

5. Resultados

Este capítulo tem como objetivo expor os resultados das análises estatísticas de variabilidade do sinal transmitido pelo canal de rádio propagação móvel, bem como expor os resultados de correlações entre as subportadoras faixa estreita OFDM, resultando no valor médio de banda de coerência do canal em dois ambientes *outdoors*, sendo eles: LOS e NLOS. Uma vez conhecida a banda de coerência, é realizado o cálculo do *delay spread*, utilizando fórmulas presentes na literatura especializada [10, 52].

Os resultados referentes à variabilidade do sinal são apresentados na primeira seção deste capítulo. A seção 5.2 abrange o resultado da correlação entre as subportadoras faixa estreita do sinal OFDM, obtido durante medições em campo, e a determinação da banda de coerência com base na correlação de 50%. Por fim, na seção 5.3 são apresentados os valores de *delay spread*.

5.1. Variabilidade do sinal

Tinha-se como objetivo deste trabalho fazer a análise de variabilidade em larga e pequena escala, entretanto, devido à limitação do tempo de captura (400 ms) do equipamento de recepção, utilizado ao longo das medições (Signature – MS2781B), a análise de desvanecimento em larga escala caracterizou-se como inviável de ser realizada, uma vez que é necessária a informação de diversos setores consecutivos para realizá-la. Com isto, o escopo do estudo da variabilidade do sinal restringe-se à análise de desvanecimento em pequena escala, na qual deve ser utilizada a informação de apenas um setor, como descrito nos capítulos 2 e 3.

As distribuições de probabilidade baseiam-se na informação da média e variância do nível do sinal. Entretanto, em casos práticos, não é possível conhecer, com exatidão, os parâmetros acima citados (média e variância), logo é realizada uma estimativa com base em um número finito, N , de amostras. A Equação 5.1 retrata a estimativa da média do nível do sinal enquanto que a Equação 5.2 define a estimativa da variância do sinal.

$$\hat{m}_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{Equação 5.1}$$

$$\hat{\sigma}_r^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{m}_r)^2 \quad \text{Equação 5.2}$$

Os resultados da análise de variabilidade do sinal abrangem informações de ambiente *outdoor*, receptor em situação de visada direta e indireta, análise da distribuição cumulativa do sinal obtido em medição, comparação entre a distribuição cumulativa do sinal empírico e as distribuições teóricas, taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento. Estas informações são apresentadas nas subseções seguintes deste capítulo.

5.1.1.

Função distribuição cumulativa

O sinal OFDM 256 possui 8 subportadoras piloto utilizadas pelo sistema WiMAX para realizar a estimativa do canal e equalização do sinal. Estas 8 subportadoras foram escolhidas para ter suas distribuições cumulativa geradas. Além desta análise, foram gerados gráficos que exibem cada subportadora piloto em comparação com as distribuições teóricas Rayleigh e de m-Nakagami. Os resultados são organizados em ambientes nos quais a unidade móvel se encontra em visada direta e sem visada, com o objetivo de melhor visualizar e compreender os resultados. A Figura 5.1 e a Figura 5.2 mostram as funções de distribuição de probabilidade cumulativas das oito subportadoras piloto, no momento em que o receptor móvel está em condição de visada direta, sendo a primeira medição mais próxima da antena transmissora e a segunda, mais afastada da referida antena. A Figura 5.3 e a Figura 5.4 têm o mesmo objetivo que as Figura 5.1 e Figura 5.2, entretanto caracterizam setores em NLOS.

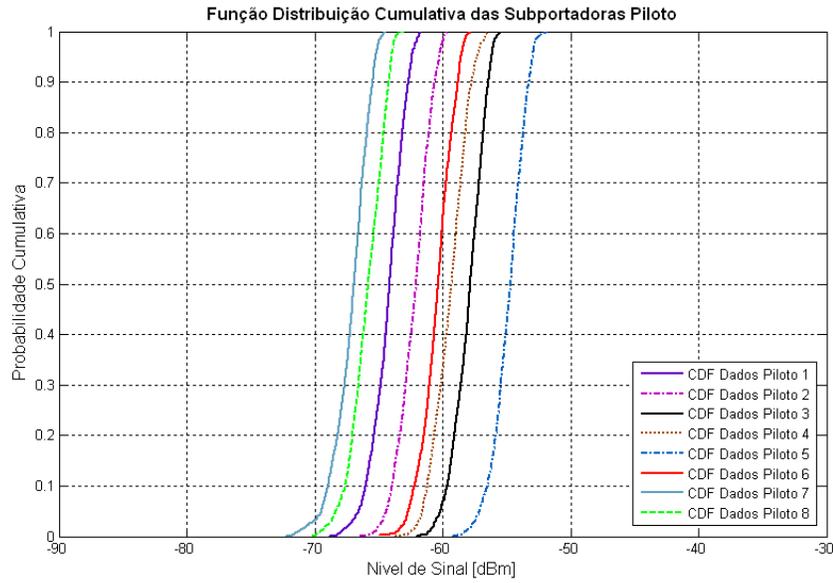


Figura 5.1: Distribuição cumulativa das subportadoras piloto de um setor da Rua Mário Ribeiro, a 315m da antena transmissora. Ambiente LOS.

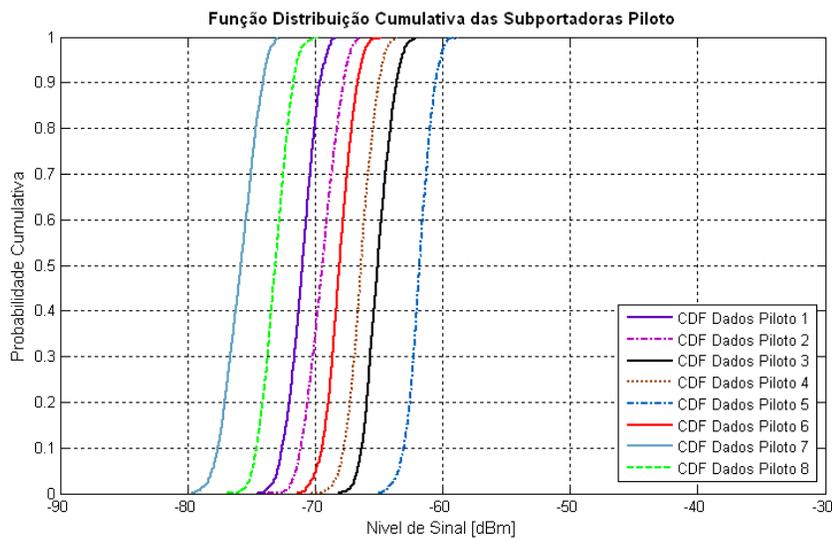


Figura 5.2: Distribuição cumulativa das subportadoras piloto de um setor da Rua Mário Ribeiro, a 1,5 km da antena transmissora. Ambiente LOS.

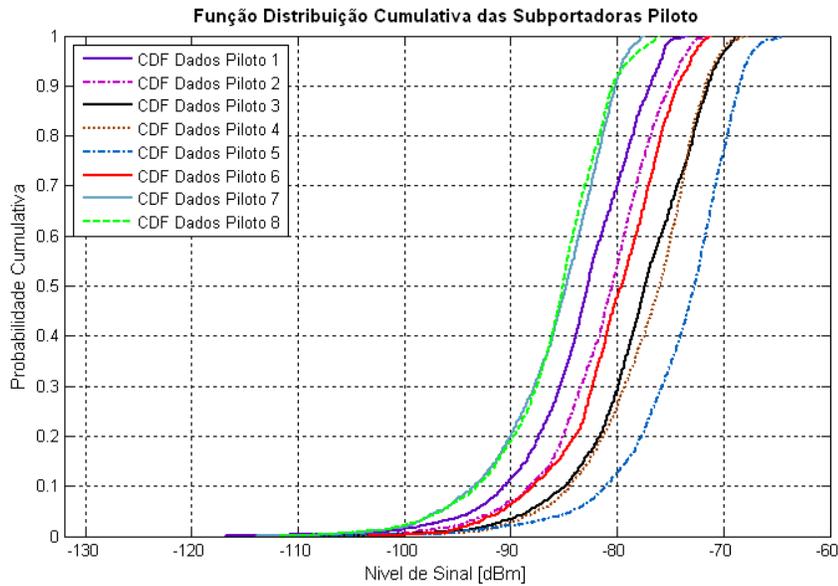


Figura 5.3: Distribuição cumulativa das subportadoras piloto de um setor da Rua Padre Leonel. Ambiente NLOS.

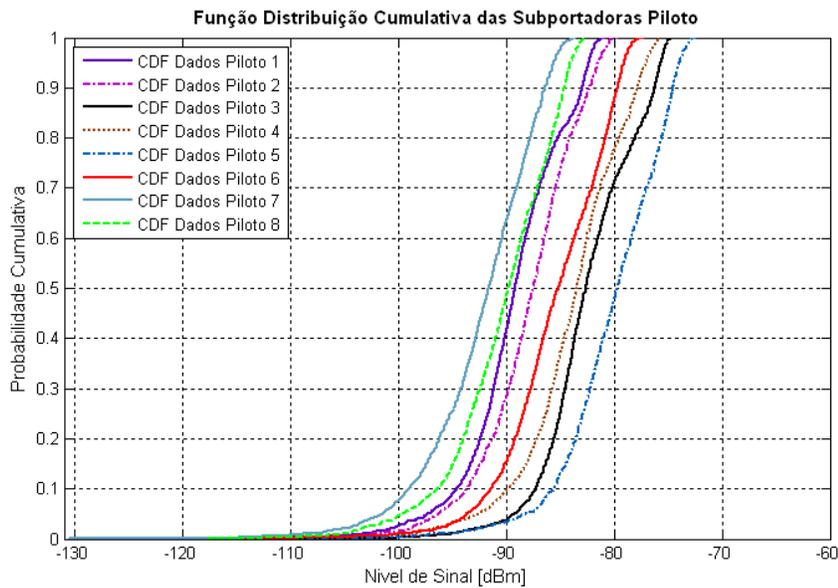
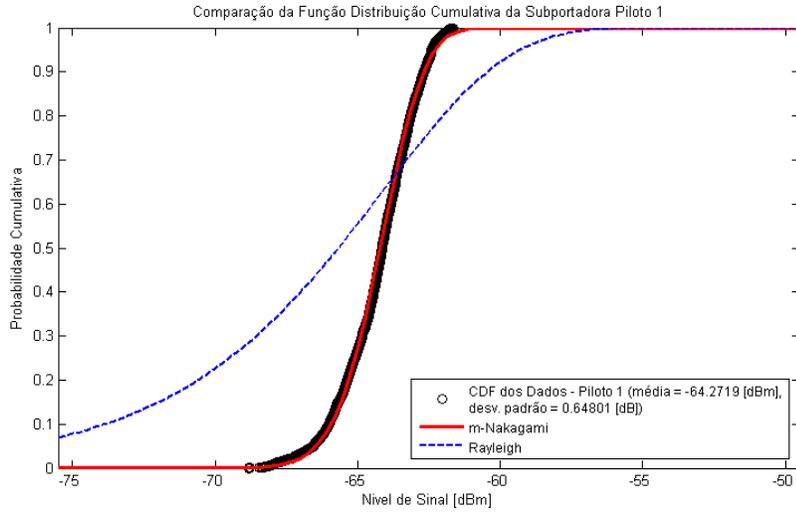
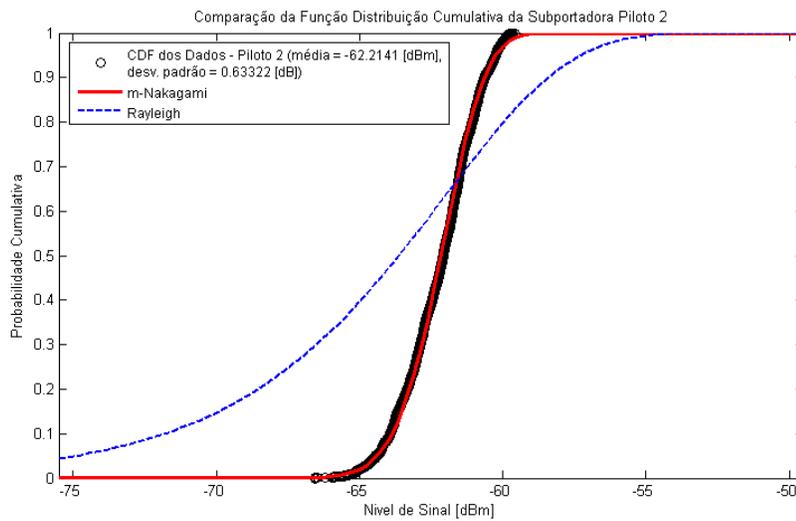


Figura 5.4: Distribuição cumulativa das subportadoras piloto de um setor da Rua Marquês de São Vicente. Ambiente NLOS.

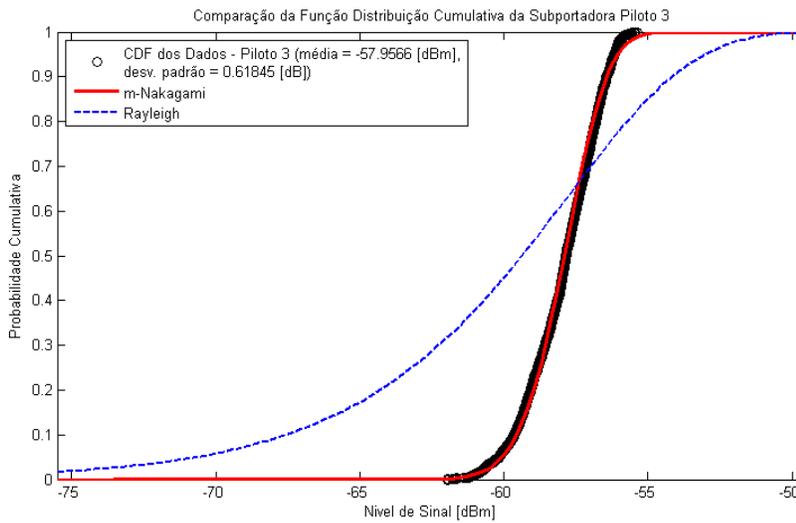
Foi escolhido o setor da Figura 5.1 para que suas subportadoras sejam plotadas, individualmente, em comparação com as distribuições teóricas Rayleigh e de m-Nakagami, Figura 5.5. Analogamente, foi escolhido o setor em NLOS apresentado na Figura 5.3, para que tenha suas subportadoras plotadas, individualmente, com as distribuições teóricas supracitadas, Figura 5.6.



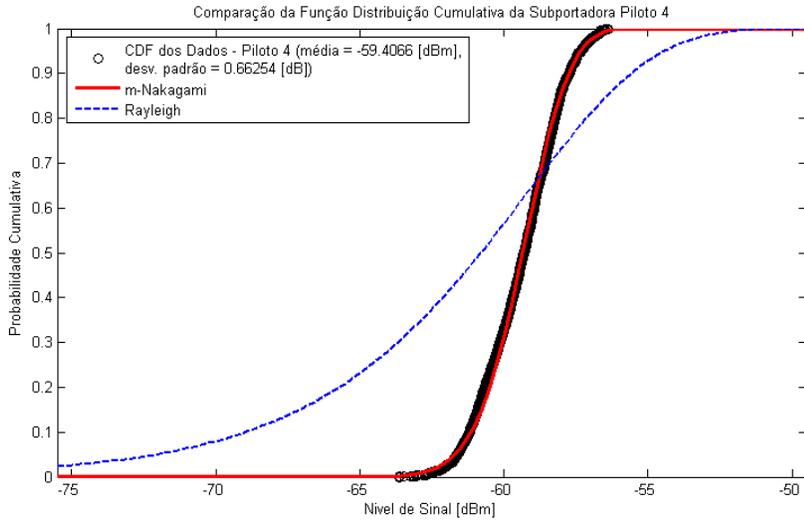
(a)



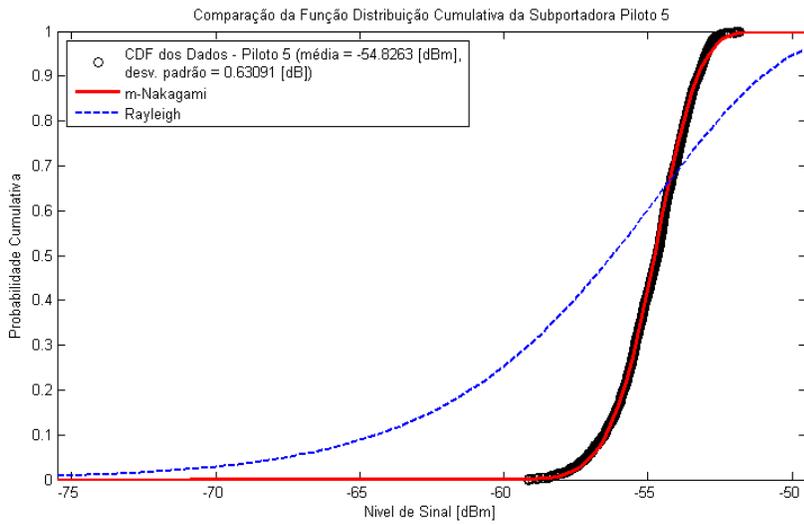
(b)



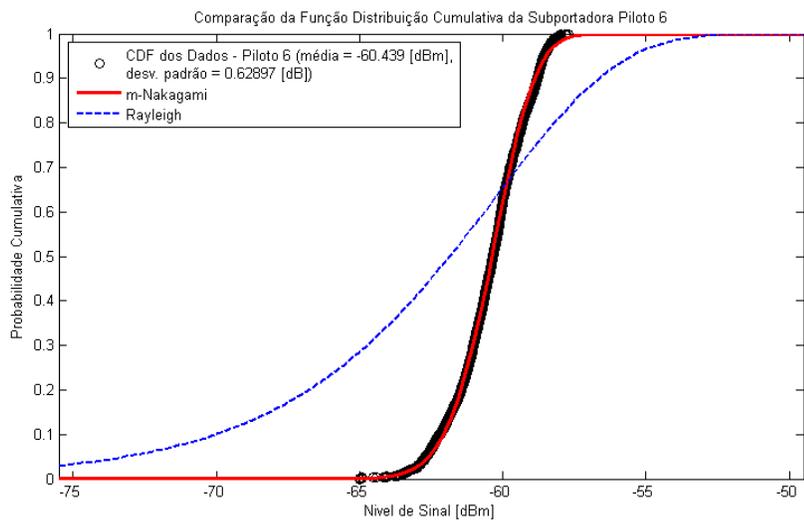
(c)



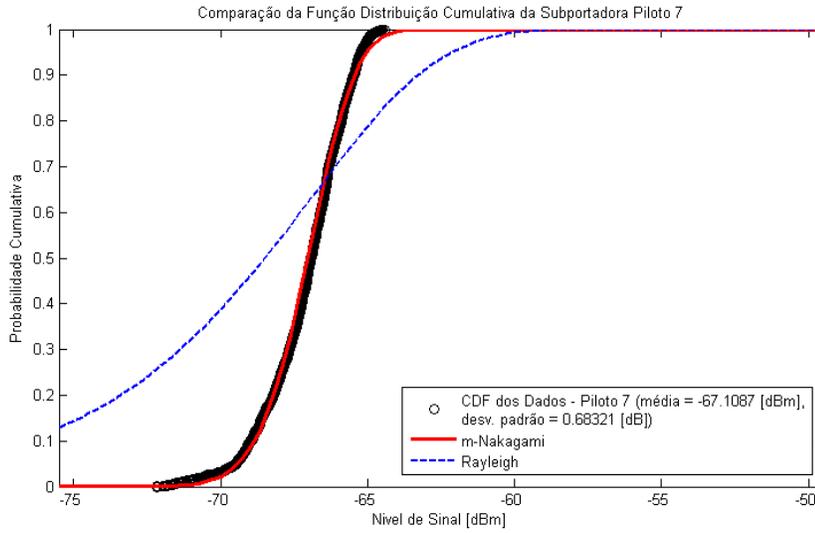
(d)



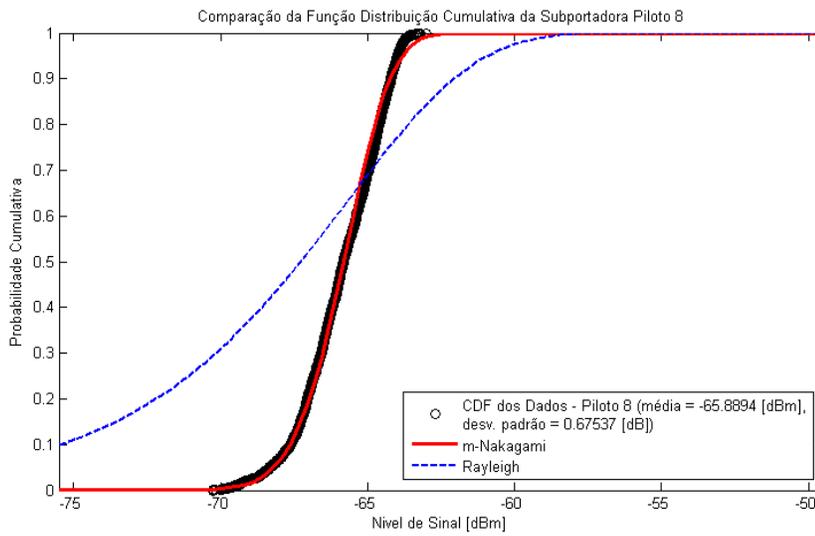
(e)



(f)

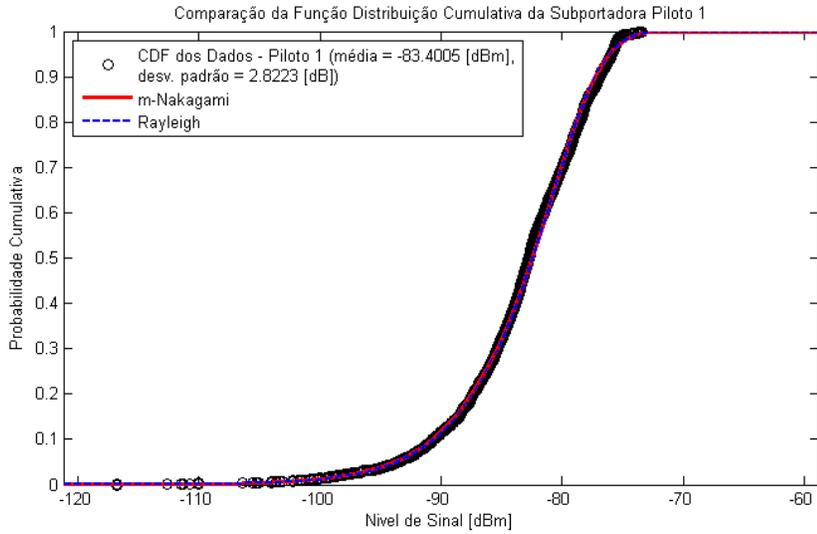


(g)

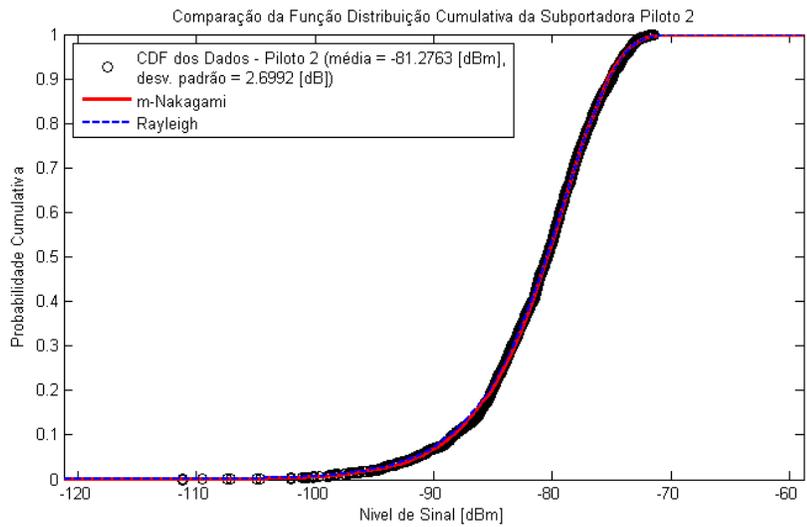


(h)

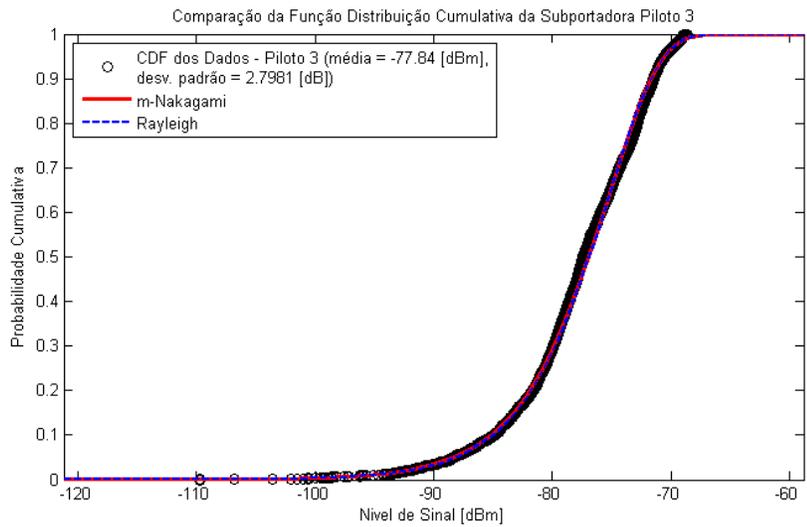
Figura 5.5: Função distribuição cumulativa do nível de sinal obtido em um setor da Rua Mário Ribeiro (LOS) e distribuição cumulativa teórica Rayleigh e de m-Nakagami.



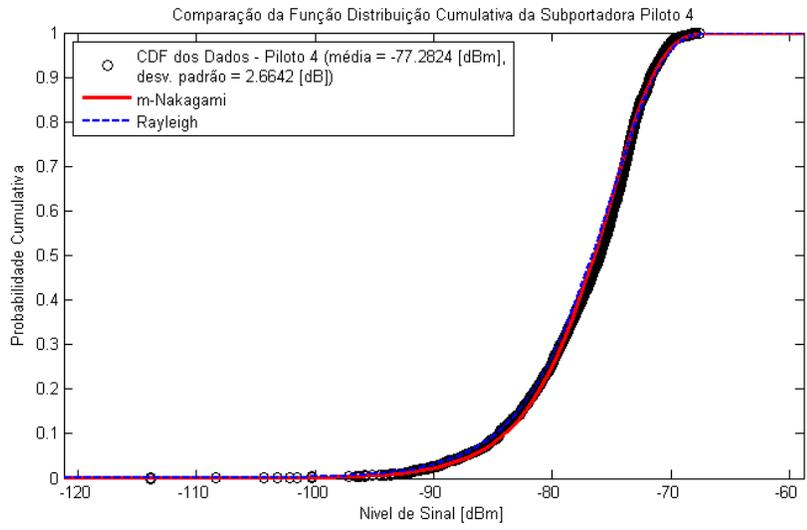
(a)



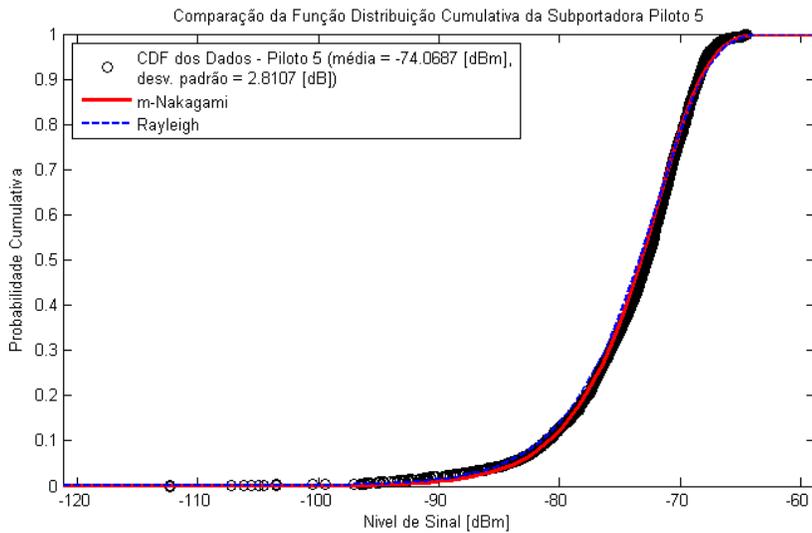
(b)



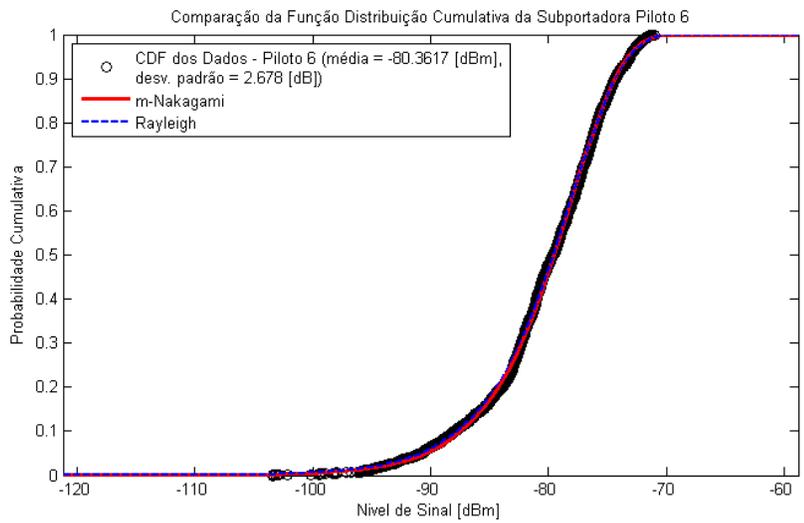
(c)



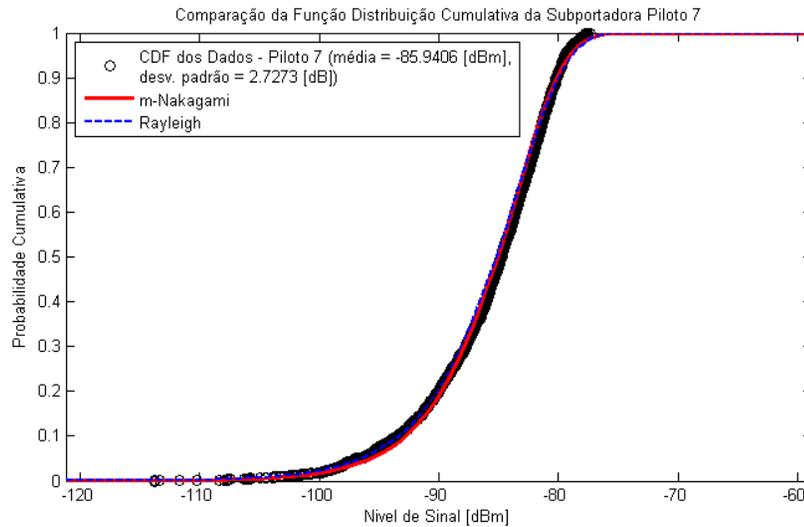
(d)



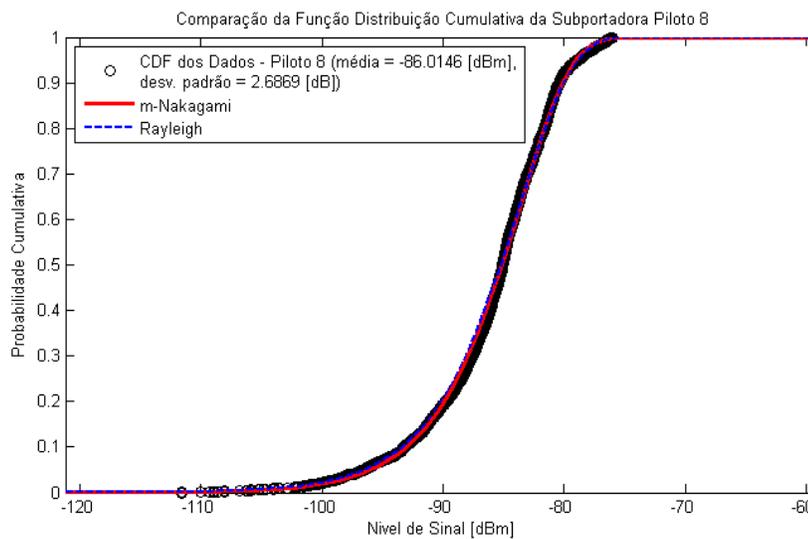
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 5.6: Função distribuição cumulativa do nível de sinal obtido em um setor da Rua Padre Leonel (NLOS) e distribuição cumulativa teórica Rayleigh e de m-Nakagami.

5.1.2.

Desvanecimentos em ambientes com e sem linha de visada

Em ambiente de LOS, observam-se sinais com desvanecimentos não profundos. Isto ocorre devido à forte influência da componente direta do sinal recebido pela unidade móvel. Por outro lado, em ambientes de NLOS é possível observar desvanecimentos profundos. Estas características podem ser observadas na Figura 5.7, onde um sinal obtido em situação de LOS e outro em NLOS são exibidos no mesmo gráfico. Por outro lado, ao restringir a escala do

gráfico do sinal em ambiente LOS é possível verificar a ocorrência de oscilações no sinal, Figura 5.8.

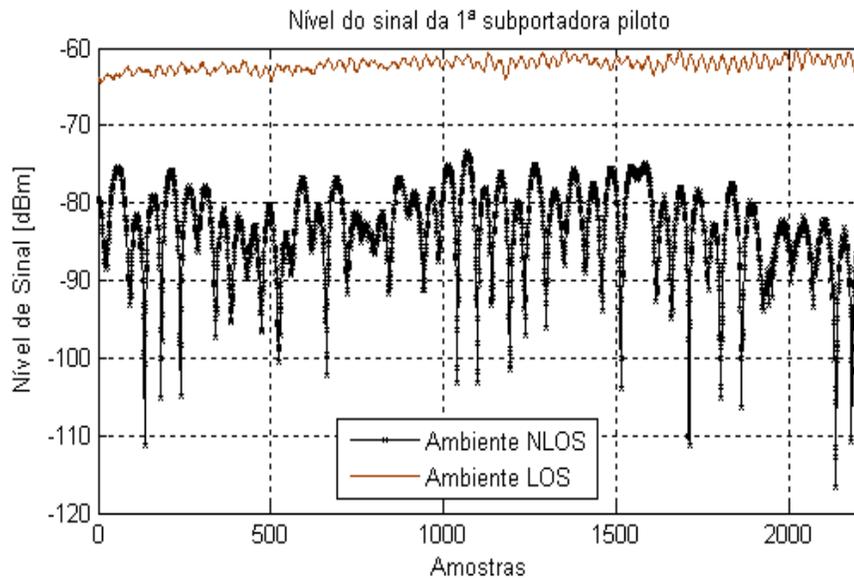


Figura 5.7: Comparação de sinais obtidos em LOS e NLOS.

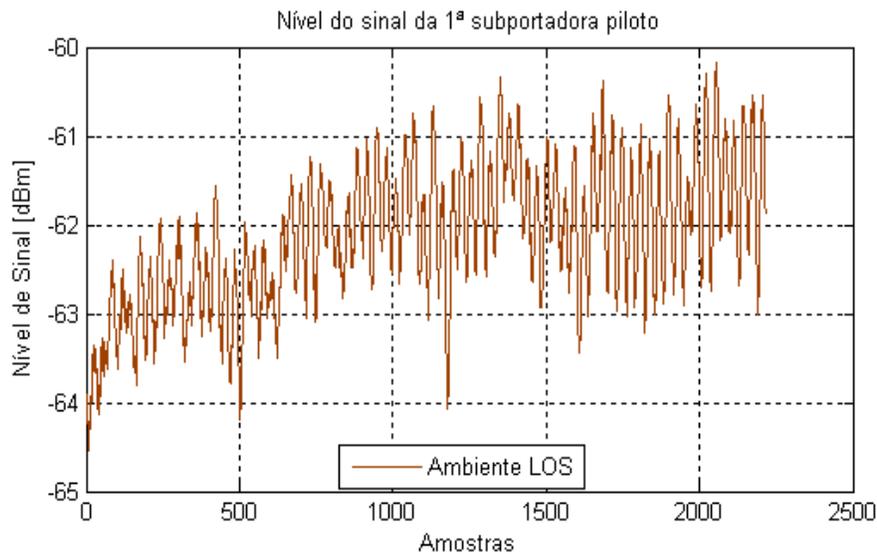
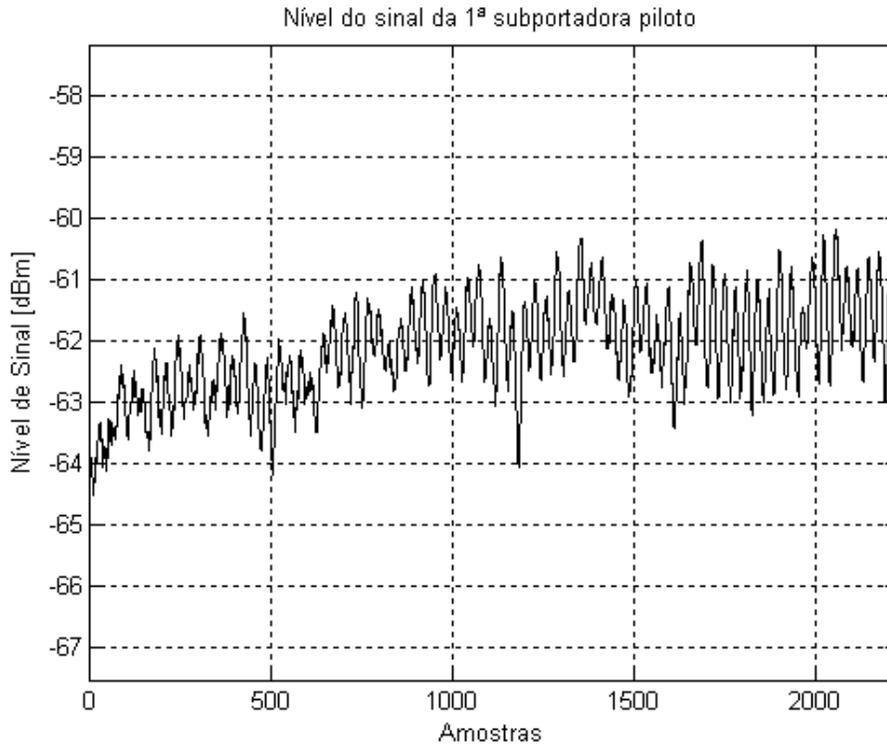


Figura 5.8: Sinal recebido em ambiente de LOS.

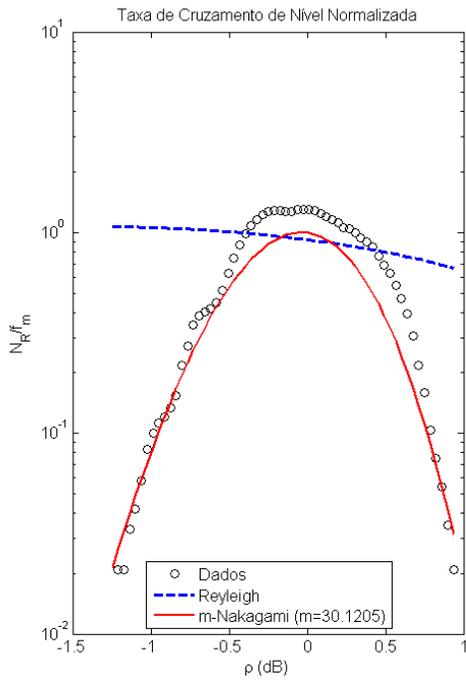
Estas características de desvanecimento influenciam em um maior valor do parâmetro m da distribuição m -Nakagami, nos casos de sinais recebidos em situação de LOS, como descrito em [7] e observado nos gráficos apresentados na subseção 5.1.3.

5.1.3.**Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento**

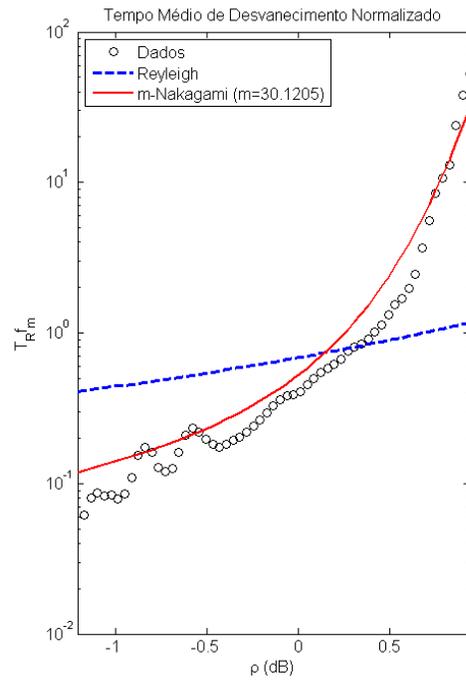
Foi levantada a informação de taxa de cruzamento de nível e o tempo médio de desvanecimento para cada subportadora piloto dos dados obtidos durante a medição e comparados com a taxa de cruzamento de nível definidas pelas distribuições Rayleigh e m-Nakagami, mostradas no capítulo 3. A Figura 5.9 a Figura 5.16 apresentam informação de: (a) nível do sinal, no domínio do tempo, da subportadora de um determinado setor em LOS; (b) taxa de cruzamento de nível normalizada relativa àquela subportadora; (c) e tempo médio de desvanecimento normalizado. A mesma exposição é feita na Figura 5.17 e na Figura 5.24 para um setor em NLOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo

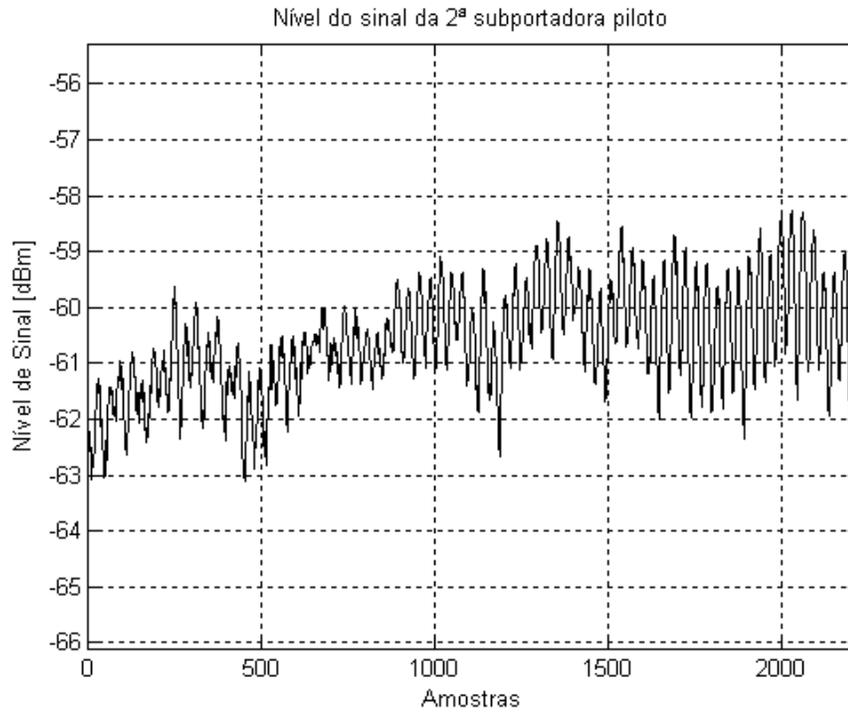


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica

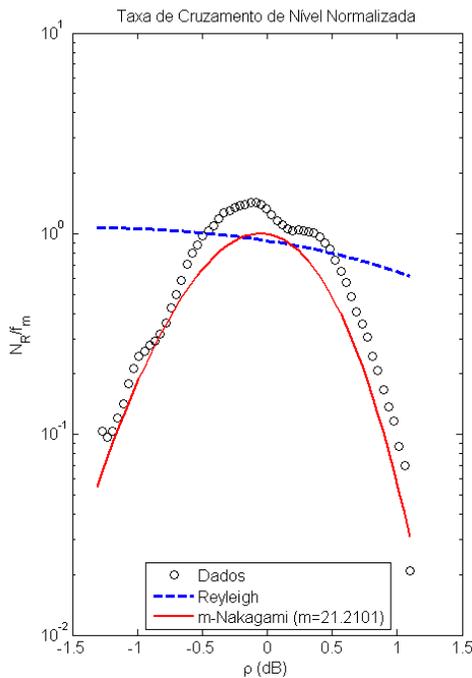


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico

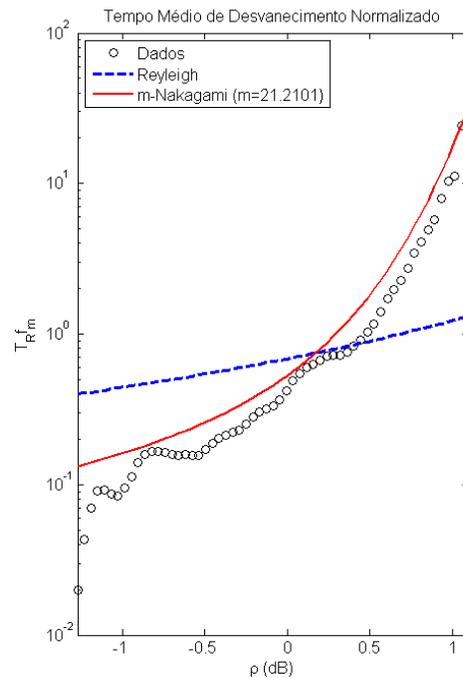
Figura 5.9: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da primeira subportadora piloto de um setor em situação de LOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.

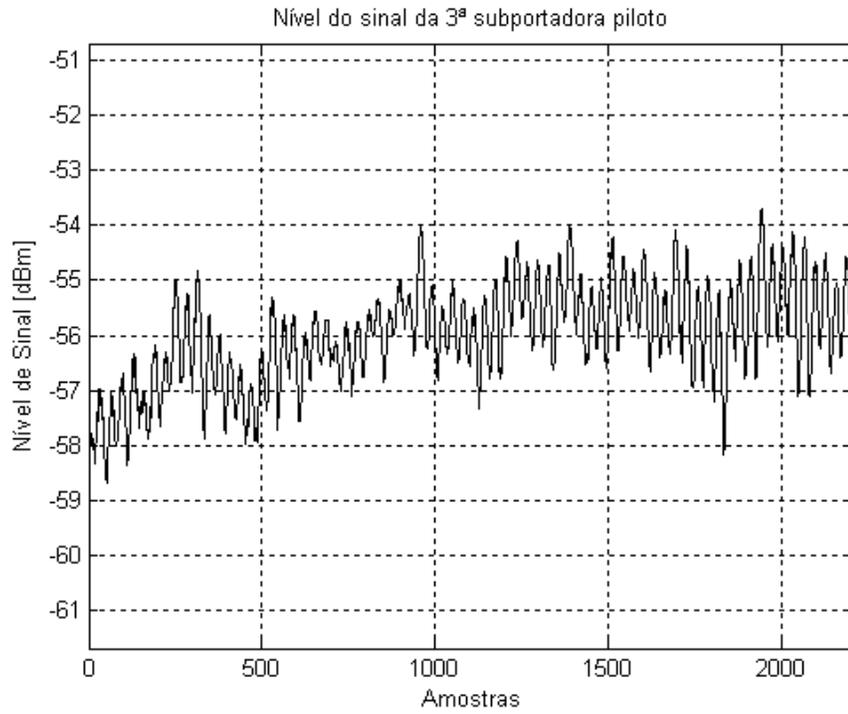


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

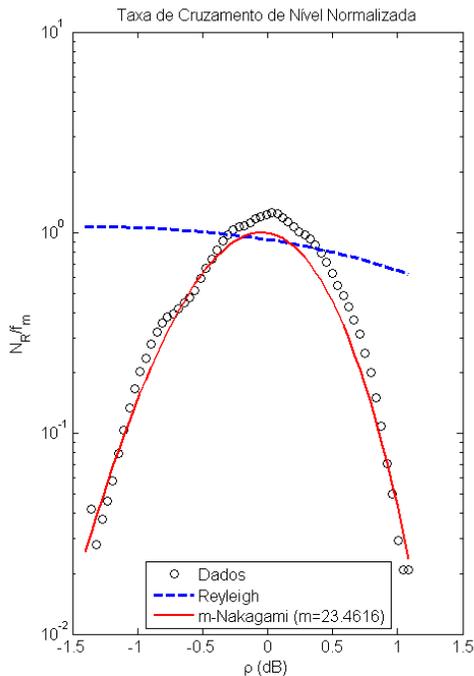


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico.

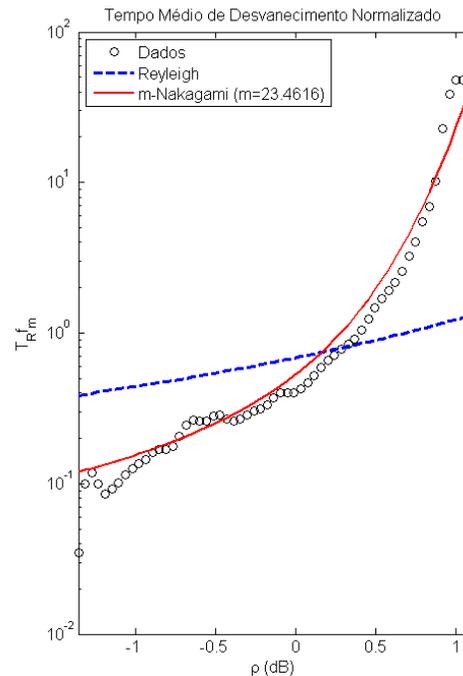
Figura 5.10: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da segunda subportadora piloto de um setor em situação de LOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.

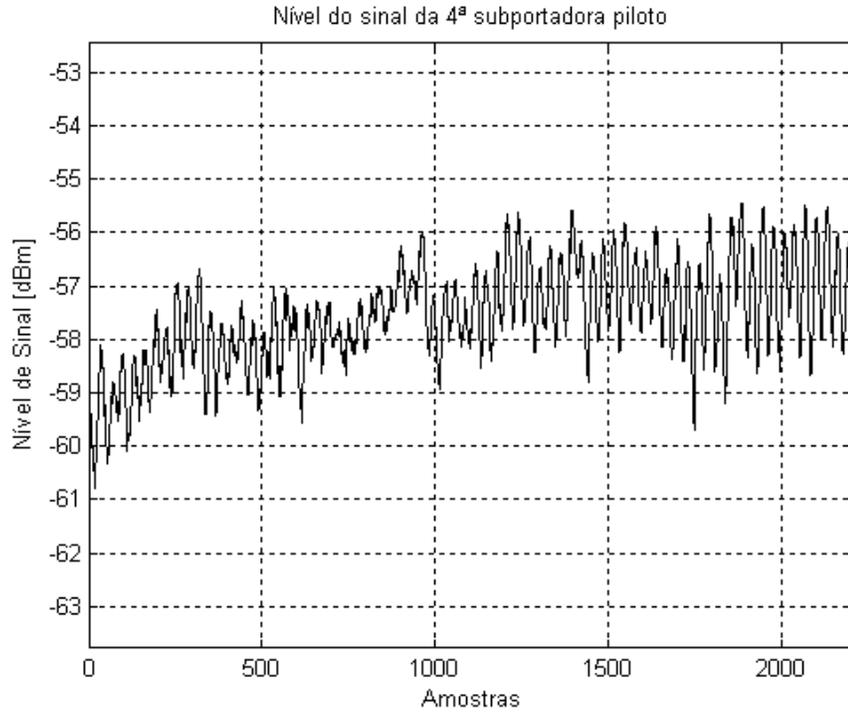


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

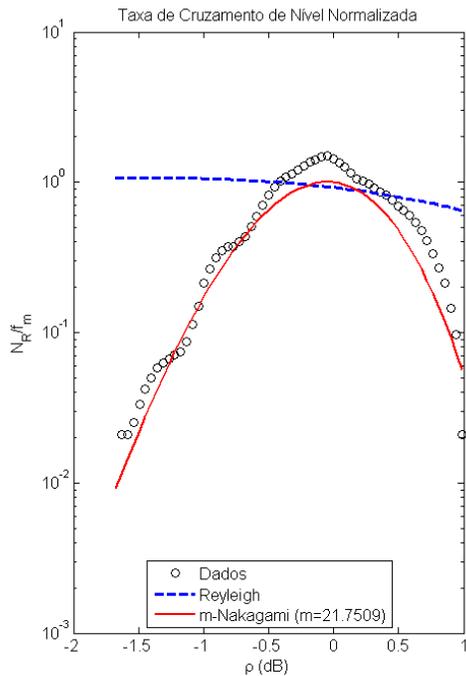


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico.

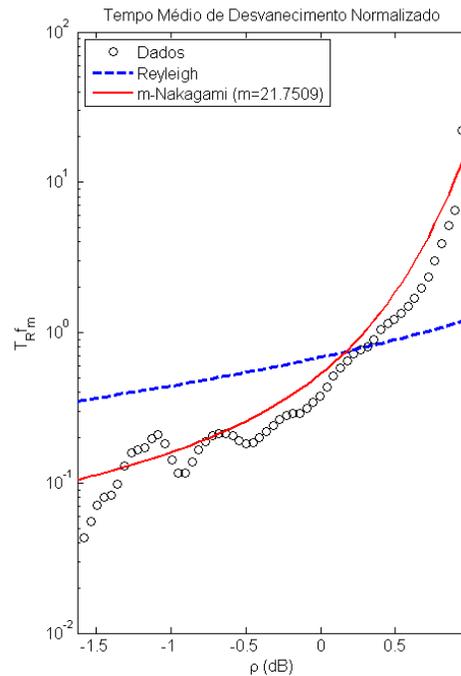
Figura 5.11: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da terceira subportadora piloto de um setor em situação de LOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.

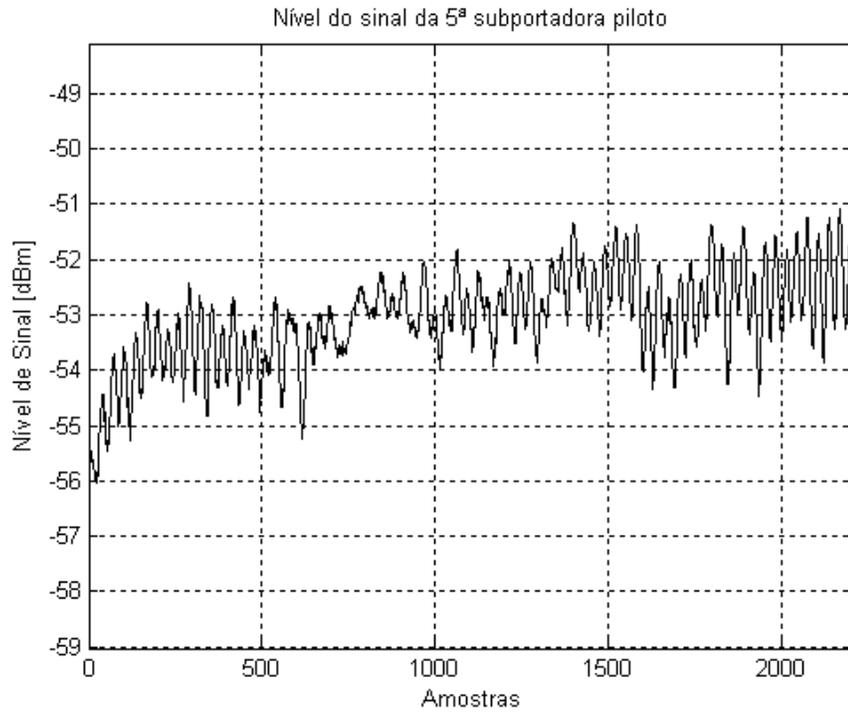


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

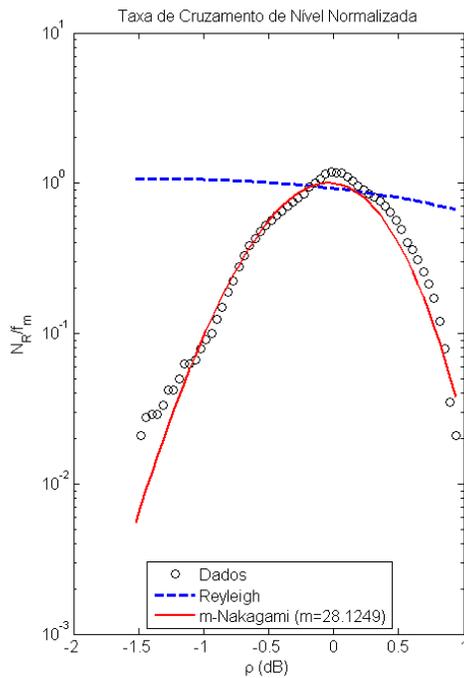


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico.

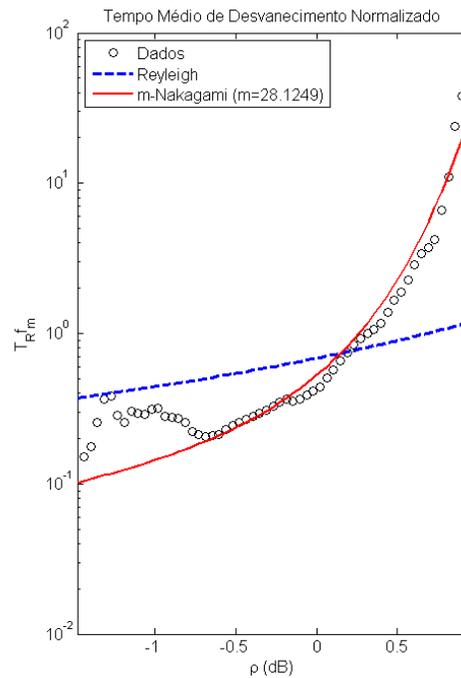
Figura 5.12: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da quarta subportadora piloto de um setor em situação de LOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.

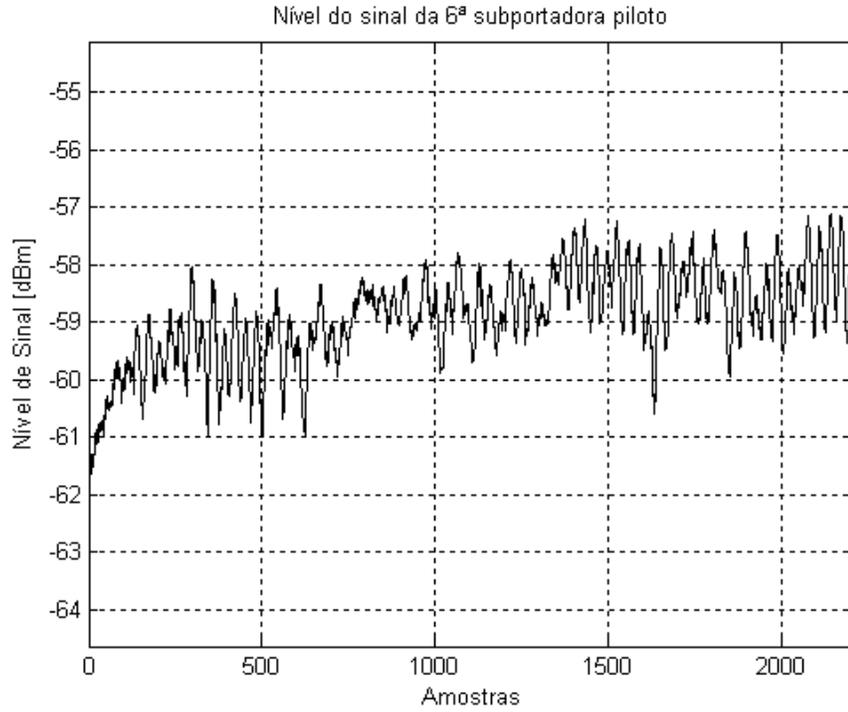


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

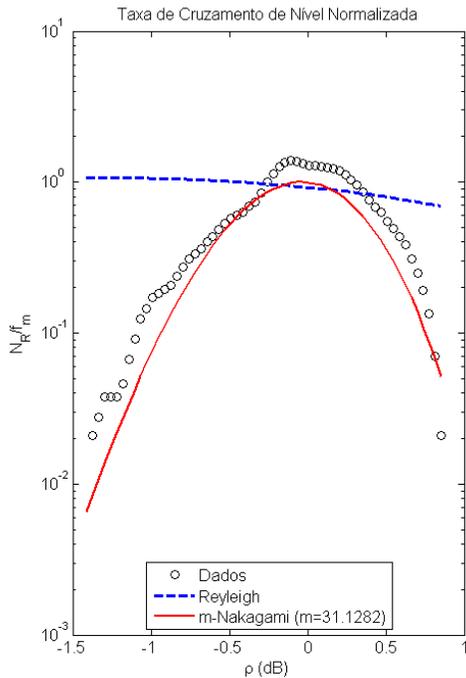


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórica e empírico.

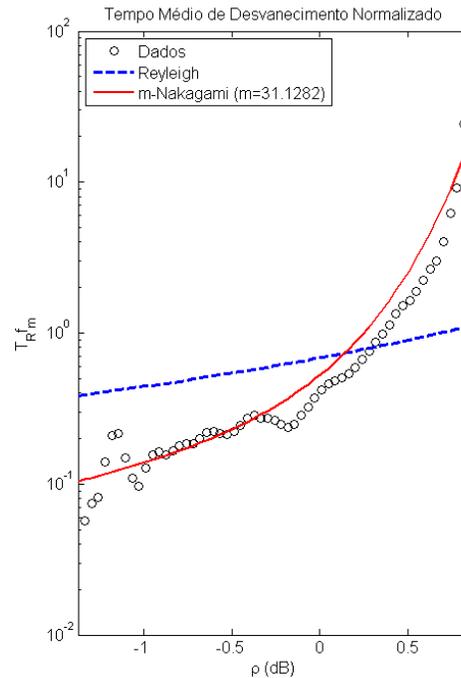
Figura 5.13: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da quinta subportadora piloto de um setor em situação de LOS.



(a) nível do sinal no domínio do tempo.

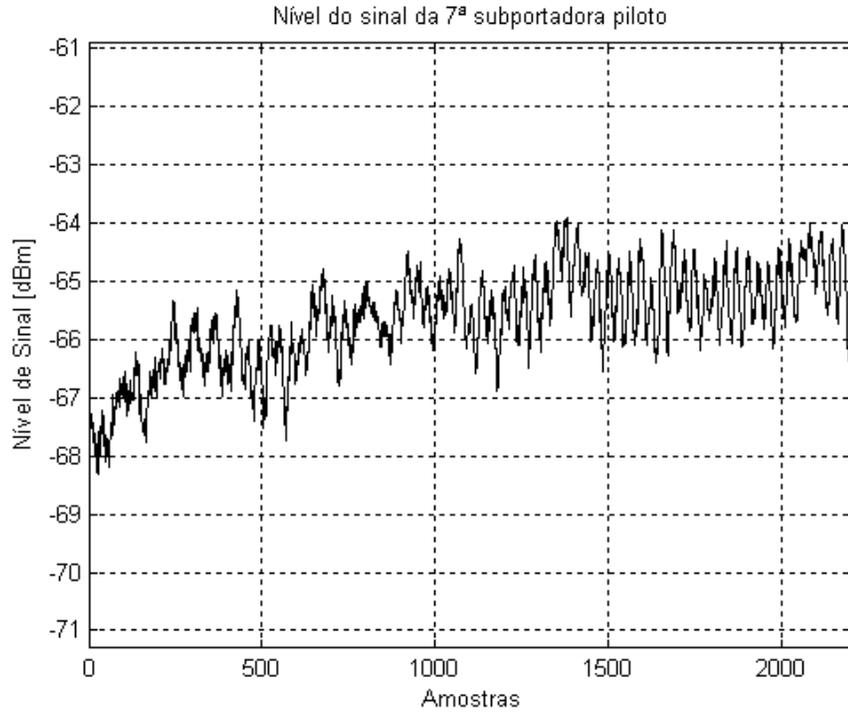


(b) taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

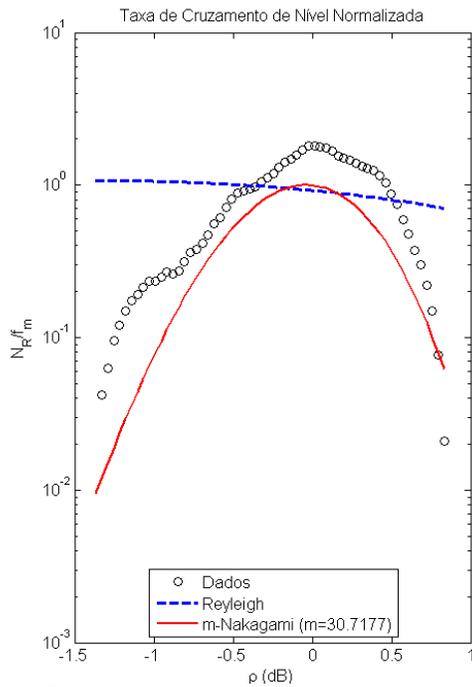


(c) tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico.

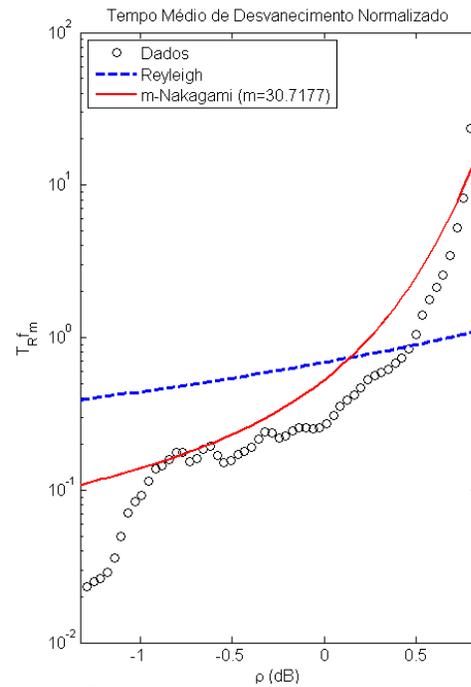
Figura 5.14: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da sexta subportadora piloto de um setor em situação de LOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.

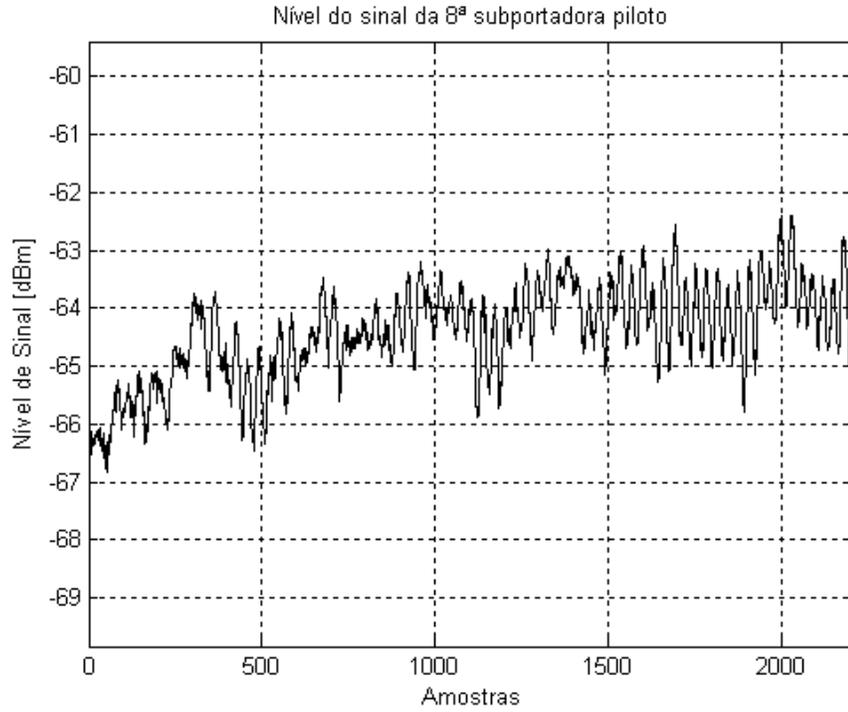


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

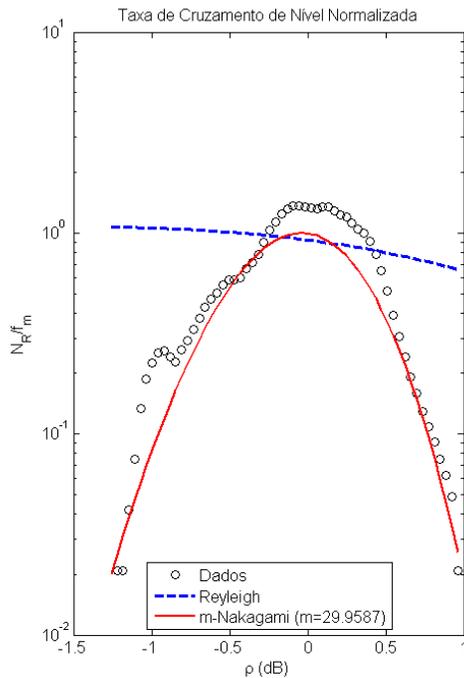


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico.

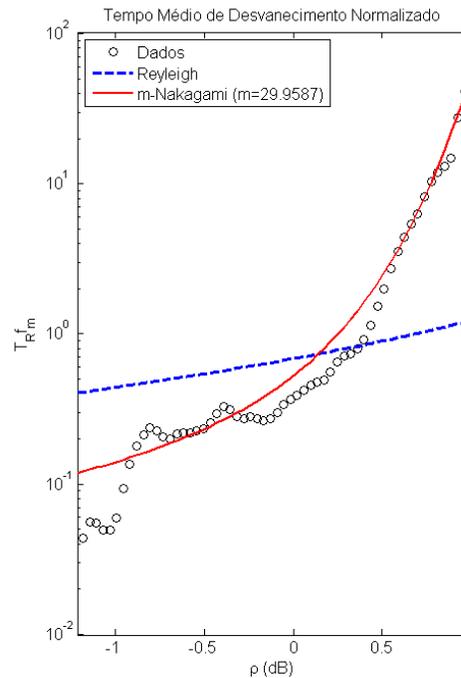
Figura 5.15: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da sétima subportadora piloto de um setor em situação de LOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.

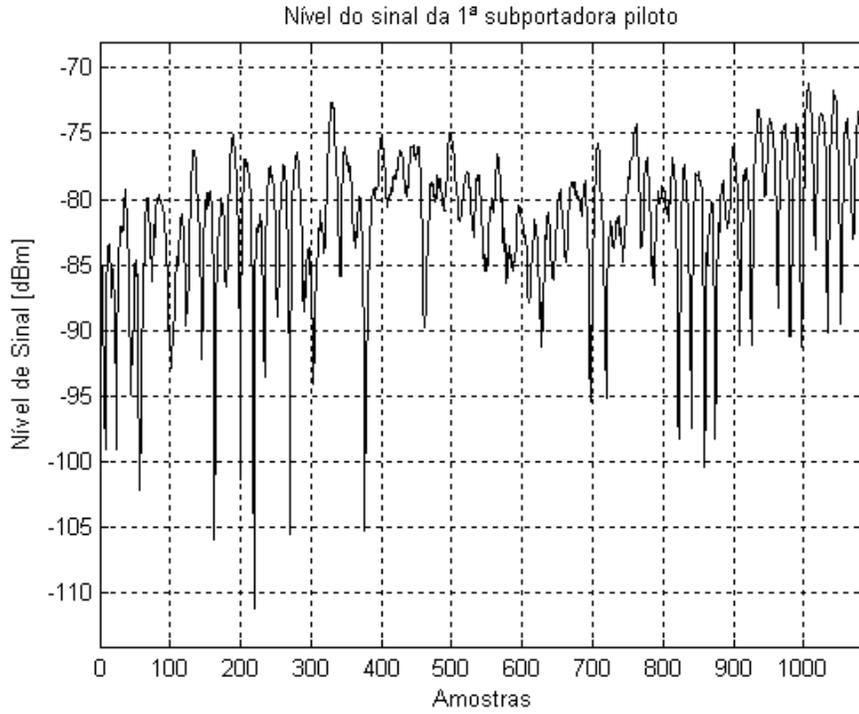


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

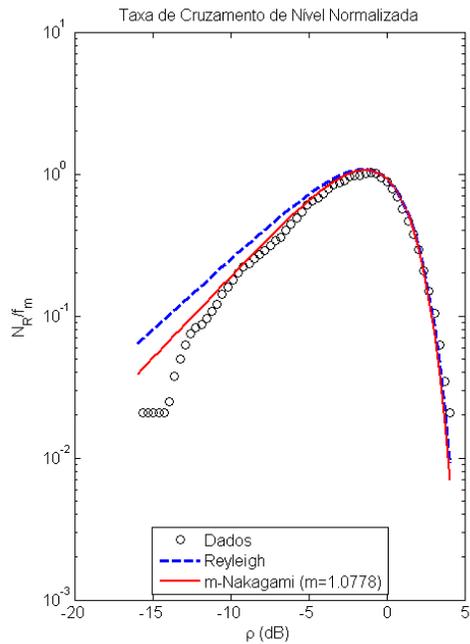


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico.

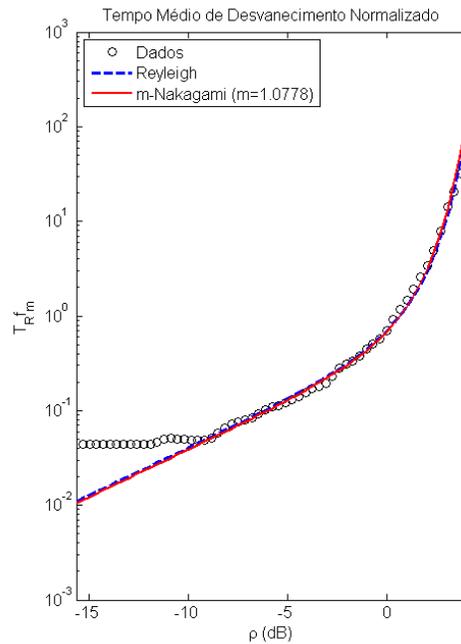
Figura 5.16: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da oitava subportadora piloto de um setor em situação de LOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.

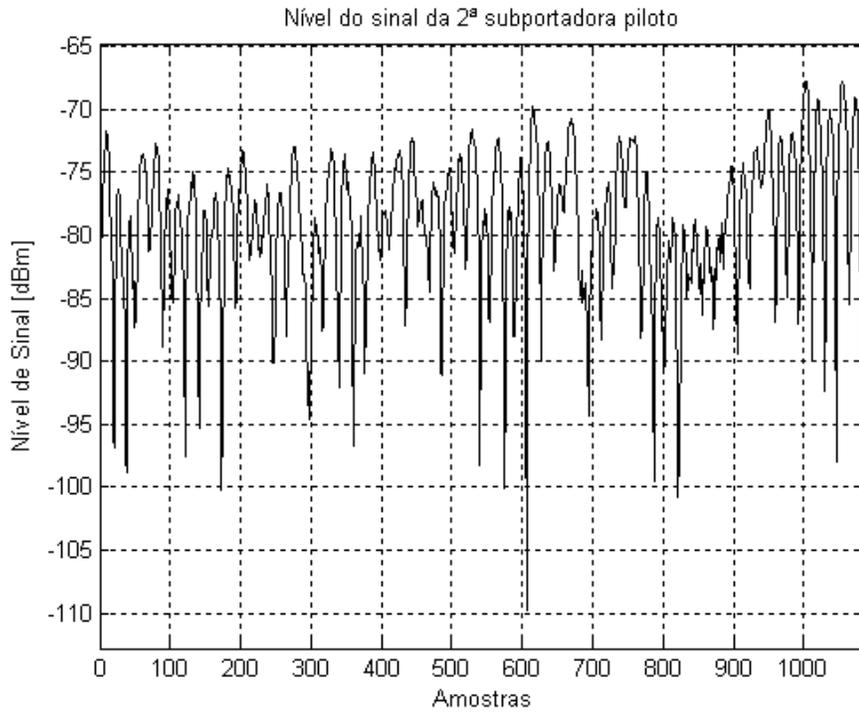


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

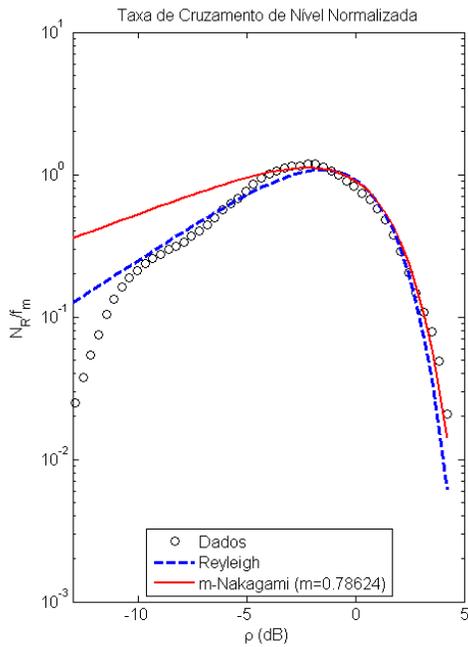


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico.

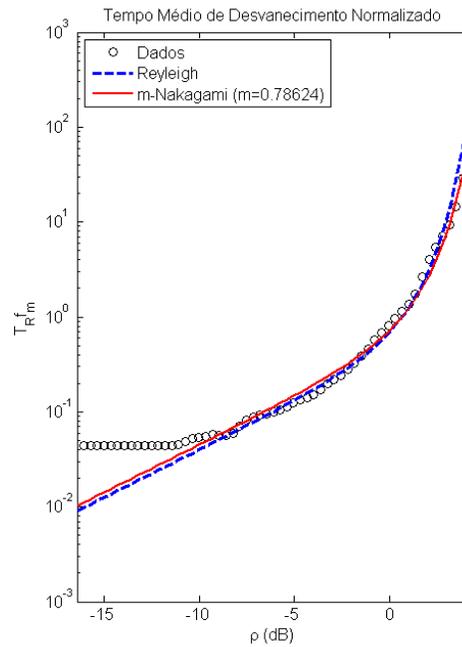
Figura 5.17: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da primeira subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.

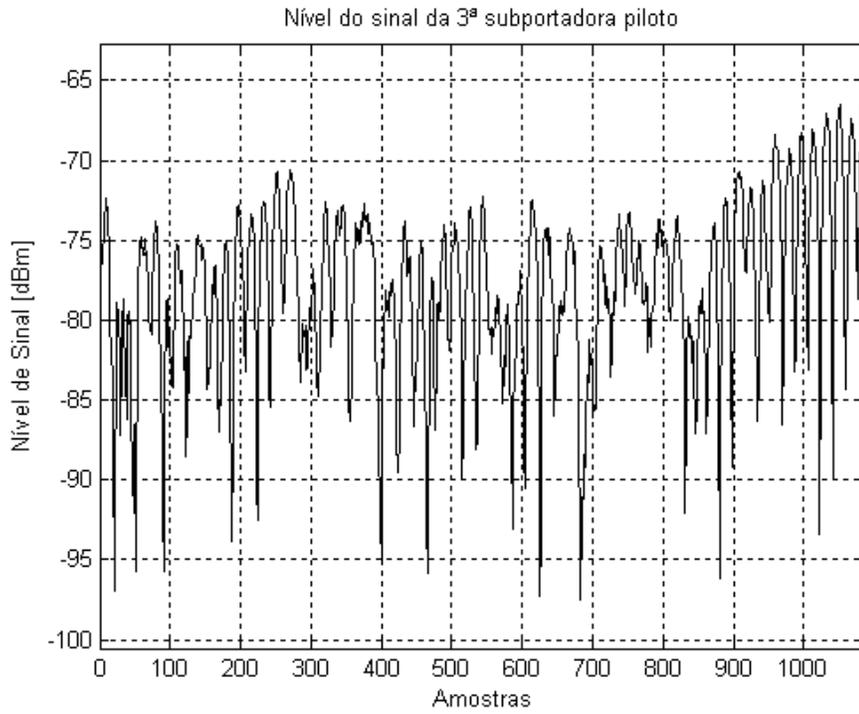


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

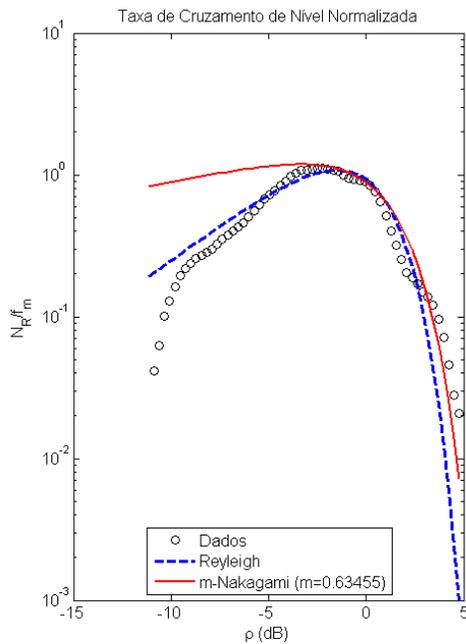


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórica e empírica.

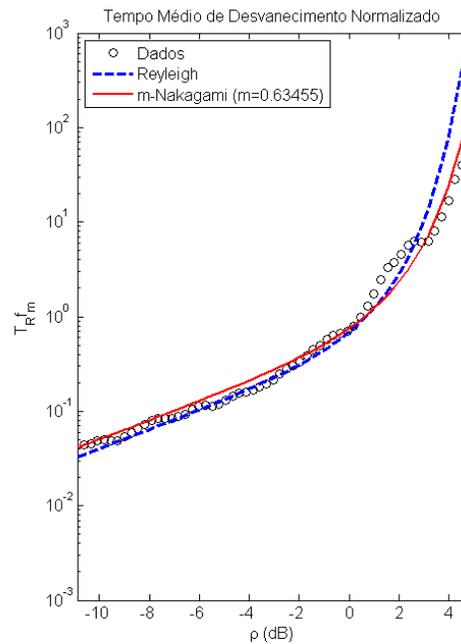
Figura 5.18: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da segunda subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo

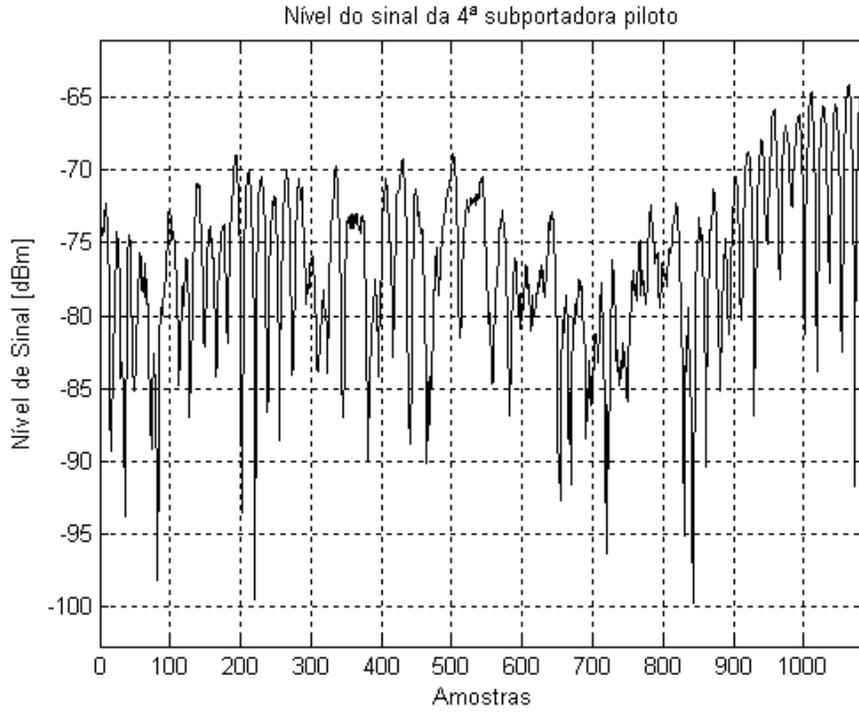


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

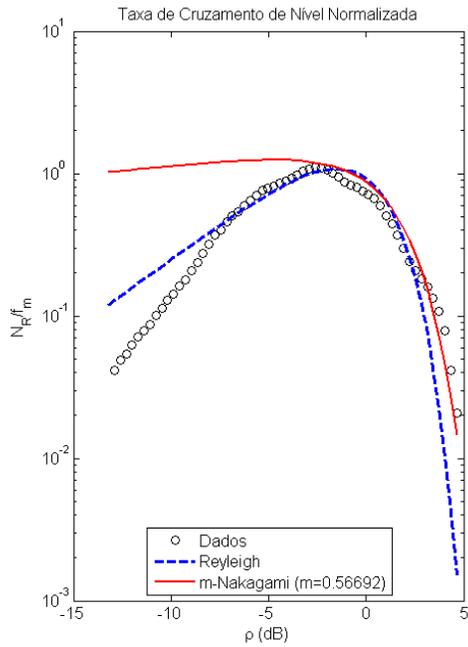


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico.

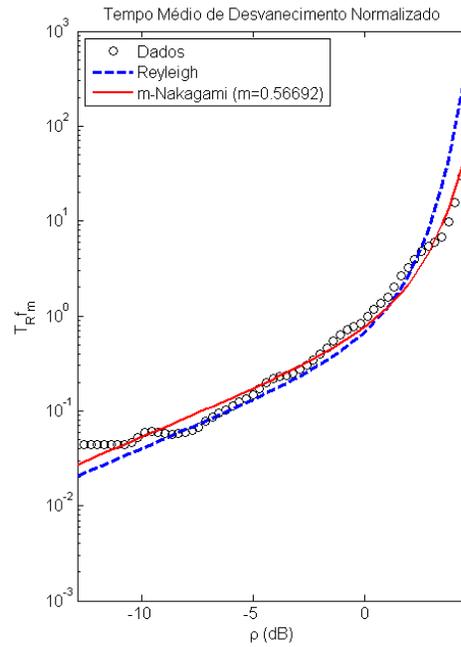
Figura 5.19: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da terceira subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.

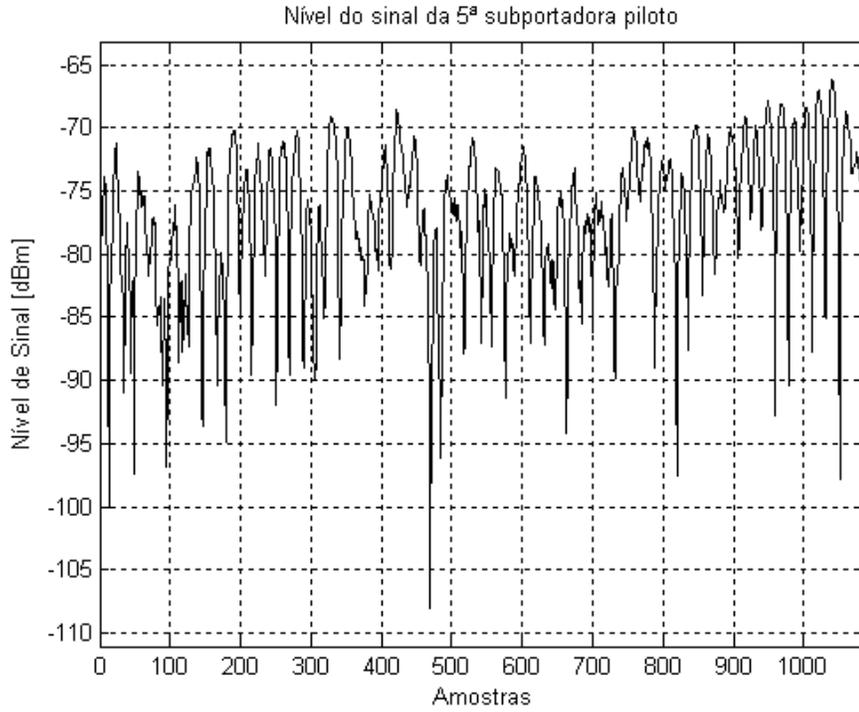


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

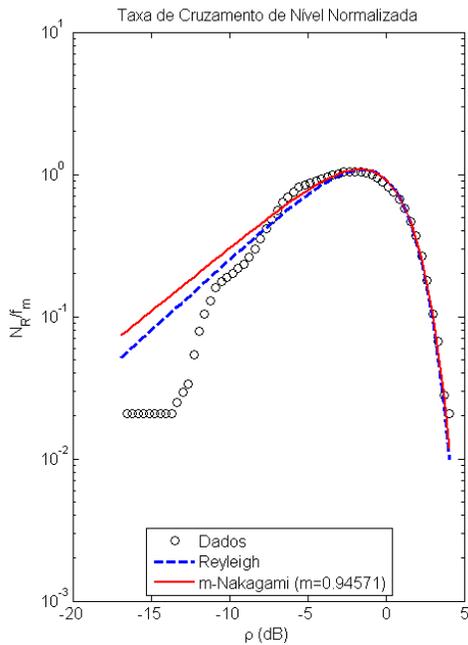


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico.

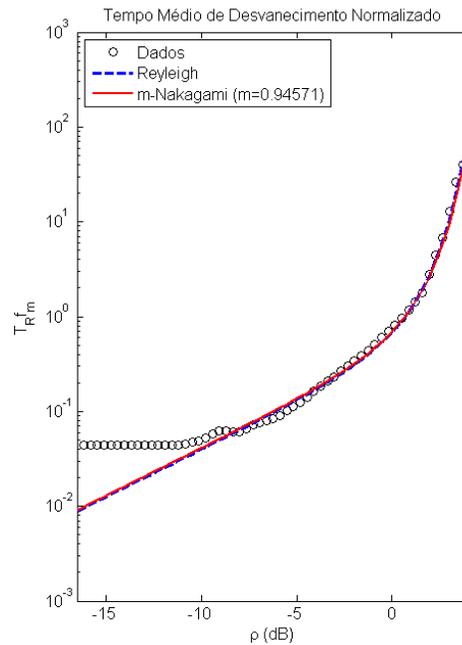
Figura 5.20: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da quarta subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.

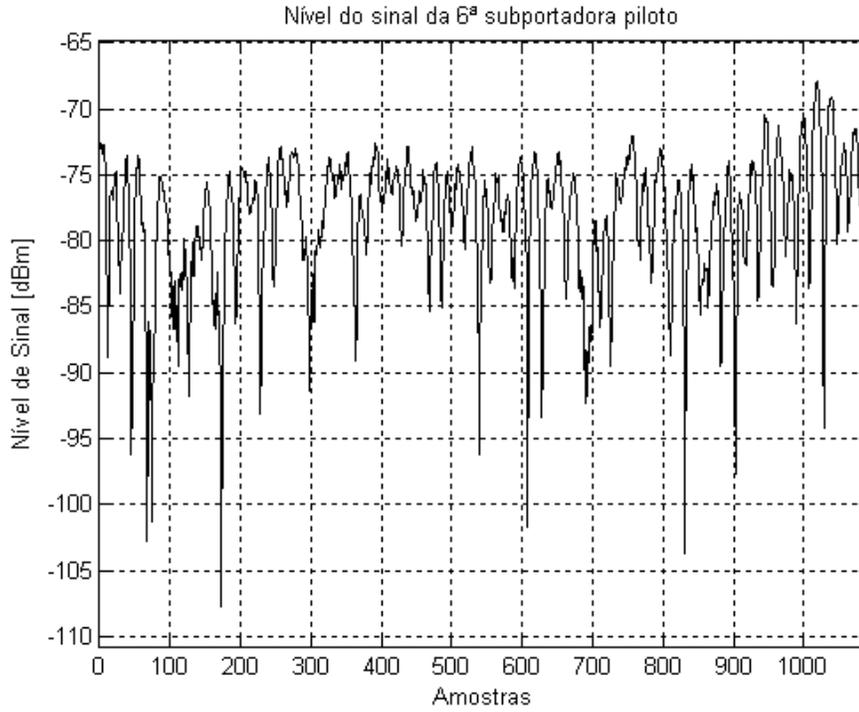


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

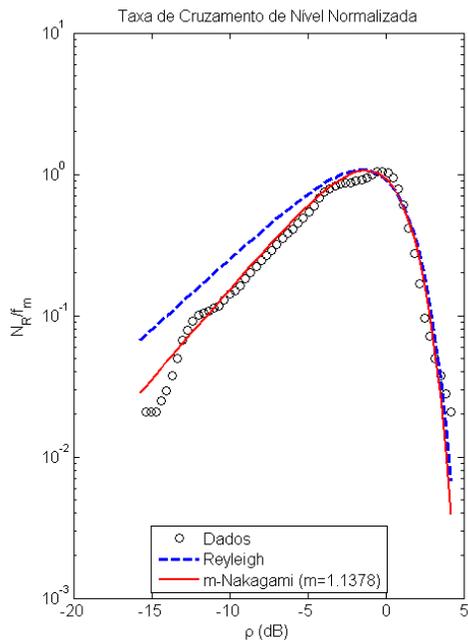


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórica e empírica.

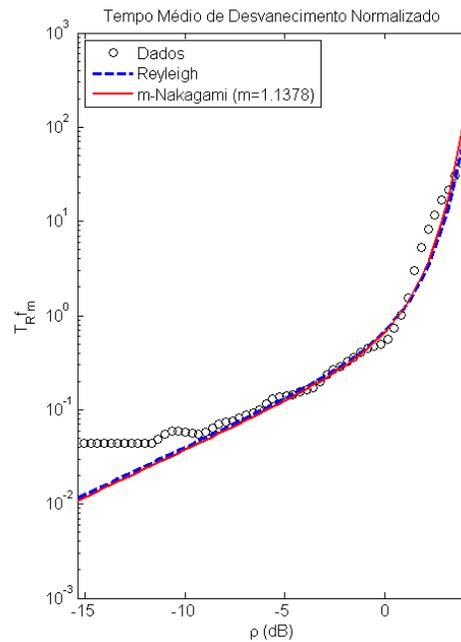
Figura 5.21: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da quinta subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.

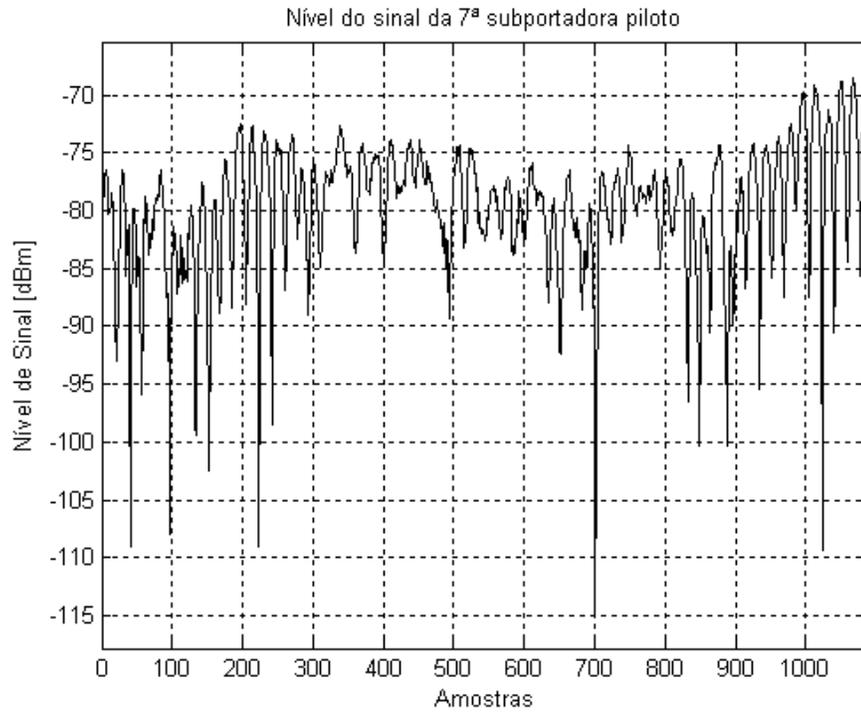


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

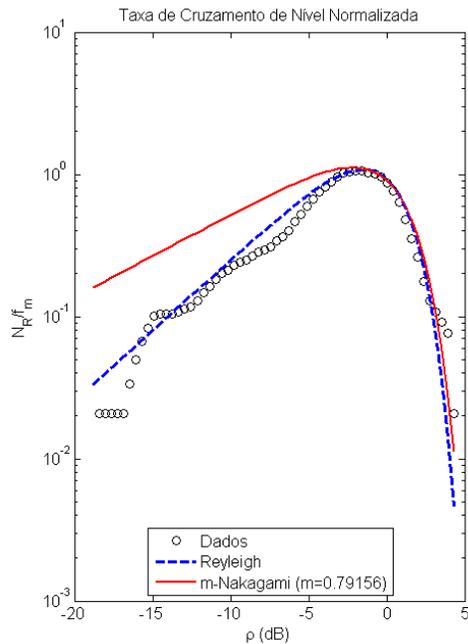


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico.

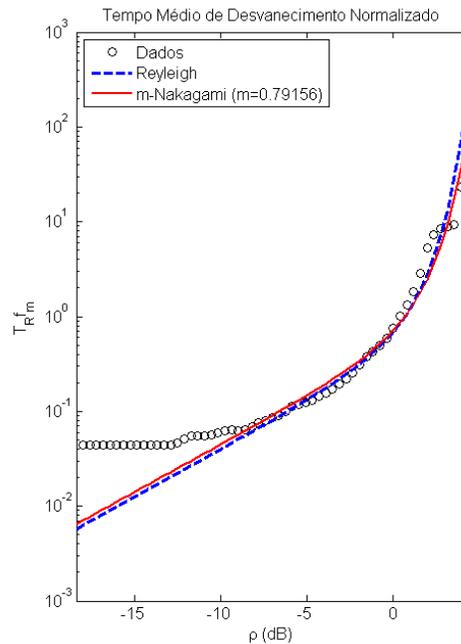
Figura 5.22: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da sexta subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.

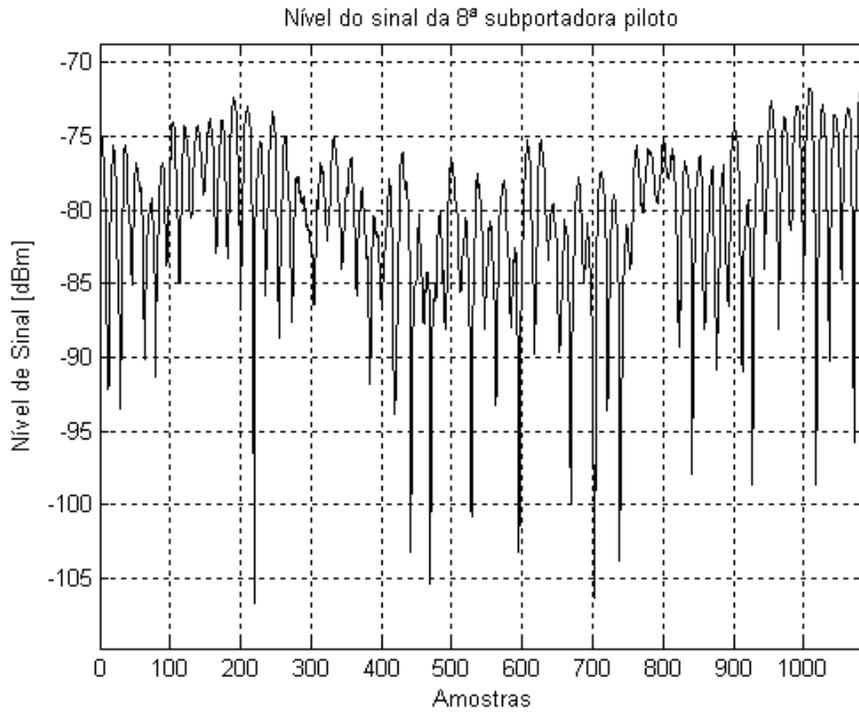


(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.

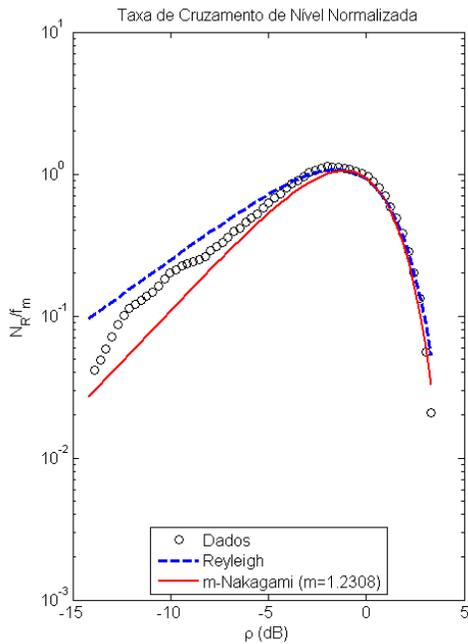


(c) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico.

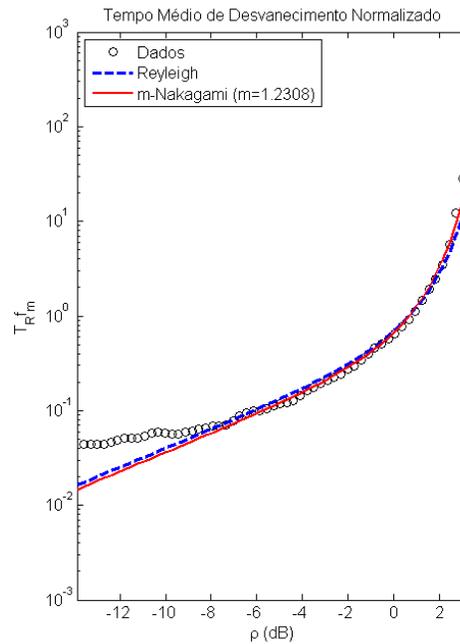
Figura 5.23: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da sétima subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.



(a) Nível do sinal no domínio do tempo.



(b) Taxa de cruzamento de nível normalizada teórica e empírica.



(b) Tempo médio de desvanecimento normalizado teórico e empírico.

Figura 5.24: Taxa de cruzamento de nível e duração média do desvanecimento da oitava subportadora piloto de um setor em situação de NLOS.

5.2. Banda de coerência

O princípio da tecnologia OFDM consiste em subdividir o sinal banda larga em N subportadoras banda estreita, de forma a propagar estas diversas subportadoras banda estreita com determinado espaçamento entre elas. O sinal transmitido durante as medições realizadas possui um espaçamento entre subportadoras de $16,276\text{ KHz}$. De posse do símbolo OFDM, tem-se, na realidade, 200 (56 são nulas) subportadoras faixa estreita espaçadas em $16,276\text{ KHz}$. Partindo deste princípio, foi realizada a correlação, no domínio da frequência, de uma determinada subportadora com as outras subportadoras subsequentes, sendo a subportadora 228 a última a ser utilizada, uma vez que esta é a última subportadora de dados. Um exemplo deste processo é: deseja-se realizar a correlação da primeira subportadora piloto, sendo que esta primeira subportadora piloto está na posição 40 na contagem sequencial das 256 subportadoras existentes, logo é realizada a correlação da subportadora 40 com as subportadoras 41, 42, 43, ..., 228.

A apresentação dos resultados está organizada de forma a expor primeiramente a correlação variando o ambiente de recepção do sinal entre visada direta (LOS) e não visibilidade (NLOS), de tal forma a facilitar a comparação deste parâmetro para os dois ambientes. São exibidos dois exemplos para ambientes em LOS, na Figura 5.25 e Figura 5.26, e outros dois exemplos para situação de recepção em NLOS, na Figura 5.27 e Figura 5.28. Em seguida, são apresentados os resultados da correlação das sete primeiras subportadoras piloto de determinado setor em situação de LOS e os resultados para certo setor em NLOS, Figura 5.29 e Figura 5.30. Por fim, são realizadas médias do valor de banda de coerência (BC) de diversos setores em LOS e NLOS.

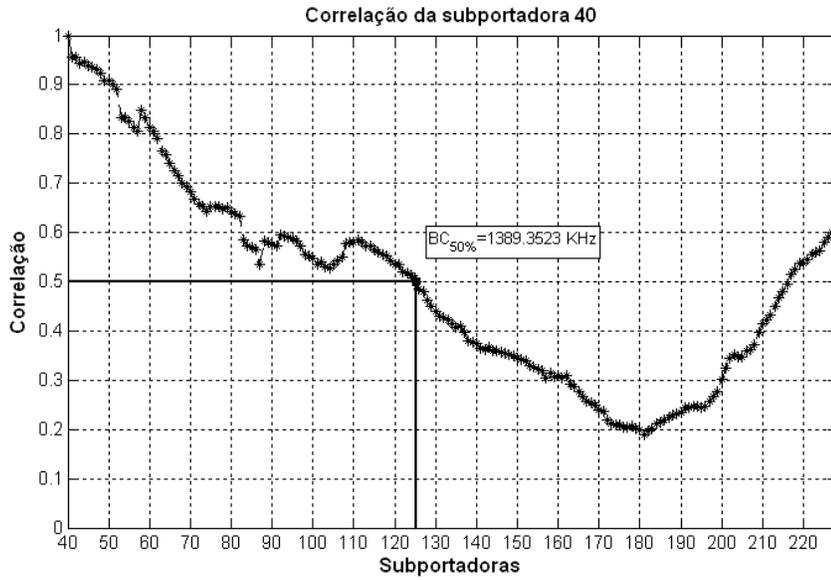


Figura 5.25: Correlação da quadragésima subportadora (primeira subportadora piloto) de um setor, em LOS, da Rua Mário Ribeiro.

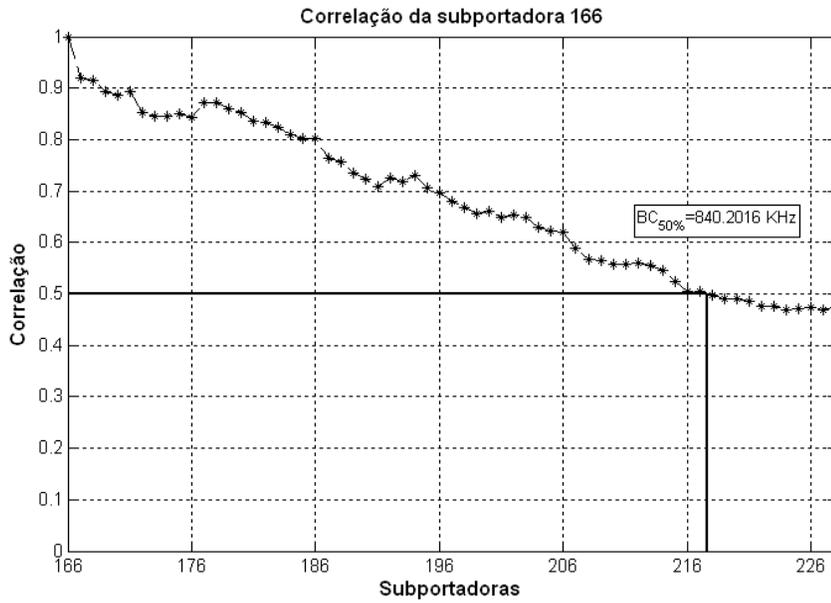


Figura 5.26: Correlação da 166ª subportadora (sexta subportadora piloto) de um setor, em LOS, da Rua Mário Ribeiro.

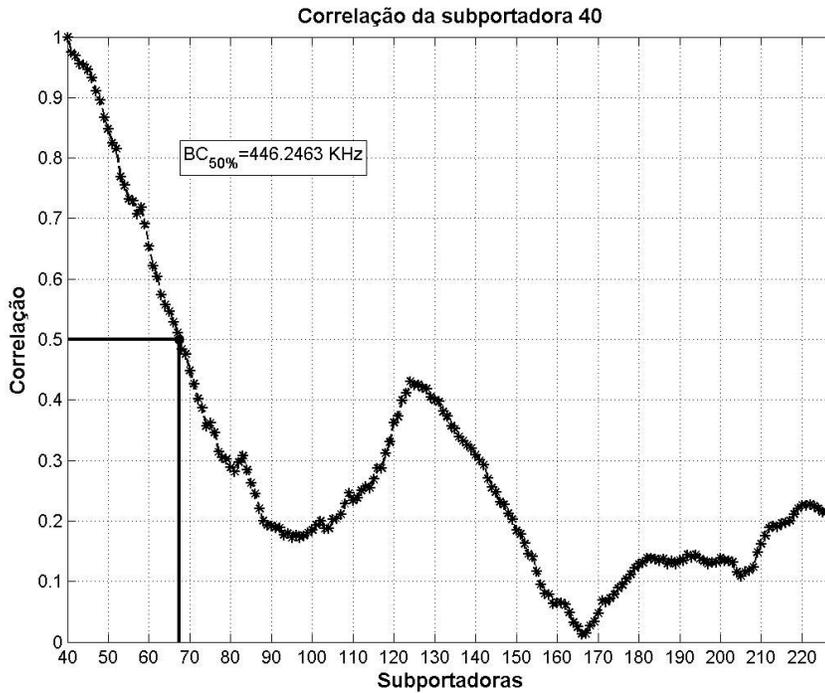


Figura 5.27: Correlação da quadragésima subportadora (primeira subportadora piloto) de um setor, em NLOS, da Rua Vice-Governador Rubens Berardo.

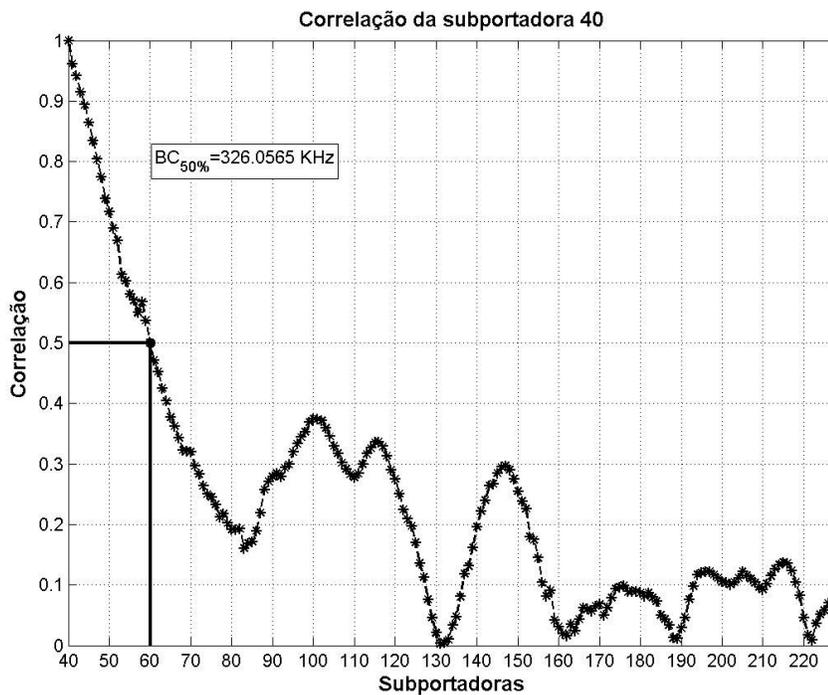
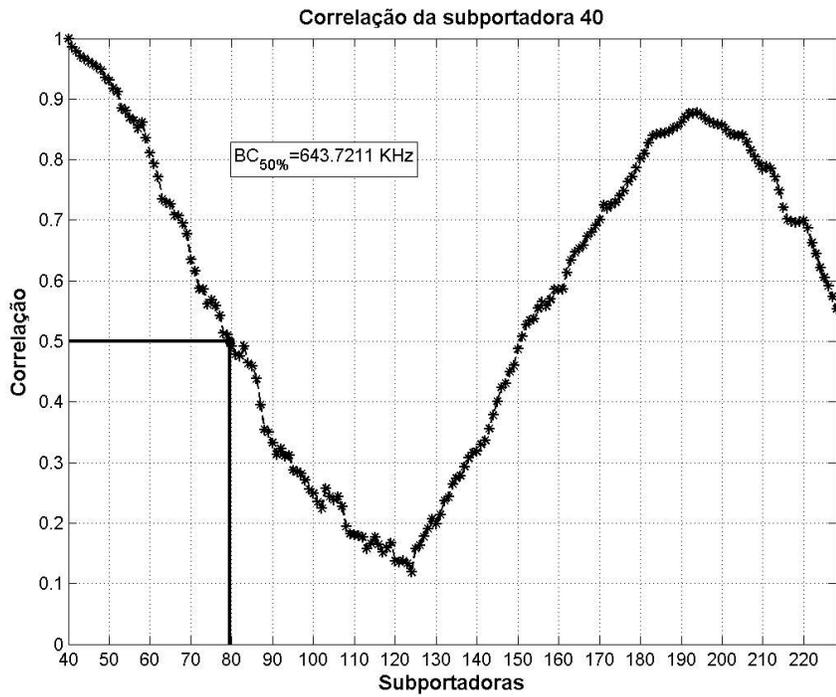


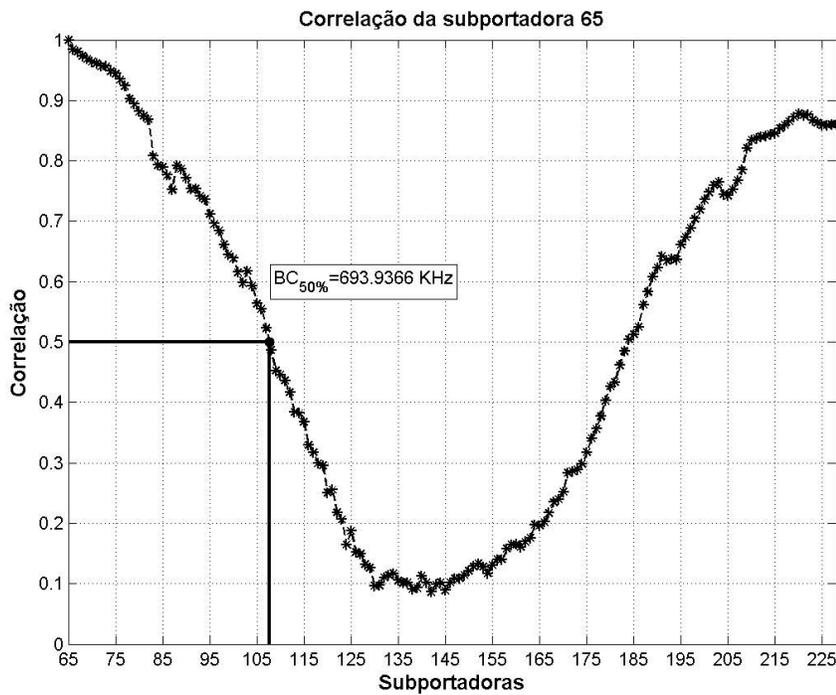
Figura 5.28: Correlação da quadragésima subportadora (primeira subportadora piloto) de um setor, em NLOS, da Rua Padre Leonel.

Para cada setor foi realizada a correlação das oito subportadoras piloto. Na Figura 5.29, apresenta-se a correlação das sete primeiras subportadoras piloto

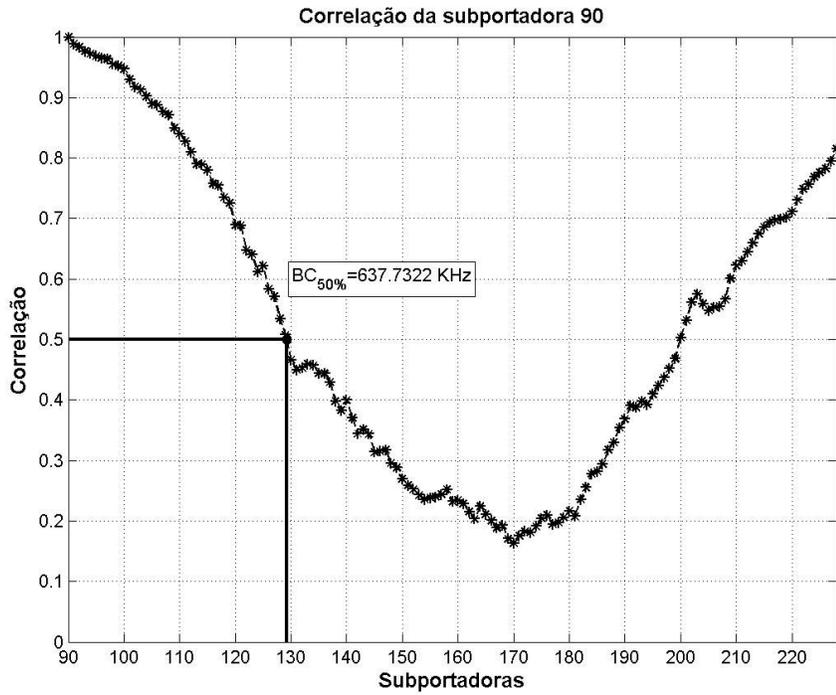
em ambiente de LOS. Os mesmos resultados são mostrados na Figura 5.30 para ambiente NLOS.



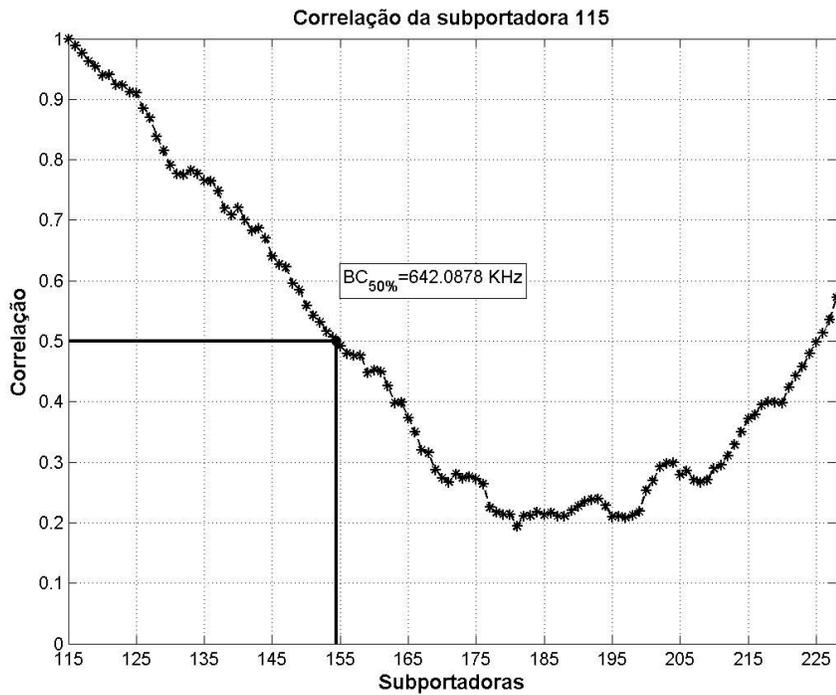
(a) Correlação da primeira subportadora piloto (40ª subportadora)



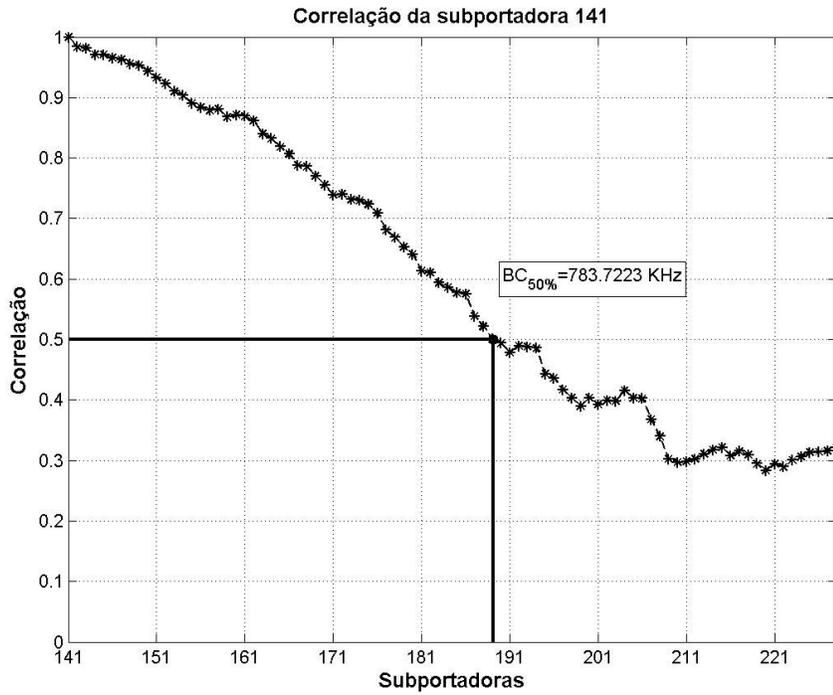
(b) Correlação da segunda subportadora piloto (65ª subportadora)



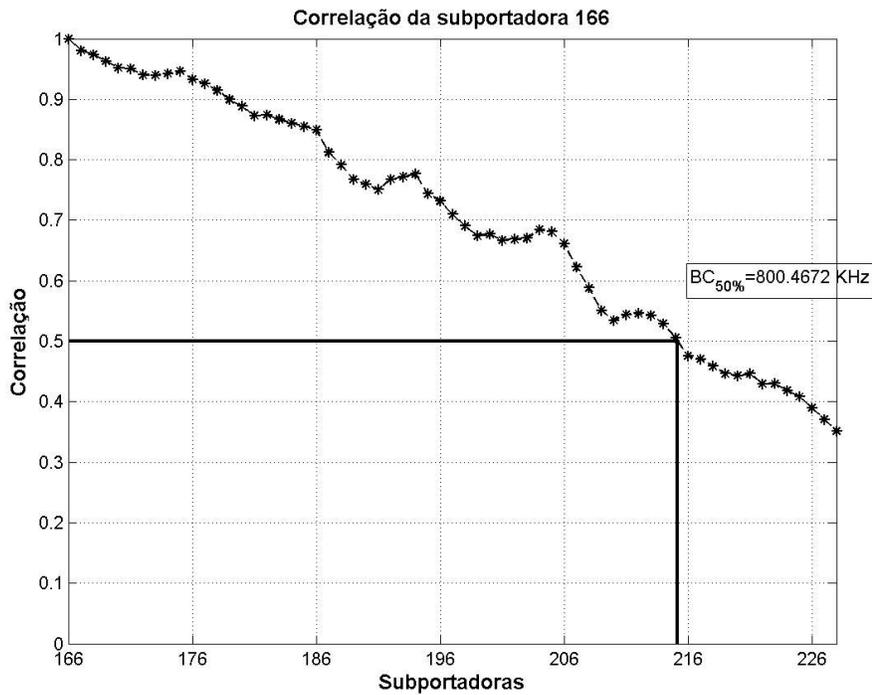
(c) Correlação da terceira subportadora piloto (90ª subportadora)



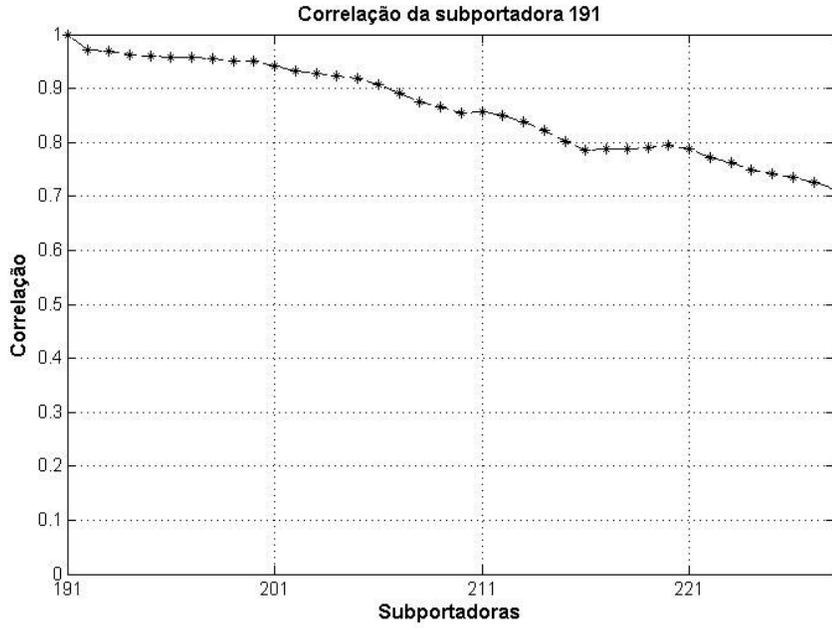
(d) Correlação da quarta subportadora piloto (115ª subportadora)



(e) Correlação da quinta subportadora piloto (141ª subportadora)

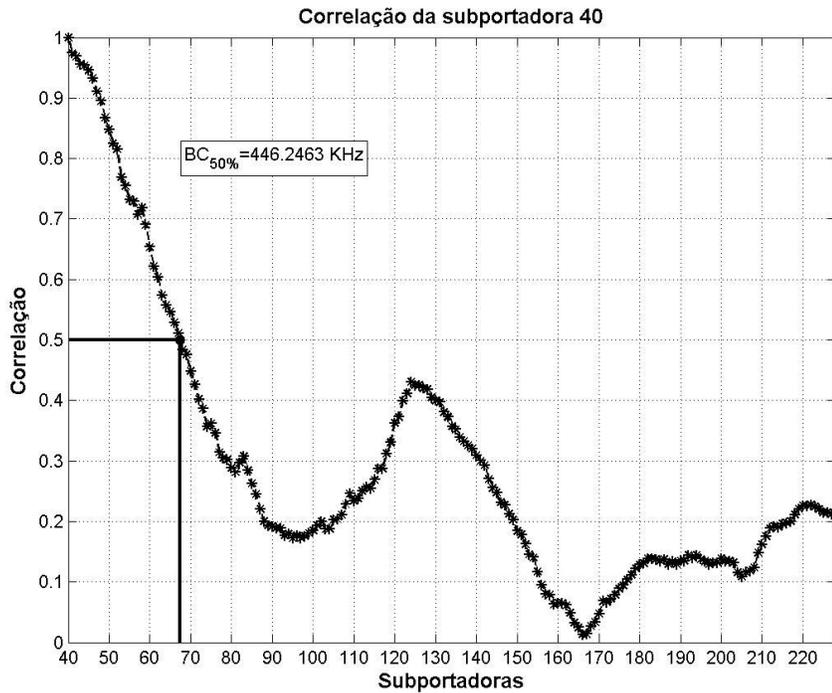


(f) Correlação da sexta subportadora piloto (166ª subportadora);

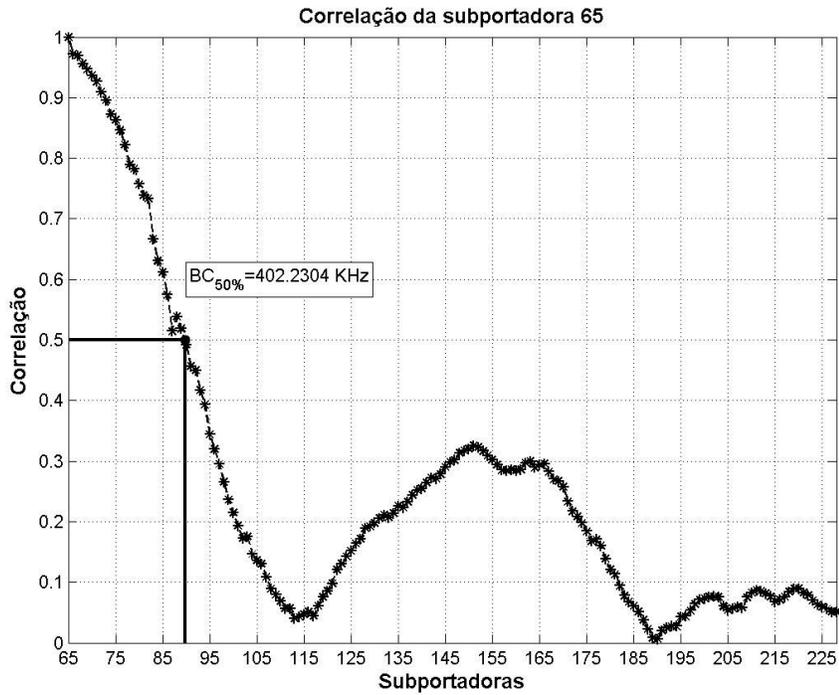


(g) Correlação da sétima subportadora piloto (191ª subportadora)

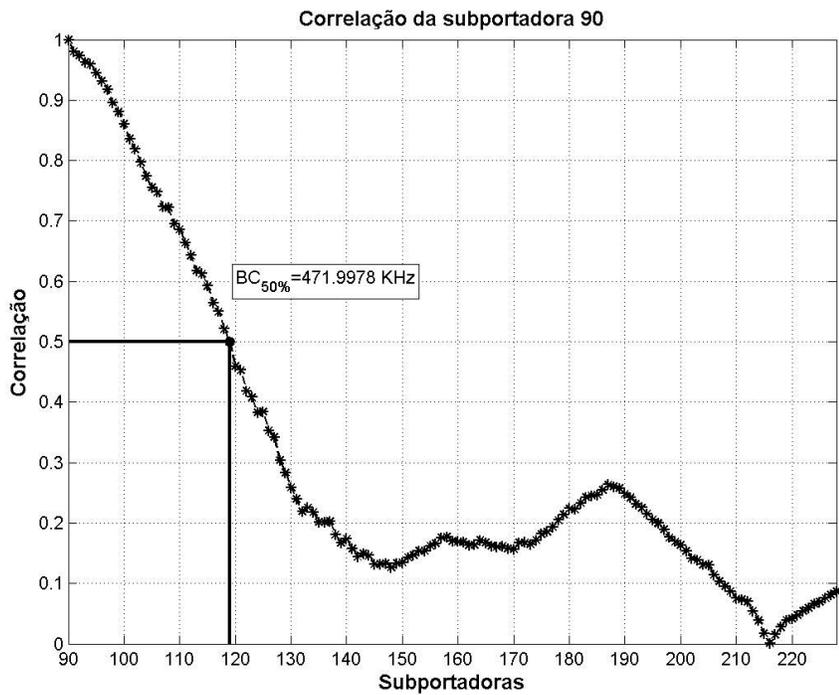
Figura 5.29: Correlação das subportadoras piloto de um setor, em LOS, da rua Mário Ribeiro.



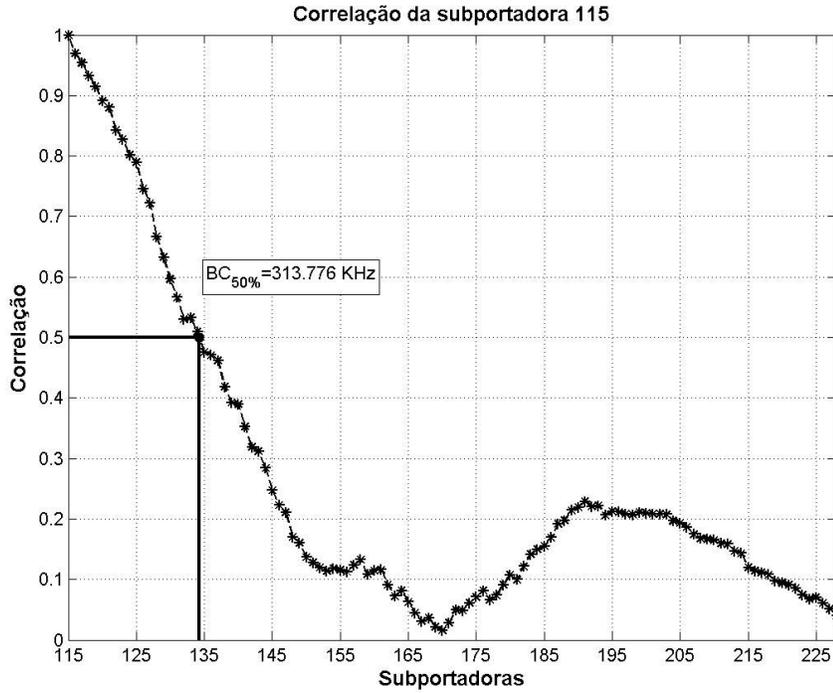
(a) Correlação da primeira subportadora piloto (40ª subportadora)



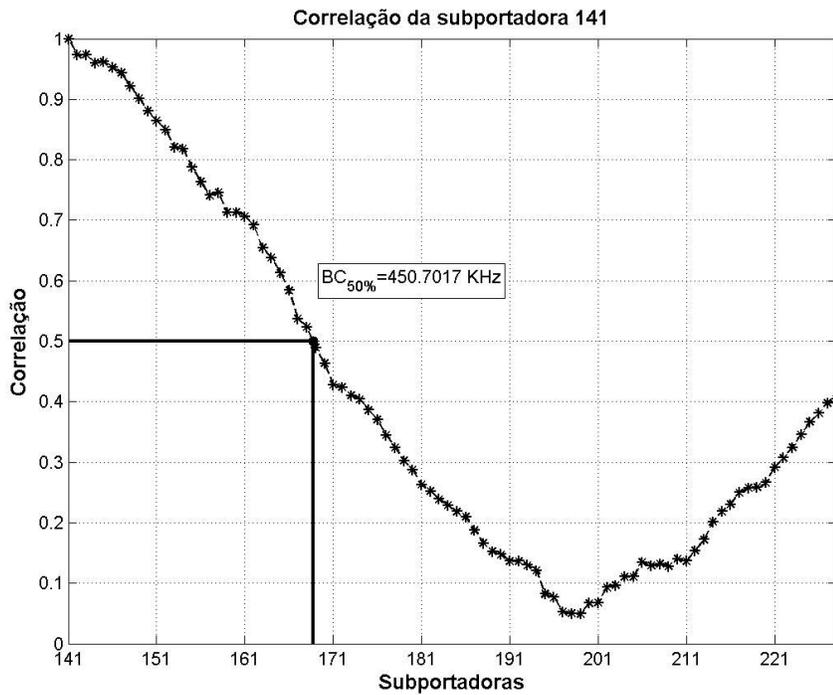
(b) Correlação da segunda subportadora piloto (65ª subportadora)



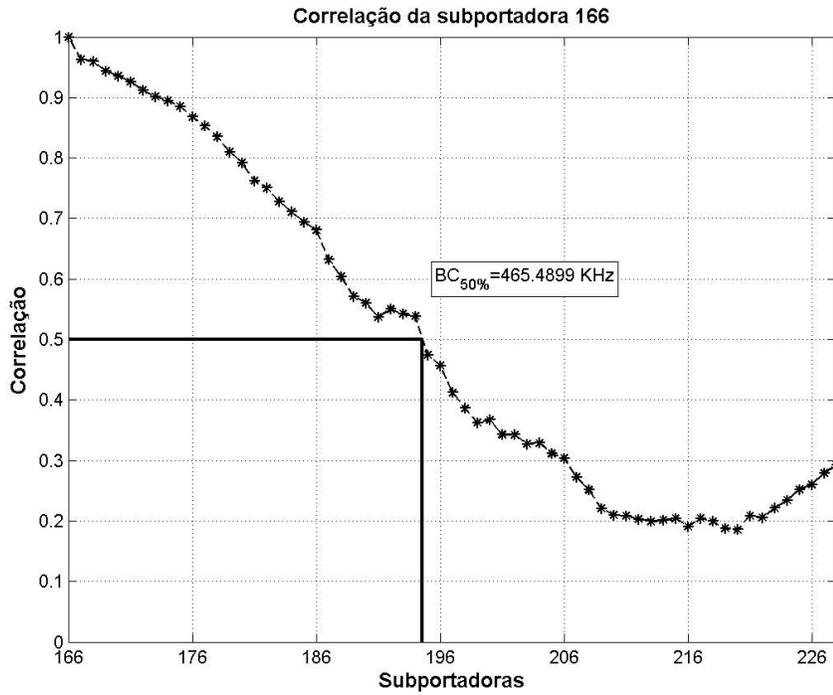
(c) Correlação da terceira subportadora piloto (90ª subportadora)



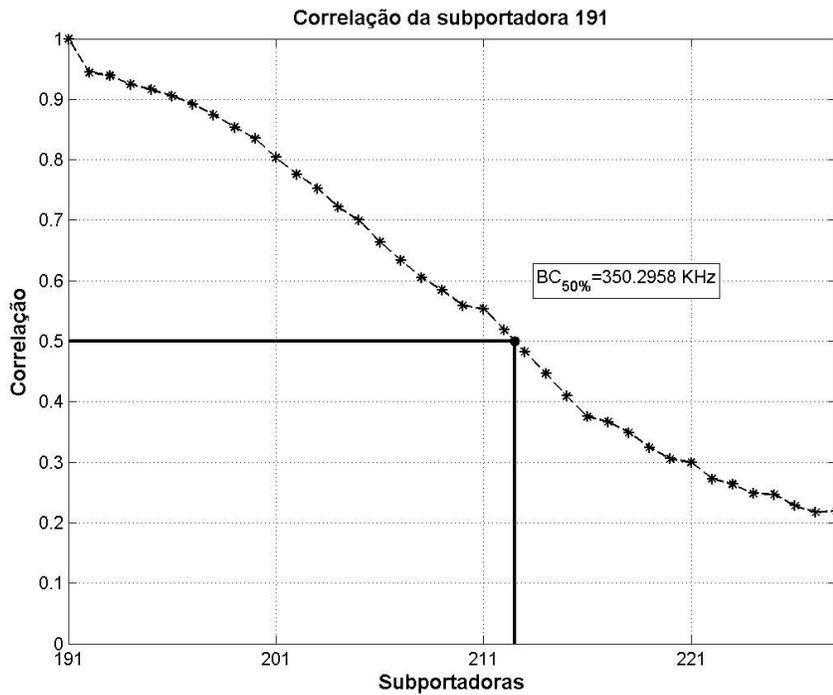
(d) Correlação da quarta subportadora piloto (115ª subportadora)



(e) Correlação da quinta subportadora piloto (141ª subportadora)



(f) Correlação da sexta subportadora piloto (166ª subportadora)



(g) correlação da sétima subportadora piloto (191ª subportadora)

Figura 5.30: Correlação das subportadoras piloto de um setor, em NLOS, da Rua Vice-Governador Rubens Berardo.

Com base na informação de banda de coerência de diversos setores, foi realizada a média desses valores para ser obtido um valor que caracterize o ambiente de LOS e NLOS.

Dois processos foram utilizados para obtenção da média do valor de banda de coerência. O primeiro processo consiste em, para cada setor, calcular a média ponderada pela quantidade de amostras utilizadas para realizar a estimativa de banda de coerência. De posse desta informação de média por setor, foi realizada uma média aritmética para chegar ao valor de banda de coerência para determinado ambiente. Este resultado é sumarizado na Tabela 5.1. O segundo processo de cálculo da média da banda de coerência consistiu na simples média aritmética, exibida na terceira coluna da Tabela 5.1.

Ambiente	Média ponderada da BC _{0,5} [KHz]	Média aritmética da BC _{0,5} [KHz]
LOS	824,68	768,04
NLOS	301,10	301,36

Tabela 5.1: Médias da banda de coerência em ambientes LOS e NLOS.

5.3. Espalhamento temporal (*Delay Spread*)

O parâmetro *delay spread* é inversamente proporcional à banda de coerência do canal. Segundo [51], esta proporcionalidade é dada pela Equação 2.17. As medições realizadas em campo proporcionam a estimativa da banda de coerência e, conseqüentemente, pode-se calcular o *delay spread* de acordo com a equação supracitada. Este cálculo é realizado para os valores médios estimados e apresentado nas tabelas Tabela 5.2 e Tabela 5.3.

Ambiente	[51] <i>Delay Spread</i> média [μ s]
LOS	0,24252
NLOS	0,66423

Tabela 5.2: Valor calculado de *delay spread*, com base na média ponderada da BC, para ambientes LOS e NLOS.

Ambiente	[51] <i>Delay Spread</i> média [μ s]
LOS	0,26040
NLOS	0,66365

Tabela 5.3: Valor calculado de *delay spread*, com base na média aritmética da BC, para ambientes LOS e NLOS.

Cox [10] apresenta medições realizadas na cidade de Nova York, utilizando a técnica de sondagem em banda larga, expõe valores medidos de banda de coerência e *delay spread* e conclui, fornecendo o gráfico de regressão linear que relaciona valores de BC e *delay spread*. De posse dos valores de banda de coerência, utiliza-se a regressão linear proposta por [10] para determinar os valores de *delay spread*, que são apresentados na Tabela 5.4.

Ambiente	Média ponderada da BC_{0,5} [KHz]	[10] Delay Spread [μs]	Média aritmética da BC_{0,5} [KHz]	[10] Delay Spread [μs]
LOS	824,68	0,670	768,04	0,707
NLOS	301,10	1,454	301,36	1,453

Tabela 5.4: Valores de delay spread calculados a partir da regressão linear sugerida por [10].