ ).	124

Figura 50 Comparação entre a distribuições cumulativas da duração de um evento relacionado à superação da taxa de 30mm/h medida em Belém ( - - - ) e ajustada ( $\frac{3}{4}\frac{3}{4}$ ).	127
Figura 51 Variação da duração do evento com a taxa de precipitação excedida, em uma percentagem fixa, para a localidade de Belém.	128
Figura 52 Variação da duração média do evento com a taxa de precipitação para o local para Belém ( - - - - ) , Boa Vista ( - - - ), Cruzeiro do Sul ( $\frac{3}{4} - \frac{3}{4}$ ) e Macapá ( $\frac{3}{4}\frac{3}{4}$ ).	129
Figura 53 Variação da duração média do evento com a taxa de precipitação para o local para Manaus ( - - - - ) , Santarém ( - - - ), São Gabriel da Cachoeira ( $\frac{3}{4} - \frac{3}{4}$ ) e Tabatinga ( $\frac{3}{4}\frac{3}{4}$ ).	129
Figura 54 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Belém.	131
Figura 55 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Boa Vista.	131
Figura 56 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Cruzeiro do Sul.	132
Figura 57 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Macapá.	132
Figura 58 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Manaus.	133
Figura 59 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Santarém.	133
Figura 60 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de São Gabriel da Cachoeira.	134
Figura 61 Variação do acumulado de precipitação pelo decorrer do dia para a cidade de Tabatinga.	134
Figura 62 Variação da percentagem de uma determinada taxa de precipitação ser excedida em um determinado horário do dia. Cidade de Belém.	135
Figura 63 Variação da percentagem de uma determinada taxa de precipitação ser excedida em um determinado mês do ano. Cidade de Cruzeiro do Sul.	136
Figura 64 Esquema do funcionamento do radar.	138



Figura 65 Variação do fator de refletividade do radar (Z) em função da altitude [89].	144
Figura 66 Exemplo de perfil de Z com altura contendo faixa de “melting layer”.	145
Figura 67 Radar meteorológico do SIPAM.	147
Figura 68 Exemplo de CAPPI gerado pelo radar do SIPAM.	148
Figura 69 Exemplo de RHI gerado pelo radar do SIPAM.	149
Figura 70 Comparação entre a distribuição de Z existente (---) e a distribuição de Z com preenchimento ( $\frac{3}{4}$ ) para o sítio de Cruzeiro do Sul.	157
Figura 71 Comparação entre a distribuição de Z existente (---) e a distribuição de Z com preenchimento ( $\frac{3}{4}$ ) para o sítio de Manaus.	158
Figura 72 Comparação entre a distribuição de Z existente (---) e a distribuição de Z com preenchimento ( $\frac{3}{4}$ ) para o sítio de Tabatinga.	158
Figura 73 Comparação entre a distribuição de precipitação no período analisado (---) e a distribuição anual de precipitação ( $\frac{3}{4}$ ) para o sítio de Cruzeiro do Sul.	159
Figura 74 Comparação entre a distribuição de precipitação no período analisado (---) e a distribuição anual de precipitação ( $\frac{3}{4}$ ) para o sítio de Manaus.	160
Figura 75 Comparação entre a distribuição de precipitação no período analisado (---) e a distribuição anual de precipitação ( $\frac{3}{4}$ ) para o sítio de Tabatinga.	160
Figura 76 Comparação entre as distribuições de precipitação, para o sítio de Cruzeiro do Sul: pluviógrafo ( $\frac{3}{4}$ ), radar com método absoluto (---), radar com método relativo (•••) e radar com relação de Marshal-Palmer (---).	163
Figura 77 Comparação entre as distribuições de precipitação, para o sítio de Manaus: pluviógrafo ( $\frac{3}{4}$ ), radar com método absoluto (---), radar com método relativo (•••) e radar com relação de Marshal-Palmer (---).	163
Figura 78 Comparação entre as distribuições de precipitação, para o sítio de Tabatinga: pluviógrafo ( $\frac{3}{4}$ ), radar com método absoluto (---), radar com método relativo (•••) e radar com relação de Marshal-Palmer (---).	164

Figura 79 Relação entre o fator de refletividade e a taxa de precipitação: Medido (---) e ajustado ( $\frac{3}{4}$ ).	165
Figura 80 Comparação entre as distribuições de precipitação, para o sítio de Cruzeiro do Sul: pluviógrafo ( $\frac{3}{4}$ ), radar com método absoluto (---) e radar com método relativo (•••).	167
Figura 81 Comparação entre as distribuições de precipitação, para o sítio de Manaus: pluviógrafo ( $\frac{3}{4}$ ), radar com método absoluto (---) e radar com método relativo (•••).	168
Figura 82 Comparação entre as distribuições de precipitação, para o sítio de Tabatinga: pluviógrafo ( $\frac{3}{4}$ ), radar com método absoluto (---) e radar com método relativo (•••).	168
Figura 83 Exemplo da definição de célula adotado nos procedimentos de análise.	171
Figura 84 Exemplo da definição de célula adotado nos procedimentos em [90].	172
Figura 85 Distribuição das células quanto a área excedida para cada valor de taxa de precipitação mínima em seu interior para o radar de Cruzeiro do Sul.	180
Figura 86 Distribuição das células quanto a área excedida para cada valor de taxa de precipitação mínima em seu interior para o radar de Manaus.	181
Figura 87 Distribuição das células quanto a área excedida para cada valor de taxa de precipitação mínima em seu interior para o radar de Tabatinga.	181
Figura 88 Variação do diâmetro equivalente da célula de chuva com a taxa de precipitação excedida para 50% do tempo no radar de Cruzeiro do Sul com o método absoluto com dois segmentos.	185
Figura 89 Lugar geométrico dos centros da célula que atingem duas estações simultaneamente.	197
Figura 90 Percentagem de tempo (%) que uma taxa de precipitação acima de $R_0$ (mm/h) é excedida em duas estações separadas por uma determinada distância $L_0$ (km), para o radar de Cruzeiro do Sul.	199
Figura 91 Percentagem de tempo (%) que uma taxa de precipitação acima de $R_0$ (mm/h) é excedida em duas estações separadas por uma determinada distância $L_0$ (km), para o radar de Manaus.	200

Figura 92 Percentagem de tempo (%) que uma taxa de precipitação acima de $R_0$ (mm/h) é excedida em duas estações separadas por uma determinada distância $L_0$ (km), para o radar de Tabatinga.	200
Figura 93 Representação do <i>RHI</i> analisado como exemplo do perfil vertical do tipo 1, radar de Manaus.	205
Figura 94 Perfil vertical do tipo 1 para uma distância de 28 km do radar de Manaus.	205
Figura 95 Representação do <i>RHI</i> analisado como exemplo do perfil vertical do tipo 2, radar de Manaus.	206
Figura 96 Perfil vertical do tipo 2 para uma distância de 49 km do radar de Manaus.	207
Figura 97 Representação do <i>RHI</i> analisado como exemplo do perfil vertical do tipo 3, radar de Manaus.	209
Figura 98 Perfil vertical do tipo 3 para uma distância de 67 km do radar de Manaus.	210
Figura 99 Representação do <i>RHI</i> analisado como exemplo do perfil vertical do tipo 4, radar de Cruzeiro do Sul.	211
Figura 100 Perfil vertical do tipo 4 para uma distância de 25 km do radar de Cruzeiro do Sul.	211
Figura 101 Representação do <i>RHI</i> analisado como exemplo do perfil vertical do tipo 5, radar de Tefé.	212
Figura 102 Perfil vertical do tipo 5 para uma distância de 79 km do radar de Tefé.	213
Figura 103 Perfil horizontal de um evento excepcional medido na região através do radar de Tefé.	214
Figura 104 Probabilidade de ocorrência dos tipos de perfil em função da refletividade da chuva perto do solo [133].	215

## Lista de tabelas

Tabela 1 Coordenadas geográficas dos sítios de medição na região Amazônica.	48
Tabela 2 Período e disponibilidade das medições.	51
Tabela 3 Valores da taxa cumulativa de precipitação anual para percentagens de tempo padronizadas.	55
Tabela 4 Valores da taxa cumulativa de precipitação para pior mês em percentagens de tempo padrão.	62
Tabela 5 Valores de correlação, em %, encontrados nos ajustes entre as funções escolhidas e a distribuição cumulativa da taxa de precipitação medida nos sítios da região Amazônica: (1) Belém; (2) Boa Vista; (3) Cruzeiro do Sul; (4) Macapá; (5) Manaus; (6) Santarém; (7) São Gabriel da Cachoeira e (8) Tabatinga.	67
Tabela 6 Valores dos parâmetros de melhor ajuste para as funções utilizadas em cada sítio de medição.	68
Tabela 7 Valores dos erros relativos para cada tipo de função utilizada no ajuste.	70
Tabela 7 Valores dos erros relativos para cada tipo de função utilizada no ajuste (continuação).	71
Tabela 8 Valores dos parâmetros de melhor ajuste e correlação, em cada sítio de medição, para a função de Weibull (3p) para percentagem de tempo menor do que 0,5%.	73
Tabela 9 Valores dos erros relativos para o ajuste, em cada sítio de medição, com a função de Weibull (3p) para percentagem de tempo menor do que 0,5%.	74
Tabela 10 Valores dos parâmetros de melhor ajuste para as funções utilizadas para região como um todo ou para cada subclima.	76
Tabela 11 Valores dos erros relativos médios e correlação para os ajuste com as funções considerando a região inteira ou um determinado subclima.	77
Tabela 12 Valores de $Q_1$ e $\beta$ para diferentes climas no Brasil.	80

Tabela 13 Valores de $Q_1$ e $\beta$ ajustados para os sítios de medição na região Amazônica.	81
Tabela 14 Valores estimados para desvio padrão da variabilidade anual e intervalo de confiança.	85
Tabela 15 Variação dos valores das taxas cumulativa de precipitação para percentagens de tempo padrão.	86
Tabela 16 Valores dos erros relativos encontrados na comparação do modelo da Recomendação U.I.T.-R P. 837-4 com as medidas realizadas em cada sítio.	94
Tabela 17 Valores de dados meteorológicos, necessários ao cálculo do modelo da Recomendação U.I.T.-R P.837-4, que apresentaram o melhor desempenho na comparação com medidas locais.	97
Tabela 18 Valores dos erros relativos encontrados na comparação do modelo da Recomendação U.I.T.-R P.837-4, empregando novos parâmetros meteorológicos com as medidas realizadas em cada sítio.	98
Tabela 19 Valores numéricos ajustados para serem utilizados no equacionamento do modelo da Recomendação U.I.T.-R P. 837-4 (equação 5.2 a 5.5).	104
Tabela 20 Coordenadas geográficas e período de medição dos PCD's do CPTEC.	107
Tabela 21 Valores de dados meteorológicos, necessários ao cálculo do modelo da recomendação da U.I.T.-R P. 837-4, que apresentaram o melhor desempenho na comparação com medidas locais.	109
Tabela 22 Acumulados Anuais Médios de Precipitação.	112
Tabela 23 Acumulados Anuais Médios de Precipitação Atualizados.	113
Tabela 24 Proposta de novos valores para os parâmetros meteorológicos, necessários ao cálculo do modelo U.I.T. 837-4.	115
Tabela 25 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação $R_0$ para o sítio de Belém.	119
Tabela 26 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação $R_0$ para o sítio de Boa Vista.	120

Tabela 27 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação $R_0$ para o sítio de Cruzeiro do Sul.	120
Tabela 28 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação $R_0$ para o sítio de Macapá.	121
Tabela 29 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação $R_0$ para o sítio de Manaus.	121
Tabela 30 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação $R_0$ para o sítio de Santarém.	122
Tabela 31 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação $R_0$ para o sítio de São Gabriel da Cachoeira.	122
Tabela 32 Duração total, média da duração e número de eventos relacionados à superação de uma determinada taxa de precipitação $R_0$ para o sítio de Tabatinga.	123
Tabela 33 Correlações obtidas no ajuste das distribuições dinâmicas relacionadas à taxa de precipitação através de uma distribuição de Weibull.	126
Tabela 34 Coordenadas geográficas dos radares meteorológicos do SIPAM.	147
Tabela 35 Valores de “a” e “b” para equação entre Z e R.	151
Tabela 36 Radares do SIPAM analisados e período analisado.	156
Tabela 37 Quantidade de <i>Cappis</i> e disponibilidade para cada radar utilizado na pesquisa.	156
Tabela 38 Quantização das diferenças entre a distribuição de precipitação do período e anual e caracterização do período analisado.	161
Tabela 39 Valores da relação $Z = a R^b$ , da correlação e dos erros relativos obtidos através dos dois métodos de comparação.	162
Tabela 40 Valores da relação $Z = a R^b$ , da correlação e dos erros relativos obtidos através dos dois métodos de comparação para um ajuste com dois segmentos.	166

Tabela 41 Quantidade de células analisadas por radar e por relação adotada.	176
Tabela 42 Valores dos parâmetros encontrados no ajuste da variação do número de células com a taxa de precipitação.	179
Tabela 43 Valores dos diâmetros mínimos equivalentes excedidos encontrados para o caso do radar de Cruzeiro do Sul com o método absoluto com 2 segmentos.	183
Tabela 44 Diferenças entre as dimensões de células observadas através da variação do modelo empregado em comparação com o modelo absoluto com 2 segmentos, para a cidade de Cruzeiro do Sul.	186
Tabela 45 Diferenças entre as dimensões de células observadas através da variação do modelo empregado em comparação com o modelo absoluto com 2 segmentos, para a cidade de Manaus.	187
Tabela 46 Diferenças entre as dimensões de células observadas através da variação do modelo empregado em comparação com o modelo absoluto com 2 segmentos, para a cidade de Tabatinga.	187
Tabela 47 Diferenças entre as dimensões de células observadas variando o radar analisado.	188
Tabela 48 Valores dos parâmetros e erros encontrados no ajuste da variação do diâmetro equivalente com a taxa de precipitação, para uma percentagem fixa.	191
Tabela 49 Comparação entre os dois tipos de ajuste para a variação do diâmetro com a taxa de precipitação.	192
Tabela 50 Valores corrigidos através das funções de ajuste.	192
Tabela 51 Valores dos parâmetros e erros encontrados no ajuste da variação do diâmetro equivalente com a percentagem de tempo, para uma taxa de precipitação excedida fixa.	194
Tabela 52 Variação mensal da altura da isoterma de 0 <sup>0</sup> C, em metros, para a cidade de Belém	203