



**Nelson Alexander Pérez García**

**Modelamento de Efeitos de Atenuação por Chuvas em  
Enlaces Terrestres Ponto-a-ponto e Ponto-multiponto**

**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: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro, RJ, 13 de junho de 2003



**Nelson Alexander Pérez García**

## **Modelamento de Efeitos de Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres Ponto-a-ponto e Ponto-multiponto**

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

**Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello**

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - CETUC-PUC\Rio

**Dr. Luís Cláudio Palma Pereira**

CPqD

**Dr. Eduardo Javier Arancibia Vásquez**

TIM-Brasil

**Prof. Mauro Soares de Assis**

Instituto Militar de Engenharia - IME

**Dr. Erasmus Couto Brazil de Miranda**

Centro de Estudos em Telecomunicações

**Dr. Gláucio Lima Siqueira**

Centro de Estudos em Telecomunicações - CETUC-PUC\Rio

**Prof. Ney Augusto Dumont**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, RJ, 13 de junho de 2003

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

### **Nelson Alexander Pérez García**

Gradou-se em Engenharia Elétrica na ULA (Universidad de Los Andes), Mérida, Venezuela, em 1992. Em 2000 recebeu o título de mestre em Engenharia Elétrica, na área de Electromagnetismo Aplicado, no CETUC-PUC\Rio. Desde 1994 é Professor em Telecomunicações na ULA. Sua área de pesquisa está orientada ao desenvolvimento de modelos para caracterização dos efeitos de propagação que influem no planejamento e dimensionamento de sistemas sem fio de comunicaciones móveis e radio acesso.

#### Ficha Catalográfica

Pérez García, Nelson Alexander

Modelamento de Efeitos de Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres Ponto-a-ponto e Ponto-multiponto / Nelson Alexander Pérez García; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003

175 f: il. ; 30 cm

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

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Sistemas sem fio. 3. Atenuação por chuvas. 4. Modelamento. 5. Planejamento. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título

CDD: 621.3

A Deus Todo Poderoso, a minha mamãe Maria, a minha esposa Carmelina  
e a meus filhos Tawny e Bruno. Também para ti, minha eterna pequenina  
Maria Auxiliadora (in memoriam)

## **Agradecimentos**

A meu orientador, Prof. Luiz A. R. da Silva Mello, pela sua contínua assessoria e apoio pessoal, moral e profissional. Obrigado pela confiança em mim depositada.

À Prof. Marlene Sabino Pontes, quem facilitou minha adaptação inicial ao Brasil e sempre me deu incentivo profissional.

Ao Prof. Erasmus Couto de Miranda, por suas importantes orientações que ajudaram ao desenvolvimento desta tese.

Ao conjunto de amigos venezuelanos residentes no Rio de Janeiro, especialmente aos do grupo de Softball, presentes em todo momento.

Aos meus amigos colombianos Sergio e Maria Cristina, que sempre estiveram presentes nos momentos de dificuldade.

A meus amigos e colegas brasileiros Marta e Luis Carlos Linares, dos quais sempre recebi palavras de ânimo e estímulo para continuar adiante.

Ao pessoal do CETUC em geral, cuja gentileza me fizeram sentir como em casa.

Ao CNPq, pelo importante apoio econômico recebido durante este trabalho.

A minha família e amigos na Venezuela, permanente fonte de inspiração.

À Fundación Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, FONACIT (Caracas, Venezuela), quem fez possível minha permanência no Brasil, durante este período.

À Universidad de Los Andes, ULA (Mérida, Venezuela), instituição em cuja representação me desenvolvo e que também fez possível minha permanência aqui no Brasil, para o cumprimento deste importante objetivo.

## Resumo

Pérez García, Nelson Alexander. **Modelamento de Efeitos de Atenuação por Chuvas em Enlaces Terrestres Ponto-a-ponto e Ponto-multiponto**. Rio de Janeiro, RJ, 2003. 175p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A crescente demanda dos usuários por serviços de banda larga tais como dados a alta velocidade, vídeo, áudio e multimídia, tem levado ao uso de sistemas rádio ponto-multiponto em frequências superiores a 10 GHz, que além de menos utilizadas, permitem oferecer as grandes larguras de banda necessárias. Nessas frequências, as perdas de propagação do sinal devem-se principalmente ao efeito de chuvas. A atenuação por chuvas afeta diretamente a cobertura e o desempenho dos sistemas que operam nestas faixas de frequência. No presente trabalho é desenvolvido um modelo empírico para a previsão da distribuição cumulativa da atenuação por chuvas, utilizando a base oficial de ITU-R e resultados experimentais de medidas realizadas no Brasil. Este modelo fornece resultados mais precisos do que os atualmente propostos na literatura técnica e permite avaliar o impacto das chuvas na cobertura de sistemas ponto-multiponto tipo LMDS (Local Multipoint Distribution System). Além disto, foram desenvolvidos dois modelos para a previsão da distribuição da atenuação diferencial por chuvas, fator essencial para a determinação de efeitos de interferência e seu impacto das chuvas no desempenho de sistemas LMDS. Finalmente, foram desenvolvidos modelos para a previsão da duração total e média, de eventos de atenuação por chuvas, estatísticas também relevantes na análise de performance de sistemas LMDS.

## Palavras-chave

Sistemas sem fio, Atenuação por chuvas, Modelamento, Planejamento

## Resumo

Pérez García, Nelson Alexander. **Modelling to Rain Attenuation Effects in Point-to-point and Point-to-multipoint Terrestrial Links**. Rio de Janeiro, RJ, 2003. 175p. D.Sc. These - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The growing demand for broadband services such as high-speed data, video, audio and multimedia, has lead to the use of point-multipoint radio systems operating in frequencies above of 10 GHz, that are not yet allocated for other services and allow the use of the large bandwidths required by these services. At these frequencies, the main contribution for the propagation losses is due to rain attenuation. The rain directly affects the area coverage and the performance of systems operating at these frequencies. In the present work, an empirical model is developed for predicting the cumulative distribution of rain attenuation prediction, using the ITU-R data base and results of propagation measurements campaigns performed in Brazil. The model provides better results than others currently found in the technical literature and allows the evaluation of the impact of rain attenuation in the coverage of LMDS (Local Multipoint Distribution System/Local Multipoint Communications System). Also, two models were developed for predicting distributions of differential rain attenuation, an essential factor for interference effects and its impact in LMDS performance. Finally, models were developed for the prediction of total and average duration of rain attenuation events, also relevant for systems performance assessment.

## Keywords

Wireless systems, rain attenuation, modelling, planning

## Sumário

1 INTRODUÇÃO	20
1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	20
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO	25
1.3. RESULTADOS OBTIDOS E CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO	26
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	27
2 EFEITOS E MODELOS DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS	29
2.1. ABSORÇÃO E ESPALHAMENTO DAS GOTAS DE ÁGUA	30
2.2. FATORES QUE INFLUEM NA ATENUAÇÃO POR CHUVAS	31
2.3. MODELOS DE PREVISÃO DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS	33
2.3.1. Cálculo da Atenuação Específica	33
2.3.2. Modelo de ITU-R (Recomendação P.530-10)	36
2.3.3. Modelo de Crane	39
2.3.4. Modelo Australiano (Documento 3M/38-E, de ITU-R)	41
2.3.5. Modelo CETUC-98	41
2.4. DISTRIBUIÇÕES DA TAXA DE PRECIPITAÇÃO	43
2.5. ATENUAÇÃO DIFERENCIAL POR CHUVAS	44
2.6. DURAÇÃO E NÚMERO DE EVENTOS DE CHUVA	45
2.7. DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	47
2.7.1. Distribuição de Weibull de Três Parâmetros	47
2.7.2. Distribuição de Weibull de Dois Parâmetros	48
3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	49
3.1. BASE DE DADOS DE ITU-R	49
3.2. EXPERIMENTOS REALIZADOS NO BRASIL	50
3.2.1. Descrição do Experimento	53
3.2.2. Pré-processamento de Séries Temporais	55
3.3. ANÁLISE DE DADOS	56
3.3.1. Distribuição Cumulativa da Taxa de Precipitação	57



3.3.2. Distribuição Cumulativa da Atenuação por Chuvas	58
3.3.3. Distribuição Cumulativa da Atenuação Diferencial	59
3.3.4. Distribuição Cumulativa da Duração e Número de Eventos de Chuva	59
3.3.5. Resultados	60
4 PREVISÃO E MODELAMENTO DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS EM FREQUÊNCIAS SUPERIORES A 10 GHZ	69
4.1. TESTES DE MODELOS EXISTENTES PARA A PREVISÃO DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS	69
4.1.1. Resultados dos Testes	69
4.2. MODELAMENTO DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS	77
4.2.1. Determinação da Expressão Empírica para a Previsão da Atenuação por Chuvas	79
4.2.2. Comparação com as Medidas	84
4.2.3. Teste de Validade	88
4.2.4. Atenuação por Chuvas no Brasil: Um Caso Particular	93
4.3. MODELAMENTO DA ATENUAÇÃO DIFERENCIAL POR CHUVAS PARA CLIMAS TROPICAIS E EQUATORIAIS	94
4.3.1. Modelo 1 para a Previsão da Atenuação Diferencial por Chuvas	95
4.3.2. Modelo 2 para a Previsão da Atenuação Diferencial por Chuvas	100
4.3.3. Comparação entre os Modelos 1 e 2	110
5 CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS	115
5.1. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTATÍSTICO DA DURAÇÃO E NÚMERO DE EVENTOS DE CHUVA	115
5.2. MODELAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO CUMULATIVA DA DURAÇÃO DE EVENTOS DE CHUVA PARA CLIMAS TROPICAIS E EQUATORIAIS	119
5.2.1. Determinação dos Parâmetros $\eta$ e $\beta$ da Distribuição da Duração de Eventos	119
5.2.2. Determinação da Expressão de $\eta$	120

5.2.3. Determinação da Expressão de $\beta$	123
5.2.4. Testes do Modelo DEC-PM	127
5.2.5. Modelo DEC-PM modificado	129
5.2.6. Comparação entre os Modelos DEC-PM e DEC-PM Modificado	132
5.3. MODELAMENTO DA DURAÇÃO MÉDIA DE EVENTOS DE CHUVA	134
5.3.1. Coeficientes do Polinômio de Ajuste	135
5.3.2. Determinação das Funções para os Coeficientes do Polinômio de Ajuste	136
5.3.3. Teste do Modelo DMEC-PM	138
5.3.4. Modelo DMEC-PM Modificado	139
5.3.5. Comparação dos Modelos DMEC-PM e DMEC-PM Modificado	141
6 APLICAÇÃO DOS MODELOS DESENVOLVIDOS	144
6.1. SISTEMA LMDS	144
6.2. PREVISÃO DA COBERTURA EM SISTEMAS LMDS	145
6.2.1. Perdas de Propagação	145
6.2.2. Perda Máxima de Propagação	146
6.2.3. Determinação do Raio da Célula	147
6.2.4. Exemplo de Cálculo de Cobertura em Sistemas LMDS	147
6.3. DEGRADAÇÃO DA RELACÃO S/I DEVIDO À CHUVA	148
6.4. APLICAÇÃO DO MODELO DEC-PM Modificado	153
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	155
7.1. CONCLUSÕES	155
7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	157
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159
APÊNDICE A BASE OFICIAL DE DADOS DE ITU-R (DBSG5)	164
APÊNDICE B CARACTERÍSTICAS DOS PARES DE ENLACES CONVERGENTES DE SÃO PAULO E BRASÍLIA	167

APÊNDICE C BASE DE DADOS PARA O MODELAMENTO DA DURAÇÃO DE EVENTOS DE CHUVA NO BRASIL	169
APÊNDICE D DURAÇÃO MÉDIA DE EVENTOS DE CHUVA EM SÃO PAULO	171
APÊNDICE E RELAÇÃO ENTRE DURAÇÃO MÉDIA DE EVENTOS DE CHUVA E COMPRIMENTO DE ENLACE	175

## Lista de figuras

Figura 1	Técnica de polarização alternada no sistema LMDS.	22
Figura 2	Variação de raio de uma célula com a chuva, no sistema LMDS.	22
Figura 3	Atenuação por absorção.	30
Figura 4	Atenuação por espalhamento.	31
Figura 5	Geometria para a determinação do fator de redução do modelo de ITU-R.	38
Figura 6	Distribuição cumulativa da atenuação por chuva no enlace Barueri-RIS.	42
Figura 7	Taxa de precipitação excedida durante 0,01% do tempo.	44
Figura 8	Situação de atenuação diferencial por chuvas.	45
Figura 9	Serie temporal de atenuação por chuvas.	46
Figura 10	. Distribuição geográfica dos 7 enlaces convergentes de São Paulo.	51
Figura 11	Distribuição geográfica dos 6 enlaces convergentes de Brasília.	52
Figura 12	<i>Set-up</i> experimental das medidas da atenuação por chuvas nos enlaces convergentes de São Paulo e Brasília.	53
Figura 13	Esquema básico da UAD.	54
Figura 14	Série temporal da potência recebida e da taxa de precipitação, gerada pelo programa TSEDIT.	55
Figura 15	Distribuições da taxa de precipitação nos enlaces convergentes de São Paulo.	62
Figura 16	Distribuições cumulativas da atenuação por chuvas dos enlaces de São Paulo, para o primeiro ano de medidas (entre 0,01 e 1%).	62
Figura 17	Distribuições cumulativas da atenuação total e diferencial para o enlace Barueri-RIS.	64
Figura 18	Distribuições cumulativas da duração de eventos de chuvas para os 7 enlaces convergentes de São Paulo.	66
Figura 19	Distribuições cumulativas do número de eventos de chuvas para os 7 enlaces convergentes de São Paulo.	67
Figura 20	Distribuições cumulativas da atenuação total e diferencial para o enlace INCRA-BSA.	68

Figura 21 Média dos erros (Recomendação P.311-10).	72
Figura 22 Desvio padrão dos erros (Recomendação P.311-10).	73
Figura 23 Valor RMS dos erros (Recomendação P.311-10).	73
Figura 24 Média dos erros (Erro relativo).	75
Figura 25 Desvio padrão dos erros (Erro relativo).	76
Figura 26 Valor RMS dos erros (Erro relativo).	76
Figura 27 Gráfico de espalhamento de $r_p$ vs. $R_p$ .	80
Figura 28 Gráfico de espalhamento de $r_p$ vs. $d$ .	81
Figura 29 Gráfico de espalhamento de $r_p$ vs. Latitude.	81
Figura 30 Valores previstos <i>versus</i> valores medidos, do fator $r_p$ .	83
Figura 31 Distribuição dos resíduos do fator $r_p$ .	83
Figura 32 Média dos erros (Erro relativo), incluindo o modelo Pérez-Mello.	85
Figura 33 Desvio padrão dos erros (Erro relativo), incluindo o modelo Pérez-Mello.	86
Figura 34 Valor RMS dos erros (Erro relativo), incluindo o modelo Pérez-Mello.	86
Figura 35 Distribuições cumulativas, medidas e previstas, da atenuação por chuva, no enlace Chibolton.	87
Figura 36 Distribuições cumulativas, medidas e previstas, da atenuação por chuva, no enlace CENESP15.	88
Figura 37 Valor RMS dos erros (Erro relativo), para $d \leq 5$ km.	89
Figura 38 Valor RMS dos erros (Erro relativo) para $5 \text{ km} < d \leq 20$ km.	89
Figura 39 Valor RMS dos erros (Erro relativo), para $d > 20$ km.	90
Figura 40 Valor RMS dos erros (Erro relativo), para $f \leq 20$ GHz.	91
Figura 41 Valor RMS dos erros (Erro relativo) para $20 \text{ GHz} < f \leq 40$ GHz.	91
Figura 42 Valor RMS dos erros (Erro relativo) para $f > 40$ GHz.	92
Figura 43 Valor RMS dos erros (Erro relativo) para latitudes $\leq 30^\circ$ .	92
Figura 44 Valor RMS dos erros (Erro relativo) para latitudes $> 30^\circ$ .	93
Figura 45 Valor RMS dos erros (Erro Relativo), para as medidas no Brasil.	94
Figura 46 Gráfico de espalhamento de $A_{ab}$ vs. $A_a$ .	95
Figura 47 Gráfico de espalhamento de $A_{ab}$ vs. $A_b$ .	96
Figura 48 Gráfico de espalhamento de $A_{ab}$ vs. $ \Delta d $ .	96
Figura 49 Gráfico de espalhamento de $A_{ab}$ vs. $\theta$ .	97

Figura 50 Valores observados <i>versus</i> previstos (modelo 1) da atenuação diferencial.	99
Figura 51 Distribuição dos resíduos para o modelo 1.	100
Figura 52 Percentagens de tempo observadas vs previstas (enlace PGR-BNDES).	101
Figura 53 Percentagens de tempo observadas vs previstas (enlace BNDES-PGR).	102
Figura 54 Parâmetro $\eta$ vs. frequência de operação de cada par de enlace.	102
Figura 55 Parâmetro $\eta$ vs. comprimento do enlace 1.	103
Figura 56 Parâmetro $\eta$ vs. comprimento do enlace 2.	103
Figura 57 Parâmetro $\eta$ vs. o ângulo entre os percursos dos enlaces.	104
Figura 58 Valores observados <i>versus</i> valores previstos, do parâmetro $\eta$ .	105
Figura 59 Distribuição dos resíduos para $\eta$ .	105
Figura 60 Parâmetro $\beta$ vs. frequência de operação de cada par de enlace.	106
Figura 61 Parâmetro $\beta$ vs. comprimento do enlace 1.	106
Figura 62 Parâmetro $\beta$ vs. comprimento do enlace 2.	107
Figura 63 Parâmetro $\beta$ vs. o ângulo entre os percursos dos enlaces.	107
Figura 64 Valores observados vs. valores previstos para $\beta$ .	108
Figura 65 Distribuição dos resíduos para $\beta$ .	109
Figura 66 Valores observados vs. previstos (modelo 2) da atenuação diferencial.	110
Figura 67 Média dos erros (Erro relativo), para os Modelos 1 e 2.	111
Figura 68 Desvio padrão dos erros (Erro relativo), para os modelos 1 e 2.	112
Figura 69 Valor RMS dos erros (Erro relativo), para os modelos 1 e 2.	112
Figura 70 Distribuições cumulativas, medidas e previstas, da atenuação diferencial por chuva, para o par Barueri-CENESP15.	114
Figura 71 Distribuições cumulativas, medidas e previstas, da atenuação diferencial por chuva, para o par PGR-INCRA.	114
Figura 72 Distribuições cumulativas medida e prevista da duração de eventos de atenuação por chuvas para o enlace CENESP15-RIS (limiar de 10 dB).	117
Figura 73 Distribuições cumulativas medida e prevista do número de eventos de atenuação por chuvas para o enlace CENESP15-RIS (limiar de 10 dB).	117
Figura 74 Duração média de eventos de chuva, para o enlace CENESP15-RIS.	119

Figura 75 Parâmetro $\eta$ <i>versus</i> o comprimento do enlace.	120
Figura 76 Parâmetro $\eta$ <i>versus</i> o nível de atenuação.	121
Figura 77 Parâmetro $\eta$ <i>versus</i> a duração máxima por nível de atenuação.	121
Figura 78 Valores de $\eta$ previstos <i>versus</i> valores de $\eta$ observados.	123
Figura 79 Distribuição dos resíduos para o parâmetro $\eta$ .	123
Figura 80 Parâmetro $\beta$ vs. comprimento do enlace.	124
Figura 81 Parâmetro $\beta$ vs. nível de atenuação.	124
Figura 82 Parâmetro $\beta$ vs. duração máxima por nível de atenuação.	125
Figura 83 Valores de $\beta$ previstos <i>versus</i> valores de $\beta$ observados.	126
Figura 84 Distribuição dos resíduos para o parâmetro $\beta$ .	126
Figura 85 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Recomendação P.311-10), para o modelo DEC-PM.	128
Figura 86 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Erro relativo), para o modelo DEC-PM.	128
Figura 87 Valores de $\eta$ previstos <i>versus</i> valores de $\eta$ observados (Modelo DEC-PM Modificado).	130
Figura 88 Distribuição dos resíduos para o parâmetro $\eta$ (Modelo DEC-PM Modificado).	130
Figura 89 Valores de $\beta$ previstos <i>versus</i> valores de $\beta$ observados (Modelo DEC-PM Modificado).	131
Figura 90 Distribuição dos resíduos para o parâmetro $\beta$ (Modelo DEC-PM Modificado).	132
Figura 91 Média dos erros para os modelos DEC-PM e DEC-PM modificado.	133
Figura 92 Desvio padrão dos erros para os modelos DEC-PM e DEC-PM modificado.	133
Figura 93 Valor RMS dos erros - modelos DEC-PM e DEC-PM modificado.	134
Figura 94 Distribuições cumulativas, medida e previstas, para o enlace Scania e um nível de atenuação de 15 dB.	135
Figura 95 Valores observados da duração média de eventos de chuva <i>versus</i> valores previstos da duração média de eventos de chuva.	137
Figura 96 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Recomendação P.311-	

10), para o modelo DMEC-PM.	138
Figura 97 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Erro Relativo), para o modelo DMEC-PM	139
Figura 98 Valores observados e previstos da duração média de eventos de atenuação por chuvas - modelo DMEC-PM Modificado.	140
Figura 99 Média dos erros (erro relativo), para os modelos DMEC-PM e DMEC-PM modificado.	141
Figura 100 Desvio padrão dos erros (erro relativo), para os Modelos DMEC-PM e DMEC-PM Modificado.	142
Figura 101 Valor RMS dos erros (erro relativo), para os Modelos DMEC-PM e DMEC-PM Modificado.	142
Figura 102 Fator de reuso numa célula.	149
Figura 103 Fator de reuso numa célula aplicando a polarização alternada.	149
Figura 104 Cenário de interferência no sistema LMDS.	150
Figura 105 Valores da relação S/I no sistema LMDS\LMCS, sob condições de chuva.	152
Figura 106 Curva de espalhamento entre a duração máxima de eventos por nível <i>versus</i> o nível de atenuação.	170
Figura 107 Duração média de eventos de chuva (Barueri-RIS).	171
Figura 108 Duração média de eventos de chuva (Bradesco2-RIS).	172
Figura 109 Duração média de eventos de chuva (CENESP15-RIS).	172
Figura 110 Duração média de eventos de chuva (CENESP18-RIS).	173
Figura 111 Duração média de eventos de chuva (Scania-RIS).	173
Figura 112 Duração média de eventos de chuva (Paranapiacaba-RIS).	174
Figura 113 Duração média de eventos de chuva (Shell-RIS).	174
Figura 114 Curva de espalhamento entre a duração máxima de eventos por enlace <i>versus</i> o comprimento do enlace.	175



## Lista de tabelas

Tabela 1 Características dos Sistemas BWS.	21
Tabela 2 Coeficientes para cálculo da atenuação específica.	35
Tabela 3 Regiões climáticas de ITU-R.	43
Tabela 4 Frequências de operação dos enlaces da base de dados DB-SG5.	49
Tabela 5 Comprimentos dos enlaces da base de dados DB-SG5.	50
Tabela 6 Dados dos enlaces terrestres convergentes de São Paulo.	51
Tabela 7 Dados dos enlaces terrestres convergentes de Brasília.	52
Tabela 8 Distribuições cumulativas da taxa de precipitação para os 7 enlaces convergentes de São Paulo.	61
Tabela 9 Distribuição cumulativa da atenuação por chuvas para os 7 enlaces convergentes de São Paulo (entre 0,001 e 0,1%).	61
Tabela 10 Distribuição cumulativa da atenuação diferencial por chuvas para os pares de enlaces convergentes de São Paulo que incluem Barueri-RIS.	63
Tabela 11 Distribuições cumulativas da duração de eventos de chuvas para o enlace CENESP15-RIS.	65
Tabela 12 Distribuições cumulativas do número de eventos de chuvas para o enlace CENESP15-RIS.	66
Tabela 13 Distribuição cumulativa da taxa de precipitação para os 6 enlaces convergentes de Brasília.	67
Tabela 14 Distribuição cumulativa da atenuação por chuvas para os 6 enlaces convergentes de Brasília.	68
Tabela 15 Distribuição cumulativa da atenuação diferencial por chuvas para os pares de enlaces convergentes de Brasília que o consideram INCRA-BSA.	68
Tabela 16 Média dos erros (Recomendação P.311).	71
Tabela 17 Desvio padrão dos erros (Recomendação P.311).	71
Tabela 18 Valor RMS dos erros (Recomendação P.311).	72
Tabela 19 Média dos erros (Erro relativo).	74
Tabela 20 Desvio padrão dos erros (Erro relativo).	75
Tabela 21 Valor RMS dos erros (Erro relativo).	75

Tabela 22 Valores das constantes de ajuste para o fator $r_p$ .	82
Tabela 23 Média dos erros (Erro relativo), incluindo o modelo Pérez-Mello.	84
Tabela 24 Desvio padrão dos erros (Erro relativo), incluindo o modelo Pérez-Mello.	85
Tabela 25 Valor RMS dos erros (Erro relativo), incluindo o modelo Pérez-Mello.	85
Tabela 26 Valores das constantes de ajuste para a atenuação diferencial por chuvas (Modelo 1).	99
Tabela 27 Valores das constantes de ajuste para o parâmetro $\eta$ .	104
Tabela 28 Valores das constantes de ajuste para o parâmetro $\beta$ .	108
Tabela 29 Média, desvio padrão e valor RMS do erro relativo para os modelos 1 e 2.	111
Tabela 30 Duração média de eventos de chuva para o enlace CENESP15-RIS.	118
Tabela 31 Valores das constantes de ajuste para o parâmetro $\eta$ .	122
Tabela 32 Valores das constantes de ajuste para o parâmetro $\beta$ .	125
Tabela 33 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Recomendação P.311-10 e Erro Relativo), para o modelo DEC-PM.	127
Tabela 34 Valores das constantes de ajuste para $\eta$ (Modelo DEC-PM Modificado).	129
Tabela 35 Valores das constantes de ajuste para $\beta$ (Modelo DEC-PM Modificado).	131
Tabela 36 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Recomendação P.311-10) para os modelos DEC-PM e DEC-PM Modificado.	132
Tabela 37 Valores dos coeficientes do polinômio de ajuste.	136
Tabela 38 Valores das constantes dos coeficientes $b_i$ .	137
Tabela 39 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Recomendação P.311-10 e Erro Relativo), para o modelo DMEC-PM.	138
Tabela 40 Valores dos coeficientes $b_i$ (Modelo DMEC-PM modificado).	140
Tabela 41 Média, desvio padrão e valor RMS dos erros (Erro Relativo) para os modelos DMEC-PM e DMEC-PM Modificado.	141
Tabela 42 Comparação do raio da célula no sistema LMDS\LMCS, para os modelos de ITU-R e Pérez-Mello.	148
Tabela 43 Características dos enlaces da base de dados de ITU-R de atenuação por	

chuvas.	164
Tabela 44 Características dos pares de enlaces convergentes de São Paulo.	167
Tabela 45 Características dos pares de enlaces convergentes de Brasília.	168
Tabela 46 Dados para o modelamento da duração de eventos de chuva no Brasil (modelos DEC-PM e DEC-PM Modificado).	169