

## 4 Análise dos dados de atenuação por chuva

A atenuação por chuva tem características estacionárias e dinâmicas que podem ser analisadas através de suas estatísticas.

### 4.1. Estatísticas estacionárias da atenuação por chuva

As estatísticas estacionárias de atenuação por chuva são descritas através da função distribuição cumulativa complementar (CCDF) que permite determinar o valor de atenuação que pode ser excedido em cada percentual de tempo. No caso dos cinco enlaces terrestres tratados nesta pesquisa, estas estatísticas estão apresentadas no gráfico da Figura 4.1.

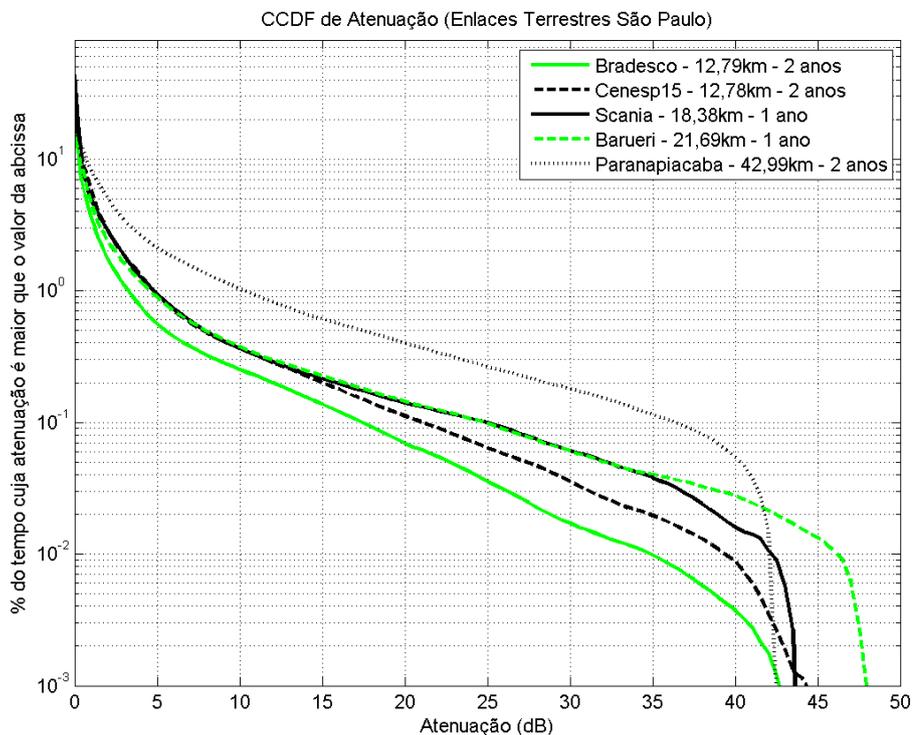


Figura 4.1 – CCDF de atenuação por chuva dos enlaces terrestres

A distribuição estacionária de chuvas permite especificar a margem requerida para a operação de um enlace de modo a atender requisitos mínimos de disponibilidade do sistema. Em regiões em que os enlaces estão sujeitos a intensidades severas de atenuação por chuva, valores altos de margem podem ser necessários para atender as especificações do projeto, mas tais valores podem não ser possíveis de serem utilizados sob o aspecto técnico e, principalmente, sob o ponto de vista comercial por não otimizarem o uso do canal de comunicação.

A otimização do uso do canal é buscada através de técnicas adaptativas que são utilizadas como forma de mitigação dos desvanecimentos. O controle automático da potência transmitida é uma destas técnicas e permite que a potência transmitida seja aumentada durante condições severas de atenuação e volte ao nível anterior quando as condições voltam ao estado anterior. Outras técnicas consistem na alteração dos tipos de modulação e codificação utilizadas.

As estatísticas estacionárias da atenuação por chuva, entretanto, não são suficientes para caracterizar o canal de rádio de enlaces terrestres fixos e auxiliar no projeto das técnicas de mitigação de desvanecimentos uma vez que não trazem informações sobre a dinâmica da atenuação no que se refere à duração dos eventos de atenuação e à taxa de variação da atenuação (*fade-slope*). Estas informações estão relacionadas com as estatísticas de segunda ordem da atenuação.

## **4.2. Estatísticas dinâmicas da atenuação por chuva**

### **4.2.1. Taxa de variação da atenuação (*fade-slope*)**

O *fade-slope* descreve a taxa de variação da atenuação por chuva e está ilustrado na Figura 4.2.

Não existe uma relação única entre o *fade-slope* e a taxa de chuvas. Sweeney & Bostian [19] apresentaram estudos da dinâmica da atenuação por chuva que mostram que o *fade-slope* é mais sensível à velocidade de queda das gotas de chuva do que à taxa de chuva e que a velocidade de queda das gotas de chuva varia com o tamanho das gotas. Além disto, o valor máximo do *fade-slope* é alcançado quando a metade da primeira zona de Fresnel é preenchida, enquanto a atenuação máxima ocorre quando a zona é totalmente preenchida. Van de Kamp

[20] mostra que o tipo de chuva, estratiforme ou convectiva, também tem influência sobre o *fade-slope*.

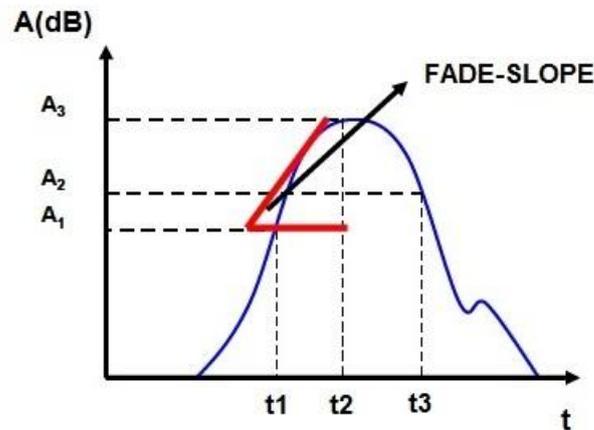


Figura 4.2 – Ilustração do *fade-slope*

No caso de uma série temporal de atenuação por chuva, o *fade-slope* pode ser calculado diretamente para cada amostra da série conforme a Equação 4.1 [21]:

$$\zeta(t, \Delta t) = \frac{A(t + \Delta t) - A(t)}{\Delta t} \quad (4.1)$$

onde  $A$  é a atenuação (dB) e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre as amostras (s).

Antes de realizar o cálculo do *fade-slope* a partir de uma série temporal, entretanto, é necessário remover a componente de variação rápida da atenuação que inclui os efeitos de ruídos. Isto é realizado através de uma filtragem passa-baixa. Um filtro do tipo janela de média móvel (*moving average window*) ou do tipo  $\cos^2$  (*raised-cosine*) pode ser usado [20].

O filtro janela de média móvel atua substituindo cada amostra pela média das amostras dentro da janela de comprimento  $t_a$  em torno da amostra. O filtro  $\cos^2$  atua de maneira análoga, a diferença é que, antes de realizar a média, ele multiplica as amostras dentro do bloco por uma função da forma  $\cos^2$ . O comprimento  $t_a$  da janela (ou bloco) depende da frequência de corte desejada.

Para tratar os dados experimentais neste trabalho foi utilizado um filtro passa-baixa do tipo  $\cos^2$  com frequência de corte igual a 0,025Hz [07]. No caso

deste tipo de filtro, Van de Kamp [20] mostra que para a obtenção deste valor de frequência de corte na prática é necessário que o tamanho de bloco seja calculado pela seguinte equação:

$$t_a = \frac{0,719}{f_c} \quad (4.2)$$

Para uma frequência de corte igual a 0,025Hz, portanto, um bloco de 28,75 segundos no filtro  $\cos^2$  deve ser utilizado.

Depois de removidas as variações rápidas da atenuação o cálculo do *fade-slope* é realizado para níveis pré-determinados de atenuação.

Considerando o que foi exposto, o cálculo do *fade-slope* depende de dois fatores: o intervalo de tempo  $\Delta t$  e a largura de banda do filtro. O intervalo de tempo tem uma forte influência quando seu valor é maior que o inverso da largura de banda do filtro. Por outro lado, a largura de banda tem grande influência quando o inverso do seu valor é maior que o intervalo de tempo [22]. Sendo assim, o intervalo de tempo passa influir fortemente nos resultados do *fade-slope* para intervalos de tempo superiores a 40 segundos. Se considerarmos o ajuste proposto por Van de Kamp [20], a influência passará a ocorrer para intervalos superiores a 28,75 segundos.

Depois de removidas as variações rápidas da atenuação as estatísticas de *fade-slope* são calculadas para níveis pré-determinados de atenuação.

Para o cálculo do *fade-slope* foram considerados cinco valores de intervalos de tempo: 20, 30, 40, 50 e 60 segundos. Embora intervalos de tempo inferiores a 20 segundos sejam considerados na literatura para o cálculo do *fade-slope* [20, 21, 23], os dados experimentais dos enlaces Bradesco, Cenesp15, Scania e Barueri apresentam 10 segundos de intervalo entre amostragens  $t_s$ . Sendo assim, 20 segundos foi o valor mínimo do intervalo que foi considerado nos cálculos.

Para minimizar a influência da filtragem e do tempo de amostragem, o intervalo de 30 segundos foi o intervalo considerado nas análises, exceto quando o objetivo é avaliar a influência dos diferentes valores de intervalo.

As estatísticas de *fade-slope* são descritas através da distribuição que apresenta a probabilidade de que um dado valor absoluto de *fade-slope*  $\zeta$ , em dB/s, seja excedido em um dado nível de atenuação  $A$  (dB).

Os valores absolutos dos níveis de *fade-slope* e os níveis de atenuação utilizados na análise estatística dos dados experimentais correspondem a valores sugeridos na recomendação ITU-R P. 311-13 [24]:

- Valores absolutos dos níveis de *fade-slope*: 0,001, 0,002, 0,003, 0,005, 0,01, 0,02, 0,03, 0,05, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 1, 2, 3 e 5 dB/s.
- Níveis de atenuação: 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 dB.

A Figura 4.3 apresenta as distribuições de *fade-slope* para o enlace Cenesp15. Para facilitar a identificação das diferentes curvas, um gráfico apresenta as distribuições para os níveis de atenuação iguais a 3, 10, 20 e 30 dB e o outro gráfico apresenta os níveis de atenuação iguais a 5, 15, 25 e 35 dB.

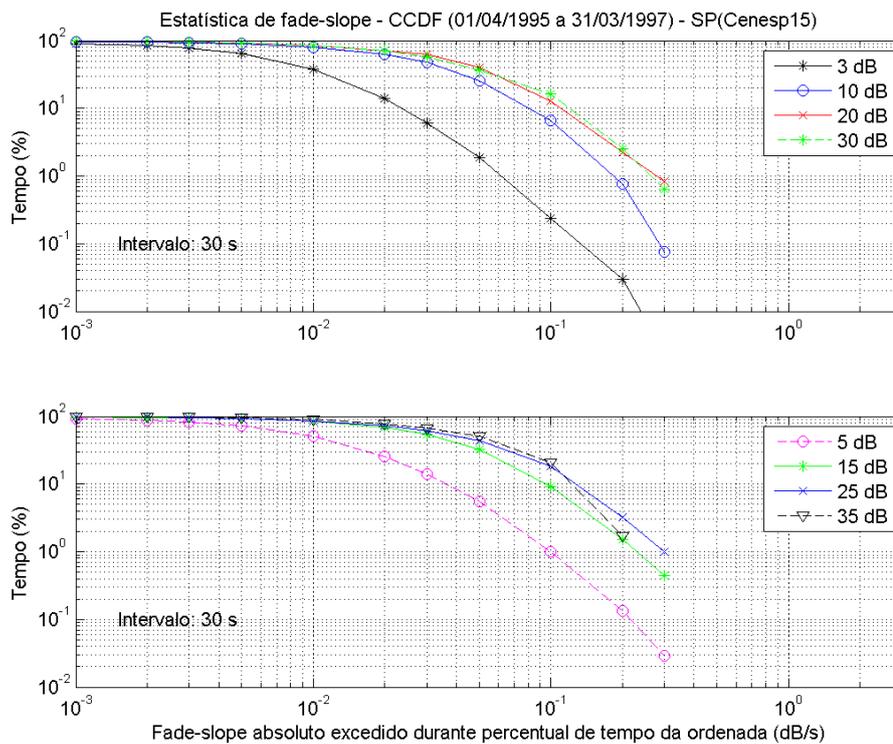


Figura 4.3 – Distribuição de *fade-slope* – Cenesp15 ( $\Delta t = 30$  s)

Os gráficos para os demais enlaces estão apresentados no Apêndice A.

Para avaliar a influência do tempo de amostragem ( $t_s$ ) dos dados nas estatísticas de *fade-slope*, foi criada uma série temporal experimental de atenuação por chuva com  $t_s$  igual a 10 segundos a partir da série temporal experimental original do enlace Paranapiacaba cujo valor de  $t_s$  é um segundo. A Figura 4.4

apresenta as distribuições de *fade-slope* para estes dois valores de  $t_s$  utilizando três níveis de atenuação.

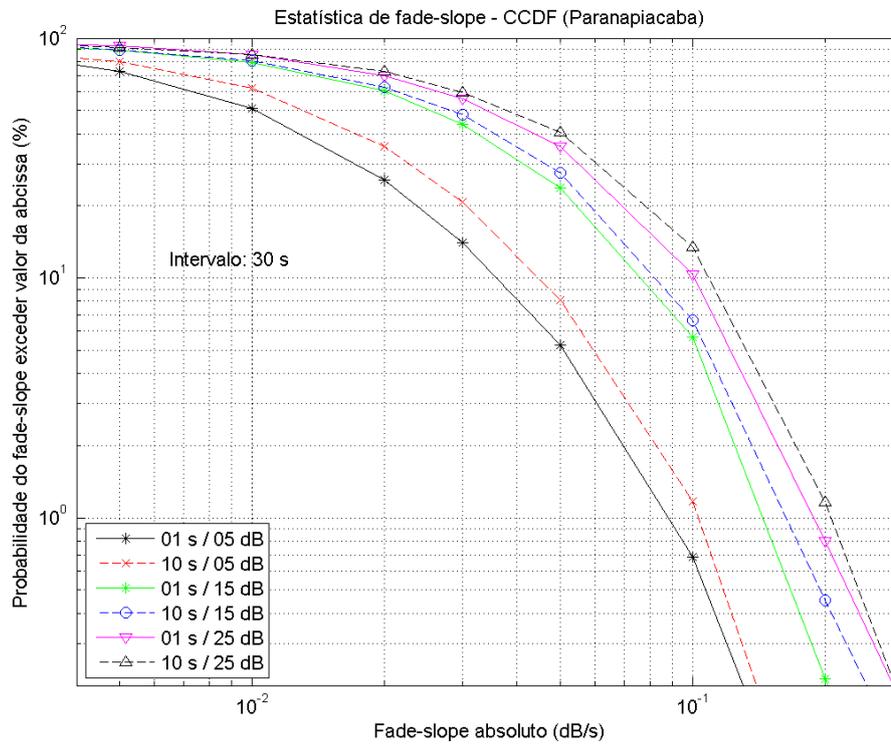


Figura 4.4 – Distribuições de *fade-slope* para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba ( $\Delta t = 30$  s)

É possível observar que a distribuição de *fade-slope* das séries temporais com  $t_s$  igual a 10 segundos apresenta um percentual maior de valores mais altos de *fade-slope* do que a série temporal de 1 segundo. O comportamento observado é o mesmo para os três níveis de atenuação sendo mais acentuado, entretanto, no nível de 5 dB.

Outros valores de intervalos para cálculo do *fade-slope* (20, 40, 50 e 60 segundos) foram avaliados e os resultados estão apresentados nos gráficos das Figuras 4.5 a 4.8. Os resultados mostram que o tempo de amostragem dos dados também influencia na distribuição de *fade-slope* para estes valores de intervalo de tempo  $\Delta t$ , mas a influência diminui à medida que o valor do intervalo aumenta. Quanto maior o intervalo, menor é a diferença entre os resultados para dados com valores de  $t_s$  iguais a 1 e 10 segundos, mas neste caso, como já foi afirmado, o valor do intervalo passa a influenciar também nos resultados e pode estar “mascarando” a influência do tempo de amostragem.

É possível observar nos gráficos das Figuras 4.5 a 4.8 que para intervalos iguais a 40 segundos ou superiores a influência do tempo de amostragem  $t_s$  é pouco perceptível para os níveis de atenuação iguais a 15 e 25 dB.

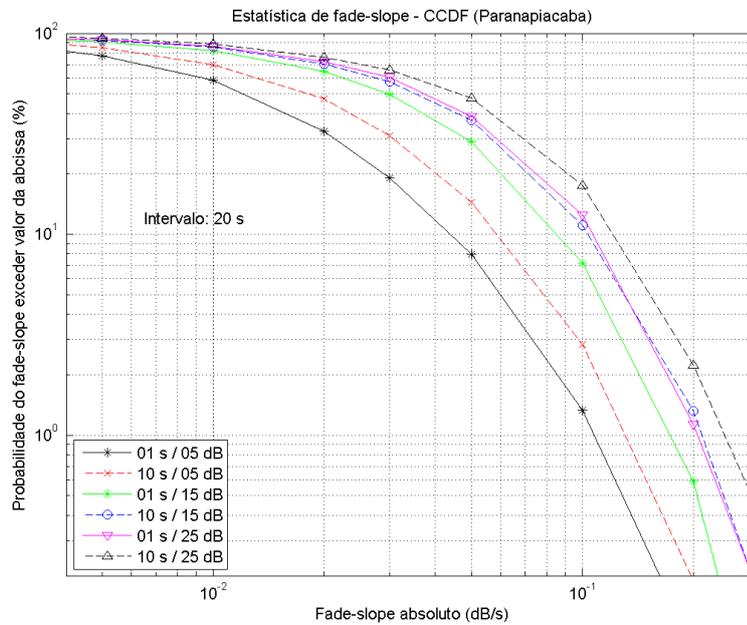


Figura 4.5 – Distribuições de *fade-slope* para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba ( $\Delta t = 20$  s)

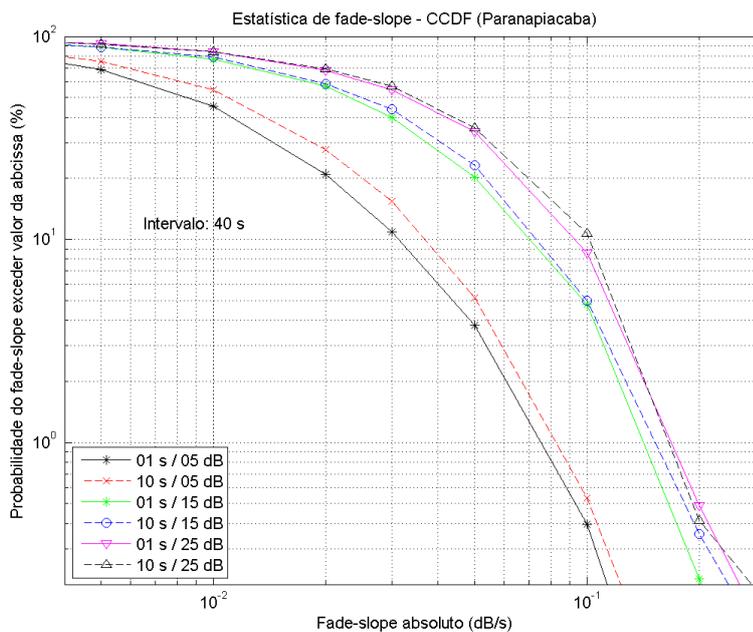


Figura 4.6 – Distribuições de *fade-slope* para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba ( $\Delta t = 40$  s)

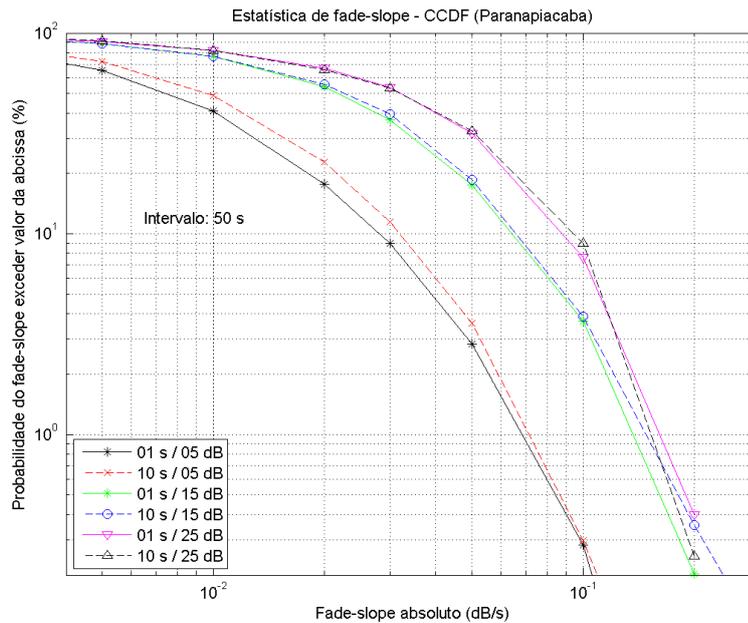


Figura 4.7 – Distribuições de *fade-slope* para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba ( $\Delta t = 50$  s)

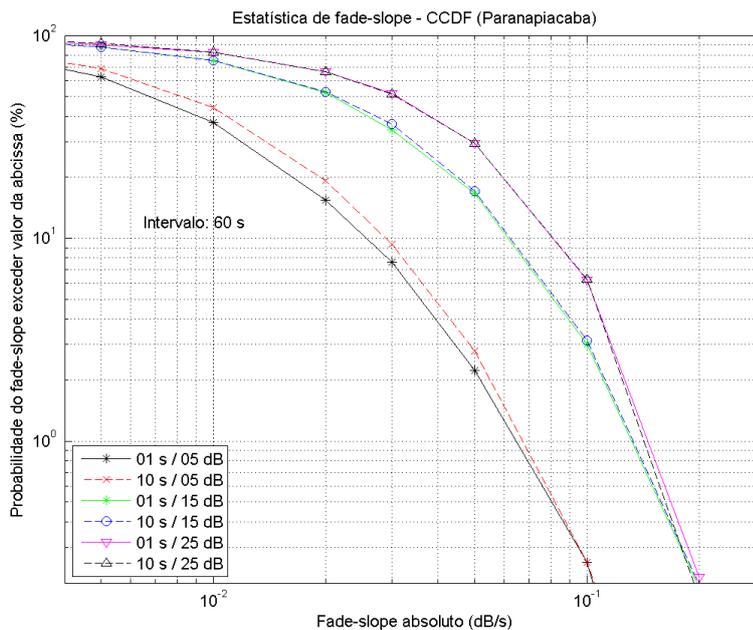


Figura 4.8 – Distribuições de *fade-slope* para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba ( $\Delta t = 60$  s)

Para que um nível elevado de atenuação seja atingido em um enlace longo, onde podem ocorrer chuvas mais distribuídas ou diversas células de chuva, são necessárias variações menos intensas da taxa de chuva. Por outro lado, em um enlace curto, que comporta apenas uma célula ou parte dela, valores elevados de atenuação tendem a requerer variações mais acentuadas das taxas de chuvas.

Assim, é possível que se observem menores valores de *fade-slope* com o aumento do percurso do enlace [02, 20].

Para comparar as estatísticas dos cinco enlaces, as distribuições de *fade-slope* para os níveis de 10 e 20 dB e intervalo de tempo igual a 30 segundos estão apresentadas na Figura 4.9. No caso do enlace Paranapiacaba as estatísticas são referentes à série temporal com  $t_s$  igual a 10 segundos para manter a coerência com os demais enlaces e possibilitar a comparação com a mesma referência.

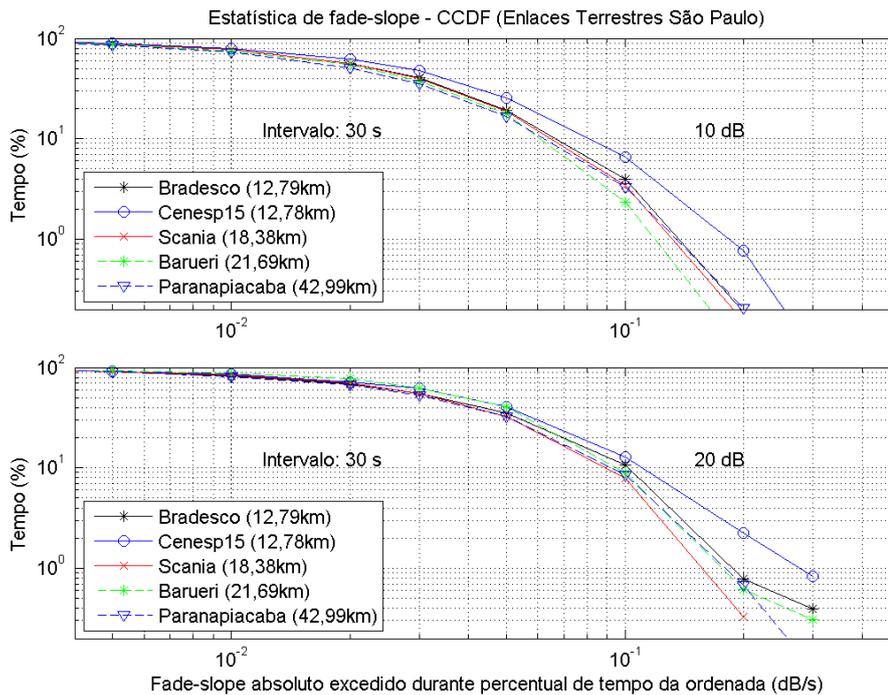


Figura 4.9 – Distribuições de *fade-slope* dos enlaces terrestres de SP (níveis de atenuação iguais a 10 e 20 dB,  $\Delta t = 30$  s)

As distribuições de *fade-slope* apresentadas na Figura 4.9, entretanto, não indicam a existência de uma relação direta de proporcionalidade entre a distância do enlace e a intensidade de *fade-slope* a que ele está sujeito. Isto confirma o que já foi apresentado neste trabalho sobre a existência de outros fatores de influência sobre os valores de *fade-slope*. Não se pode deixar de considerar, entretanto, que os dados de todos os enlaces não correspondem ao mesmo período de tempo e que as séries temporais não têm a mesma duração. Além disto, a direção de deslocamento da célula de chuva em relação ao percurso do enlace é um fator adicional. Quando são considerados apenas os enlaces Bradesco e Barueri, que formam um ângulo inferior a 12 graus, e, portanto, estão quase em linha reta

(Figura 3.2), uma relação direta entre os níveis de *fade-slope* e a distância do enlace passa a ser observada uma vez que o enlace Bradesco, que é mais curto, é mais sujeito a níveis mais altos de *fade-slope* que o enlace Barueri.

#### 4.2.2. Duração dos desvanecimentos

A duração de um desvanecimento é definida como sendo o intervalo de tempo em que o valor da atenuação permanece superior a um determinado nível pré-definido de atenuação e entre dois cruzamentos consecutivos deste mesmo nível, conforme está ilustrado na Figura 4.10.



Figura 4.10 – Ilustração da duração de desvanecimento

As estatísticas de duração de eventos utilizadas neste trabalho são descritas na recomendação ITU-R P. 311-13 [24] através de duas CCDFs:

- $P(d > D | a > A)$ , a probabilidade, entre 0 e 1, de ocorrência de desvanecimentos de duração  $d$  maior que  $D$  (s), dada que a atenuação  $a$  é maior que  $A$  (dB);
- $F(d > D | a > A)$ , a fração total de tempo de desvanecimento devido a desvanecimentos de duração  $d$  maior que  $D$  (s), dada que a atenuação  $a$  é maior que  $A$  (dB).

As durações de desvanecimentos utilizados na análise estatística dos dados experimentais correspondem a valores sugeridos na recomendação ITU-R P. 311-13 [24] levando em consideração as características dos dados experimentais dos enlaces analisados: 10, 30, 60, 120, 180, 300, 600, 900, 1200, 1500, 1800, 2400 e 3600 segundos.

Os níveis de atenuação são os mesmos que foram considerados nas estatísticas de *fade-slope*.

A Figura 4.11 apresenta as distribuições de número de desvanecimentos para o enlace Cenesp15 separadas em dois gráficos para facilitar a visualização das diferentes curvas. A Figura 4.12 apresenta as distribuições de tempo relativo de desvanecimento para o mesmo enlace.

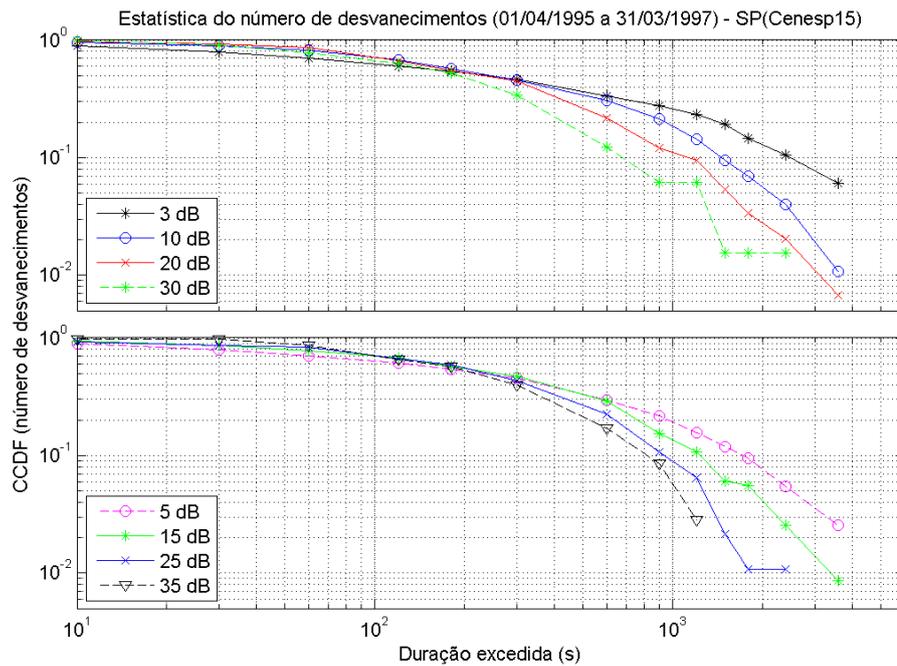


Figura 4.11 – Distribuições de número de desvanecimentos – Cenesp15

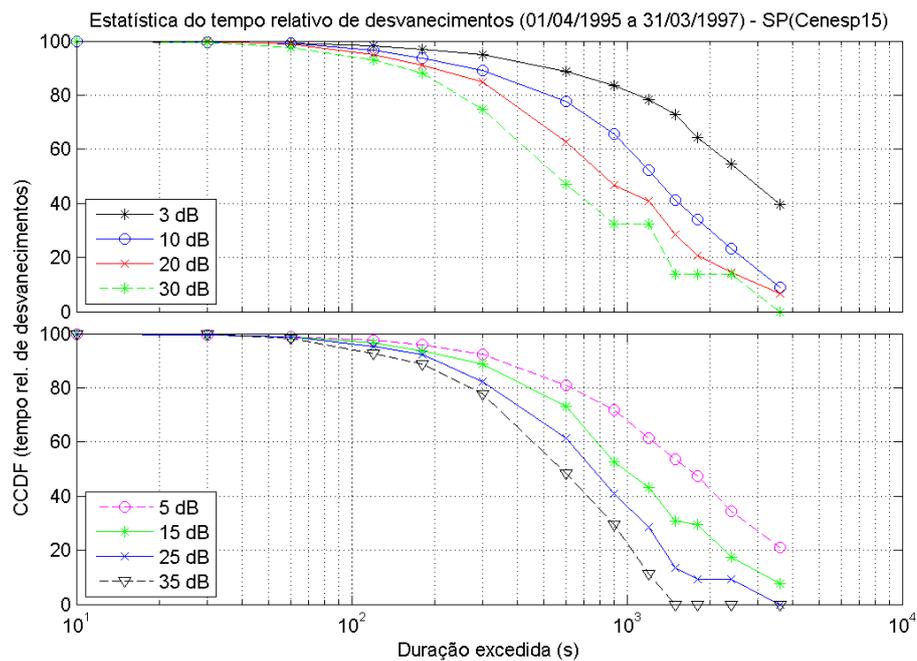


Figura 4.12 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimento – Cenesp15

Os gráficos para os demais enlaces estão apresentados no Apêndice A.

A análise da influência do tempo de amostragem ( $t_s$ ) dos dados nas estatísticas de duração de desvanecimentos foi feita com os dados do enlace Paranapiacaba da mesma forma como foi feito no caso do *fade-slope*. As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam as distribuições de número de desvanecimentos e tempo relativo de desvanecimento, respectivamente.

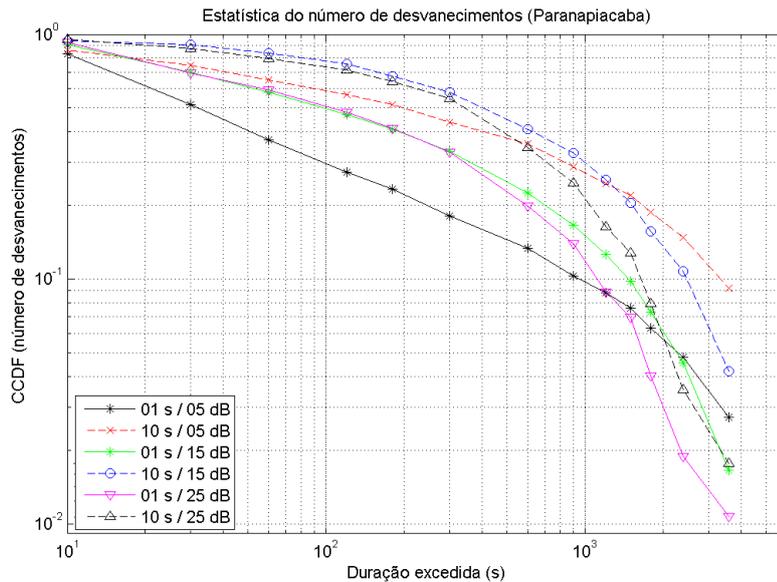


Figura 4.13 – Distribuições de número de desvanecimentos para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba

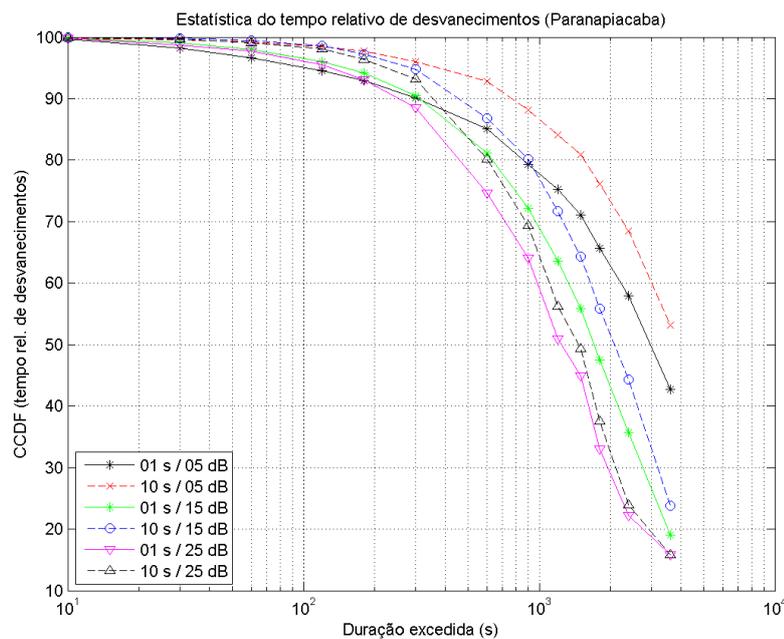


Figura 4.14 – Distribuições de tempo relativo de desvanecimentos para diferentes níveis de atenuação e tempos de amostragem – Paranapiacaba

É possível observar que a distribuição de número de desvanecimentos das séries temporais com  $t_s$  igual a 10 segundos apresenta um percentual maior de desvanecimentos de duração mais longa do que a série temporal de um segundo. Esta tendência é observada nos três níveis de atenuação, sendo mais acentuada, entretanto, no nível de 5 dB. Resultado análogo ocorreu nas estatísticas de tempo relativo de desvanecimento. Portanto, o tempo de amostragem dos dados experimentais também influencia as estatísticas de duração de desvanecimentos.

Uma comparação entre as distribuições de duração de desvanecimentos dos cinco enlaces para o nível de 20 dB está apresentada nas Figuras 4.15 e 4.16. No caso do enlace Paranapiacaba, as estatísticas são referentes à série temporal com  $t_s$  igual a 10 segundos para manter a coerência com os demais enlaces.

Nesta comparação é observada uma tendência de que os enlaces mais curtos tenham mais desvanecimentos de menor duração que os enlaces mais longos, especialmente no caso do nível de 20 dB. A mesma tendência pode ser observada nas estatísticas de tempo relativo de desvanecimento.

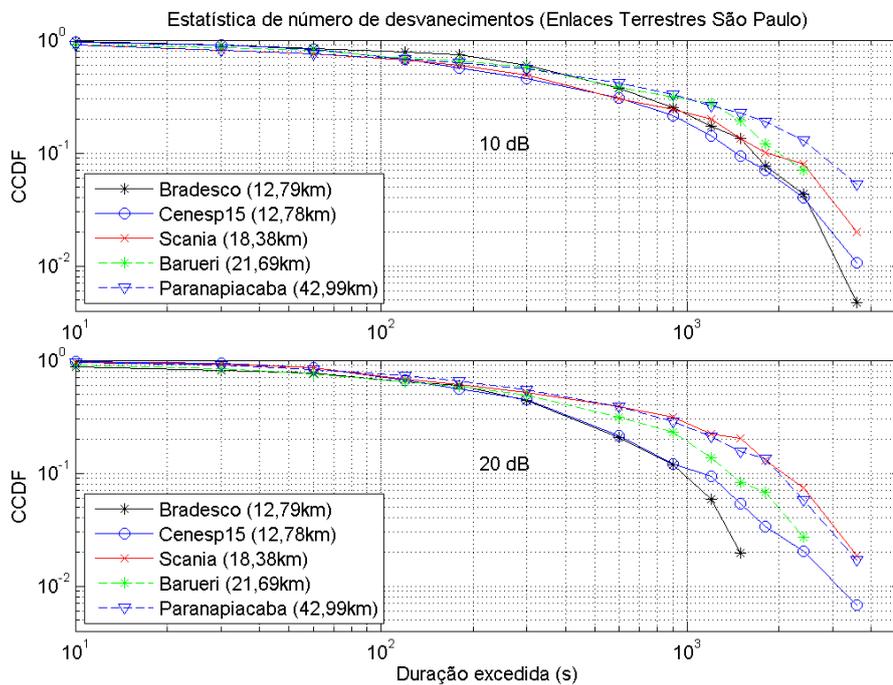


Figura 4.15 – Distribuição de número de desvanecimentos dos enlaces terrestres de SP

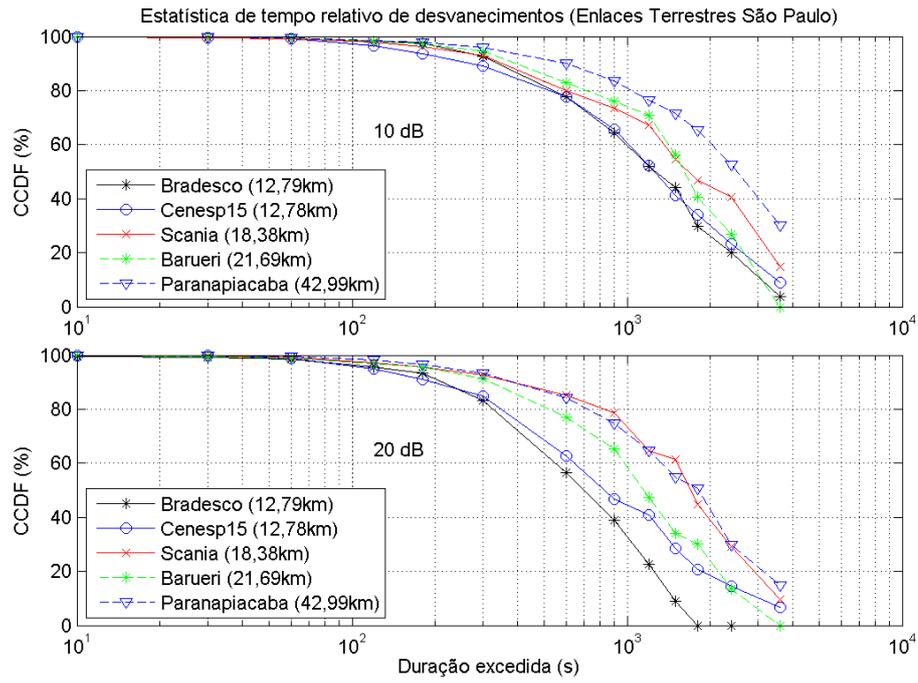


Figura 4.16 – Distribuição de tempo relativo de desvanecimento dos enlaces terrestres de SP