4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA TAXA DE VARIAÇÃO DA ATENUAÇÃO POR CHUVAS

O objetivo deste capítulo é descrever o processo de análise estatística das densidades de probabilidade da taxa de variação da atenuação realizado para todos os anos-sítio. Ao longo do capítulo serão apresentados os resultados da estimação paramétrica da densidade de probabilidade para modelagem da taxa de variação da atenuação e das análises de correlação entre os parâmetros das densidades estimadas (média e desvio padrão) com variáveis de enlace como freqüência, comprimento (para enlaces terrestres), inclinação (para enlaces via satélite) e limiar de atenuação. Uma análise com esta abrangência, envolvendo dados de taxa de variação da atenuação da atenuação em enlaces terrestres e via satélite, é uma das contribuições originais desta tese.

É importante observar que foi obtido um grande volume de resultados nesta análise. Embora todos estes resultados tenham sido usados na modelagem da taxa de variação da atenuação, nas seções seguintes serão apresentados apenas exemplos, os quais devem ser considerados como típicos dos resultados representados.

4.1.

Densidades de probabilidade medida da taxa de variação da atenuação por chuvas

O objetivo da análise foi obter as densidades de probabilidades da taxa de variação da atenuação para diferentes níveis de atenuação excedidos. O conjunto de densidades empíricas, obtido para todos os anos-sítio será usado posteriormente para a construção de um modelo paramétrico de predição.

4.1.1.

Densidades de probabilidade da taxa de variação da atenuação nos enlaces Terra – satélite

Métodos para análise estatística da taxa de variação da atenuação ainda são motivos de intenso debate na comunidade científica. Conforme foi mencionado anteriormente as séries temporais de taxa de variação da atenuação são obtidas de dados de atenuação, sendo função dos tipos e parâmetros de filtros utilizados. Como uma abordagem padronizada ainda não existe, há que se definir algumas escolhas neste ponto.

Os enlaces via satélite usados neste estudo têm freqüência de 11,4 GHz. De uma forma geral, as densidades de probabilidade obtidas possuem aspecto multimodal, sugerindo a composição de efeitos e, em conseqüência, de densidades.

Esta característica multimodal se evidencia fortemente para atenuações acima de 10 dB. Para as limiares de atenuação inferiores a 10 dB, valores muito baixos de taxa de variação são totalmente dominantes. A figura 4.1 apresenta as densidades de probabilidade obtidas para o enlace terra-satélite com ângulo de elevação 89⁰, operando na faixa de 11,4 GHz em Belém, para atenuações excedidas entre 1dB e 40 dB. As curvas, para um grande número de limiares, são apresentadas desta forma propositalmente, para mostrar as características não uniformes das densidades.



Figura 4.1 – Densidades de probabilidade obtidas para o sítio de Belém (Mosqueiro) (latitude: 01°27' S).

Uma visão melhor deste comportamento é apresentada na figura 4.2. O gráfico de superfície mostra o comportamento crescentemente multimodal das densidades com o aumento do limiar da atenuação excedida.



Figura 4.2 – Densidades empíricas de probabilidade para o enlace de Belém (Mosqueiro).

O padrão intrincado das densidades de probabilidade pode ser visualizado nas curvas de nível, como na figura 4.3.



Figura 4.3 - Curvas de nível relativas ao enlace Belém (Mosqueiro).

O aparecimento dos múltiplos modos pode ser devido a uma combinação de efeitos de diferentes tipos de chuvas, bem como a uma limitação do estimador, cuja tendenciosidade estatística é inversamente proporcional ao número de pontos

usados na criação da curva de densidade. Esta tendenciosidade estatística corresponde a orientação de uma série de dados para níveis de atenuação excedidos próximas do nível máximo de atenuação.

O número de amostras de taxa de variação da atenuação tende a diminuir com o aumento do limiar. Como veremos mais tarde, a aplicação de modelos multimodais para as elevadas faixas de atenuação de interesse prático não apresentam uma relação custo-benefício que justifique a maior complexidade do modelo. A multimodalidade, no entanto, pode ser usada para reduzir o espaço possível de densidades candidatas no sentido que densidades muito impulsivas, como a lorentziana, são preteridas em favor de densidades mais maleáveis como a gaussiana.

A multimodalidade é uma característica que existe em todos os resultados, independentemente da latitude e, portanto, do clima. Isto se evidencia no resultado apresentado na figura 4.4, representando as densidades obtidas para o sítio de Porto Alegre, com ângulo de elevação de 55⁰ operando na faixa de 11,4 GHz.



Figura 4.4 – Densidades de probabilidades obtidas para o sítio de Porto Alegre (latitude: 30°03'S).

As curvas de nível relativas a este exemplo são apresentadas na figura 4.5.

48



Figura 4.5 - Curvas de nível relativas as densidades empíricas apresentadas na figura 4.4 para o sítio de Porto Alegre.

A acentuada irregularidade nos limiares superiores a 18 dB é devida, no caso de Porto Alegre, a tendenciosidade estatística dos estimadores devida a baixa quantidade de eventos acima de 18 dB.

4.1.2. Densidades de probabilidade da taxa de variação da atenuação nos enlaces terrestres

As funções densidade de probabilidade da taxa de variação da atenuação para enlaces terrestres apresentaram, em geral, um formato mais suave que as curvas para os enlaces via satélite. Isto pode ser devido ao fato de que estes enlaces estão sujeitos apenas às variações da distribuição espacial da chuva no plano horizontal, enquanto que os enlaces via satélite sofrem também o efeito de variações verticais, que podem ser intensas no caso de chuvas convectivas.

O que se observa na figura 4.6 é típico de todos os resultados obtidos: as baixas atenuações, representadas pelos níveis inferiores a 15 dB, apresentam uma alta curtose, ou seja, densidades com uma grande concentração de valores próximos à média. Com o aumento do limiar de atenuação, as distribuições se tornam mais espalhadas. Para os níveis muito altos de atenuação o decaimento no número de pontos de taxa de variação da atenuação, o que aumenta a tendenciosidade estatística das distribuições. É importante notar que, mesmo com

o aumento do desvio padrão com a atenuação, as densidades permanecem com uma grande concentração de pontos próximos à média.



Figura 4.6 – Perfil dos formatos das densidades de probabilidade para um enlace terrestre.

Para melhor ilustrar o perfil das densidades, a figura 4.7 apresenta uma visão de topo da superfície mostrada na figura 4.6.



Figura 4.7 – Mapa de curvas de nível relativas a figura 4.6.

Verifica-se que a maior concentração de pontos se encontra aproximadamente entre +0.1 e -0.15 dB/s. Esta tendência na direção das taxas negativas indica que a atenuação demora mais a voltar a zero do que a sair do zero para o seu valor máximo. Além de um efeito característico da variação espaçotemporal da taxa de precipitação, fatores como antena molhada podem contribuir para esta demora na recuperação do enlace. A quantificação deste último efeito é muito difícil, tornando-se inviável na prática, conforme atestado por Amaya [17] no seu recente trabalho.

A título de comparação com o modelo de Van de Kamp apresentado na seção 2.2.2, a figura 4.8 mostra o resultado das densidades de probabilidade condicionais ao valor da atenuação do enlace ESAF, ou seja, os valores de taxa de variação da atenuação são calculados de forma quase-pontual. Uma faixa de 1dB é determinada, com cada nível de atenuação no centro. As taxas de variação da atenuação são então calculadas dentro desta faixa e os valores obtidos formam as densidades apresentadas na figura 4.8.



Figura 4.8 – Funções densidade de probabilidade condicionais ao valor de atenuação. Os valores de atenuação de 1 dB até 40 dB a um passo de 1 dB.

Fica evidente, da figura 4.8, que as densidades obtidas possuem ondulações multimodais que não são contempladas pelo modelo de Van de Kamp, cujas curvas, apresentadas na figura 2.16, são repetidas na figura 4.9 para facilitar a comparação.



Figura 4.9 (repetição da figura 2.16) – Modelo de Van de Kamp.

A inadequação deste modelo a dados empíricos tem sido verificada em estudos como o de Pan et al. [18]. Este resultado foi observado em todos os anossítio tanto em enlaces terrestres como via satélite.

4.2. Modelagem da densidade de probabilidade da taxa de variação da atenuação por chuvas

O objetivo da análise apresentada nesta seção é estimar uma distribuição de probabilidade da taxa de variação da atenuação adequada para a modelagem das análises estatísticas.

4.2.1. Escolha da densidade para modelagem

Do ponto de vista das densidades empíricas obtidas para enlaces satélite e terrestre, não se pôde observar grandes diferenças morfológicas que justificassem a afirmativa de que os fenômenos representados pelas densidades seriam fundamentalmente diferentes. O que se concluiu, via de regra, foi a suavização dos modos das densidades com o aumento da freqüência, resultado observado por

Pan et al. [18] em enlaces satélite, mas que também se observou em enlaces terrestres neste trabalho, conforme será visto posteriormente.

A obtenção do modelo de ajuste para representar a função densidade de probabilidade da taxa de variação da atenuação por chuvas para um determinado nível excedido de atenuação baseia-se na comparação estatística de dois modelos: o modelo lorentziano, por apresentar as características leptocúrticas observadas nas densidades empíricas da taxa de variação da atenuação, principalmente para baixos níveis de atenuação e o modelo lorentziano, é mais tratável matematicamente.



Figura 4.10 – Comparação entre ajustes Lorentziano e Gaussiano para o enlace terrestre de Paranapiacaba (d =42 km, f =15 GHz).



Figura 4.11 – Comparação entre ajustes Lorentziano e Gaussiano para o enlace satélite de Belém (Mosqueiro) (f =11,4 GHz).

No conjunto de resultados, dos quais os gráficos apresentados nas figuras 4.10 e 4.11 são exemplos típicos, que os ajustes gaussiano e lorentziano são estatisticamente equivalentes. A escolha do modelo gaussiano baseia-se na facilidade da aplicação deste modelo no problema de cruzamento de níveis, o qual é fundamental no desenvolvimento de modelos de simulação de séries temporais da taxa de variação da atenuação.

O próximo passo na criação do modelo de predição das características da distribuição gaussiana é a escolha de algumas variáveis independentes. Estas variáveis serão combinadas linearmente no modelo multilinear que será construído mais adiante neste trabalho.

Basicamente, duas variáveis são dominantes em modelos envolvendo dados de propagação: freqüência e distância. Nas seções seguintes, serão analisadas as relações entre as características das densidades empíricas e estas variáveis.

4.2.2. Dependência com a freqüência

Neste estudo evidenciou-se a diminuição do desvio padrão com a freqüência, já observado por [18] em enlaces terrestres. A seguir são apresentadas as figuras 4.12 a 4.15, correspondentes a densidades empíricas obtidas em enlaces operando: a 12 GHz (Rio de Janeiro, satélite), 15 GHz (Bradesco, terrestre), 23 GHz (Cassi, terrestre) e 38 GHz (Ceres, terrestre), onde a diminuição do desvio padrão com o aumento da freqüência pode ser notada.



Figura 4.12 – Densidade empírica obtidas em enlace operando a 12 GHz (Rio de Janeiro, satélite).



Figura 4.13 – Densidade empírica obtida em enlace operando a 15 GHz (Bradesco, terrestre).



Figura 4.14 – Densidade empírica obtida em enlace operando a 23 GHz (Cassi, terrestre).



Figura 4.15 – Densidade empírica obtida em enlace operando a 38 GHz (Ceres, terrestre).

4.2.3. Dependência com o comprimento do enlace

Para investigar a relação entre as densidades empíricas obtidas para enlaces terrestres e o comprimento do enlace, foram considerados dados de enlaces de mesma freqüência. Foi considerado o limiar de atenuação de 15 dB para todos os enlaces, de modo a obter um número de pontos que garanta a confiabilidade estatística dos resultados.

Não foi obtida dependência importante da média e desvio padrão das densidades empíricas com a distância. Isto não é de todo inesperado, dado que os enlaces são convergentes e de pequeno comprimento, não estando, em geral, sujeitos à influência de uma mesma célula de chuva em cada evento. Para exemplificar este resultado, a figura 4.16 apresenta a comparação entre as densidades empíricas obtidas para 3 enlaces operando em 23 GHz em Brasília.



Figura 4.16 – Variação da densidade empírica com a distância para 3 enlaces terrestres em 23 GHz. O limiar de atenuação é 15 dB.

4.2.4. Dependência com o ângulo de elevação para enlaces satélite

Para enlaces satélites, o comprimento da seção do enlace sujeita à ação da chuva depende da própria altura da chuva e do ângulo de elevação da antena. A figura 4.17 mostra a variação da densidade empírica com o ângulo de elevação para 3 enlaces satélite operando em 11,4 GHz.



Figura 4.17 – Variação da densidade empírica com a inclinação para 3 enlaces satélite em 11,4 GHz. O limiar de atenuação é 15 dB.

Também neste caso, não se pôde observar uma correlação significativa dos parâmetros das densidades empíricas com o ângulo de elevação.

Os resultados combinados das análises de correlação indicam que a melhor opção de modelo para relacionar as características das densidades com parâmetros de enlace é um modelo multilinear, no qual diferentes variáveis, mesmo que diretamente não correlacionadas com as variáveis dependentes podem se compor para um resultado aceitável.

O próximo passo no desenvolvimento do modelo é investigar o comportamento dos parâmetros das densidades empíricas com o limiar de atenuação. Trabalhos relacionados à taxa de variação da atenuação apresentam resultados divergentes. Alguns mencionam um comportamento crescente da média com a atenuação, mas não há, tanto quanto se pôde apurar, resultados envolvendo o desvio padrão. Estas duas variáveis serão as variáveis dependentes no modelo que será desenvolvido mais adiante nesta tese.

4.2.5.

Comportamento da média e desvio padrão da distribuição com o limiar de atenuação

O passo seguinte para a construção do modelo de predição foi investigar o comportamento dos parâmetros das densidades empíricas com o limiar de atenuação. Foram geradas tabelas dos valores de média e desvio padrão com o limiar de atenuação, as quais estão apresentadas de forma completa no apêndice A. A figura 4.18 apresenta o comportamento da média com limiar de atenuação para os enlaces satélite.



Figura 4.18 – Variação da média com o limiar de atenuação para os enlaces satélite.

Nota-se, na figura 4.18, que o comportamento das curvas é bastante semelhante entre 5 dB e 15 dB, que é a região com maior concentração de pontos da taxa de variação da atenuação. O valor da média se manteve negativo para a região de maior concentração de pontos. Após 15 dB, o número de pontos da taxa de variação da atenuação se reduz bastante com o limiar, o que causa as irregularidades observadas.

O enlace de Porto Alegre foi o que apresentou a menor quantidade de eventos de atenuação, o que explica o comportamento bastante peculiar da curva após 18 dB.

Não se pôde observar nenhuma regularidade nas curvas que contribuísse para construção de um modelo.

O perfil do desvio padrão versus a atenuação é apresentado na figura 4.19.



Figura 4.19 – Variação do desvio padrão com o limiar de atenuação para os enlaces satélite.

Existe uma tendência puramente qualitativa de aumento do desvio padrão com o limiar de atenuação. Este resultado já havia sido observado por Pan et al. [18], mas pode estar ligado a um grau de tendenciosidade estatística nos estimadores devido ao menor número de pontos em altas atenuações.

A figura 4.20 mostra o perfil da média com a atenuação para os enlaces terrestres de São Paulo.



Figura 4.20 – Variação da média com o limiar de atenuação para os enlaces terrestres de SP.

Nota-se um leve crescimento da média com o limiar de atenuação, para todos os enlaces, com exceção de Scania. Uma nota de interesse é a estabilidade do enlace de Paranapiacaba, que é o mais extenso dos enlaces experimentais. A extensão de 43 km causa um maior número de eventos de taxa de variação da atenuação em elevadas atenuações. Perfil semelhante foi observado em Cenesp 15 (12,78 km) e Barueri (21,69 km), o que evidencia a já verificada independência da média com o comprimento do enlace.

As curvas do desvio padrão em função do limiar de atenuação são apresentadas na figura 4.21.



Figura 4.21 – Variação do desvio padrão com o limiar de atenuação para os enlaces terrestres de São Paulo.

Verifica-se uma tendência geral de decaimento para as curvas, exceto para Scania, cujo comportamento fora de padrão já tinha sido observado na avaliação da média.

Para os enlaces terrestres de Brasília, a figura 4.22 apresenta a curva da média com a atenuação. Neste gráfico: MinF é o enlace do Ministério da Fazenda; ProjBRA é o enlace de Projeto BRA.



Figura 4.22 – Variação da média com o limiar de atenuação para os enlaces terrestres de Brasília.

O comportamento da média é bastante irregular para os enlaces de Brasília. Notadamente, o enlace de Cassi de 23 GHz (0,76 km), que é o menor entre os enlaces terrestres, possui o comportamento mais irregular. Não há motivo aparente para este comportamento, pois MinF, que é o outro enlace curto (1,21 km) de 38 GHz não apresentou tal comportamento.

A curva de variação do desvio padrão pode ser vista na figura 4.23. Neste gráfico MinF é o enlace do Ministério da Fazenda. Ao contrário dos enlaces de São Paulo, o desvio padrão tende a aumentar com a atenuação. Este resultado indica que não há dados suficientes para se chegar a uma conclusão a respeito das tendências envolvendo os parâmetros das densidades de probabilidade empíricas.



Figura 4.23 – Variação do desvio padrão com o limiar de atenuação para os enlaces terrestres de Brasília.

4.2.6. Conclusões

A densidade gaussiana foi escolhida para a modelagem, apesar do bom ajuste também obtido com densidade de Lorentz. Esta opção foi adotada porque a gaussiana possui vantagens operacionais importantes, principalmente na solução do problema de cruzamento de níveis.

As densidades empíricas apresentaram múltiplos modos, principalmente em altas atenuações. Entretanto, estes modos não prejudicaram significativamente os ajustes gaussianos. O uso de densidades mistas, que ajustariam melhor densidades multimodais, não se justifica dada a complexidade do problema de cruzamento de níveis quando aplicado à mistura de densidades.

Não se verificou correlação direta entre os parâmetros da distribuição (média e desvio padrão) e variáveis individuais de enlace (freqüência, comprimento, inclinação e limiar de atenuação). Este resultado aponta para um modelo cooperativo do tipo multilinear como o mais adequado. No próximo capítulo, é avaliado o uso de um modelo multilinear na estimação da média e desvio padrão da distribuição gaussiana, baseado no uso de variáveis independentes de enlace.