

6

Análise de Resultados

Neste capítulo serão analisados os resultados medidos apresentados no capítulo anterior. Inicialmente é descrita a construção do mapa de edificações desenvolvido neste trabalho para os testes de modelos da previsão da perda de propagação.

A partir dos testes dos modelos das Recomendações ITU-R P.141 e ITU-R P.1546, e do modelo SUI, foi selecionado o que apresenta menor erro e seus parâmetros foram ajustados para fornecer um modelo específico para a região das medições. Como o modelo obtido foi considerado ainda insatisfatório, foram desenvolvidos dois novos modelos que apresentaram bom ajuste dos dados medidos.

Para a caracterização em banda larga do canal foram obtidas as distribuições de probabilidade dos retardos medidos. Os valores médio do retardo e seu desvio padrão para as 13 rotas de medição foram modelados para as situações LOS e NLOS em função da distância.

Finalmente, foi caracterizada a dependência da distribuição cumulativa de probabilidades dos retardos com a largura de faixa de medição.

6.1

Mapas utilizados para as análises

O mapa utilizado foi gerado com ajuda de ferramenta de visualização de imagens de satélites. Inicialmente foi montada a base de dados com alturas estimadas dos prédios. Uma segunda fase do processo contemplou a realização de um detalhado *survey* para o correto dimensionamento das alturas dos prédios no bairro da Gávea e em seu entorno. A ferramenta adotada para a montagem do mapa é a distribuição livre do *Google Earth*, que permite a adição de elementos poligonais com alturas diferentes. Esta ferramenta é adequada para os objetivos do trabalho já que, como visto anteriormente, os modelos de previsão da perda de propagação requerem apenas a altura dos prédios e a distância média entre eles, dispensando detalhes arquitetônicos. Foi desenvolvido um programa em Matlab[®] que interpreta a base de dados gerada no *Google Earth* e levanta perfis e outros parâmetros que permitem realizar os

cálculos segundo os modelos de propagação. Este procedimento contempla as seguintes etapas:

1. Importação de polígonos do arquivo com extensão .kml do *Google Earth* para o Matlab®, obtendo-se um mapa vetorial georeferenciado.
2. Rasterização do arquivo vetorial, de forma a obter perfis entre transmissor e receptor.

Embora o procedimento de geração do mapa tenha sido realizado de forma bastante criteriosa, evidentemente existirão erros na realização da base de dados de alturas dos prédios. Estes erros não são críticos já que os cálculos requerem a altura média dos prédios ao longo do perfil. Além disto, a campanha de medição foi realizada numa região que não apresenta variações de altura significativas. Em um trabalho futuro poderia se quantificar o erro refinando as análises utilizando um mapa de alta resolução adquirido de empresa especializada.



Figura 6.1: Mapa do bairro Gávea e prédios.

6.2

Comparação com modelos de predição de perda de propagação ITU-R

Nesta seção são apresentados os resultados comparativos da simulação de cobertura através dos métodos das recomendações da ITU-R P.1411-3 e P.1546-3 e do método SUI com as medições realizadas em campo.

De forma a avaliar a diferença entre os valores dos modelos de predição e as medições, foram calculados os valores de erro médio, desvio padrão do erro e erro RMS. O erro médio é o valor médio de todas as diferenças, positivas e negativas, encontradas entre os modelos de predição e o valor medido em cada ponto. Um erro igual a zero indica apenas que o modelo superestima e subestima igualmente em diferentes pontos. Num modelo empírico, o erro

médio pode ser reduzido a zero pela simples adição de uma constante. Um segundo indicador da qualidade dos modelos é o desvio padrão do erro, que representa a dispersão estatística entre os valores medidos e calculados, e é dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \text{erro}_i - \text{erro}_{\text{medio}}} \quad (6-1)$$

O erro RMS é uma figura de mérito que representa conjuntamente o erro médio e o desvio padrão, dada pela expressão:

$$\text{erro}_{RMS} = \sqrt{\text{erro}_{\text{medio}}^2 + \sigma^2} \quad (6-2)$$

onde,

N é o número total de amostras.

Nas Figuras 6.2 a 6.7 são apresentadas as comparações entre os resultados das medições e a predição obtida com os modelos do ITU-R e o modelo SUI. As figuras mostram a perda de propagação, em dB, em função da distância em metros. Foram analisadas separadamente as situações com linha de visada (LOS) e sem linha de visada (NLOS). A determinação da condição de visada entre o transmissor e o receptor foi obtida por meio de cálculo de difração por gume de faca no perfil obtido com o mapa de edificações indicado na seção anterior. A condição LOS foi considerada quando a perda por difração calculada resultou igual a zero.

6.3

Medições vs. Rec. ITU-R P.1411

Na Figura 6.2, para a situação com linha de visada (LOS), o modelo da recomendação ITU-R P. 1411, que nesta condição corresponde à atenuação em espaço livre, mostra resultados otimistas (menor perda prevista) em relação às medições, subestimando a atenuação por valores entre 10 e 30 dB. O erro médio de predição é de -21,9 dB o desvio padrão de 10,4 dB.

Na avaliação da situação NLOS, o modelo é também otimista em relação resultado das medições. Existem alguns pontos em que a aproximação é boa mas, na maioria dos casos, também se observa significativa subestimação. Neste caso cabe indicar que na predição existe um limitante inferior, dado pela perda de espaço livre e um efeito superposto de difração com contribuição adicional para as perdas. Uma explicação para este comportamento é que o modelo é mais adequado para ambiente suburbanos, com casas de poucos pavimentos uniformemente distribuídas e não para ambiente densamente urbanizados com

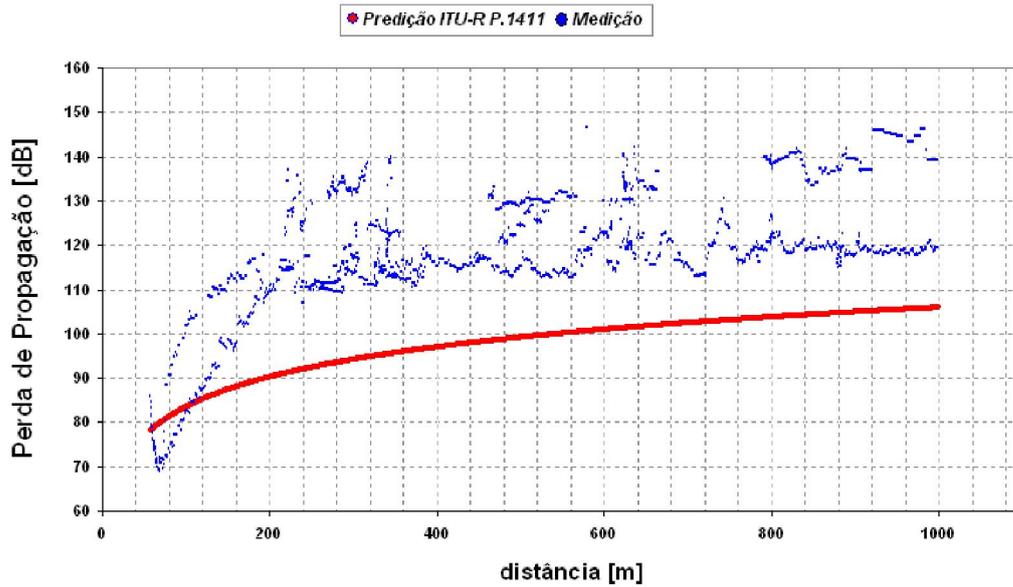


Figura 6.2: Perda de propagação vs distância, medição e ITU R P.1411 para LOS.

prédios elevados de diferentes alturas e distribuídos aleatoriamente. Neste caso o erro médio foi de 19,7 dB com o desvio padrão de 15,6 dB.

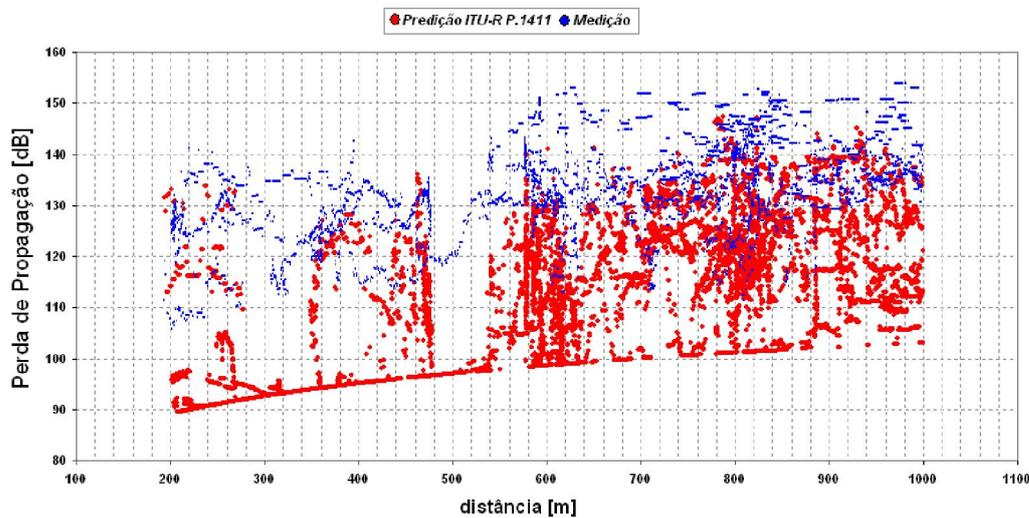


Figura 6.3: Perda de propagação vs distância, medição e ITU R P.1411 para NLOS.

Pelos resultados a componente L_{rts} (atenuação devida à difração entre os prédios até a rua) é a que, por sua variabilidade, influencia mais fortemente os resultados obtidos pelo método, como ilustrado na Figura 6.4.

6.4 Medições vs. Rec. ITU-R P.1546

Para avaliação da recomendação ITU-R.P 1546, foram consideradas distâncias entre o transmissor e receptor superiores a 1 km. Neste caso o modelo

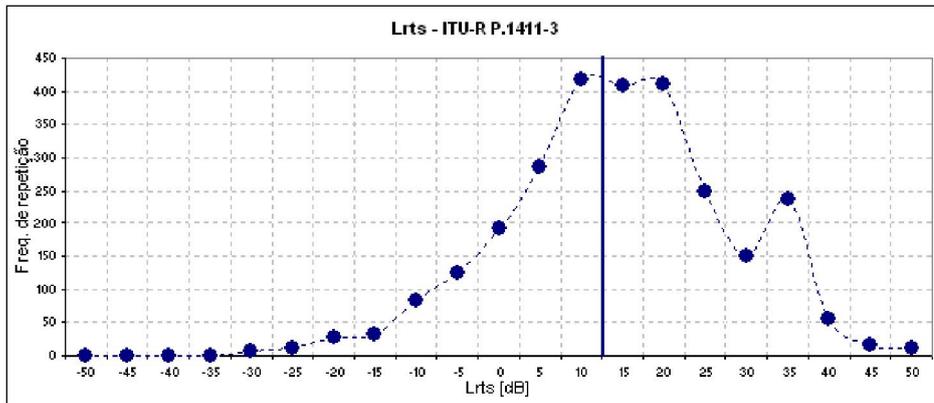


Figura 6.4: Lrts - Rec. ITU-R P.1411-3.

é pessimista (maior perda prevista) em relação aos resultados das medições. O erro médio de predição é de 15,7 dB com desvio padrão de 7,6 dB. As seções compreendidas para distâncias maiores a 2 km são as rotas de medição que compreendem a Av. Epitacio Pessoa (lado oposto da Lagoa Rodrigo de Freitas).

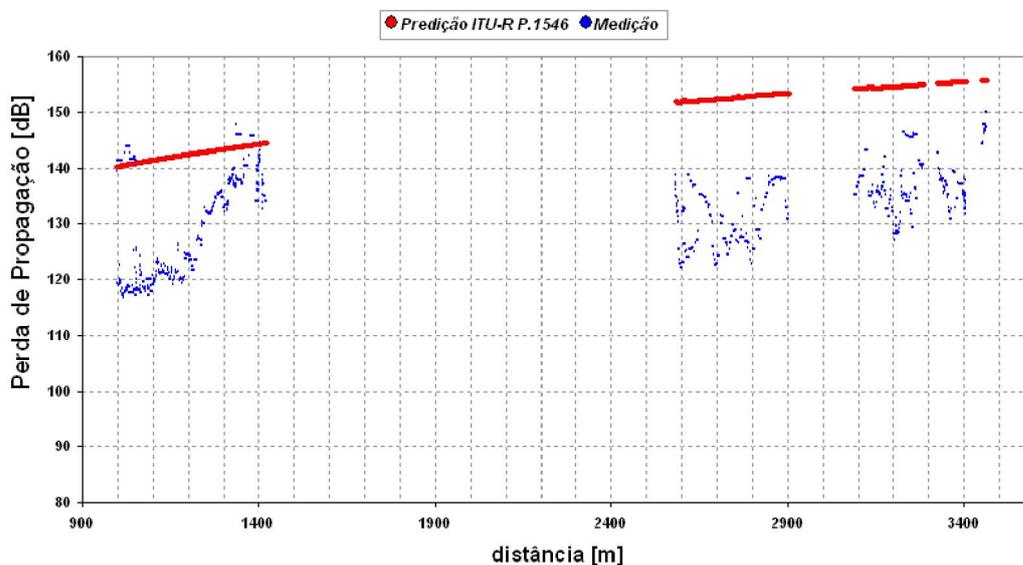


Figura 6.5: Perda de propagação vs distância, medição e ITU R P.1546 para LOS.

Na situação NLOS, a curva observada é dividida em duas seções, em vermelho aquela que faz cálculo do perfil onda há mapa disponível para cálculo do perfil, e em laranja a seção onde não há informação de edificações. Como na situação LOS, o modelo de predição se mostra pessimista apresentando um erro médio de 19,2 dB com desvio padrão de 11,8 dB.

Considerando os valores elevados de erro médio e o desvio padrão do erro, foi feita uma tentativa de ajustar parâmetros dos modelos por regressão não

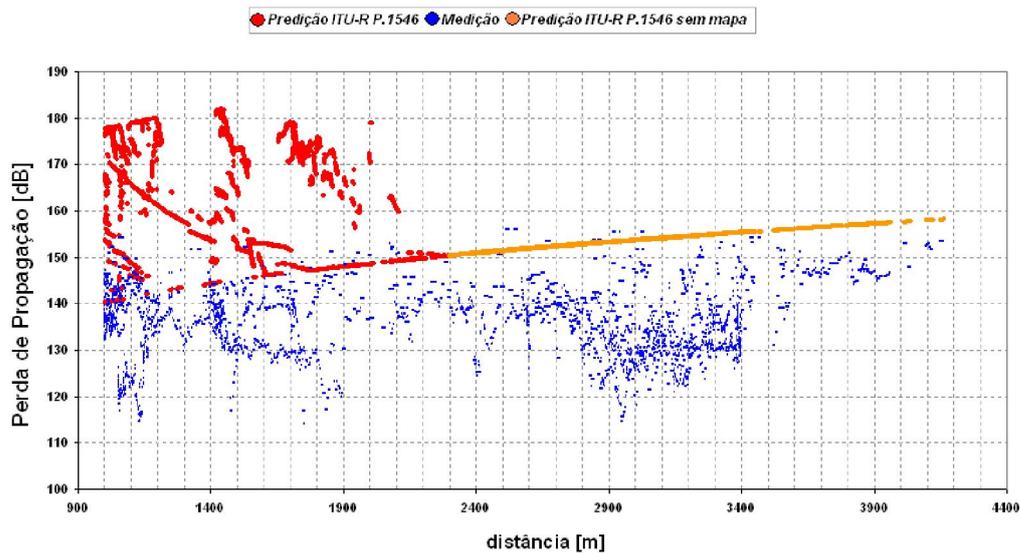


Figura 6.6: Perda de propagação vs distância, medição e ITU R P.1546 para NLOS.

linear. Entretanto, para estes dois modelos, não foi obtida melhora significativa dos resultados de previsão.

6.5 Medições vs. Modelo SUI

O modelo SUI é de fácil implementação, pois não faz uso do perfil do terreno. Como visto no Capítulo 2, existem 3 versões do modelo SUI para categorias de terreno distintas. A Figura 6.7 mostra uma comparação entre os dados medidos e as 3 versões do modelo.

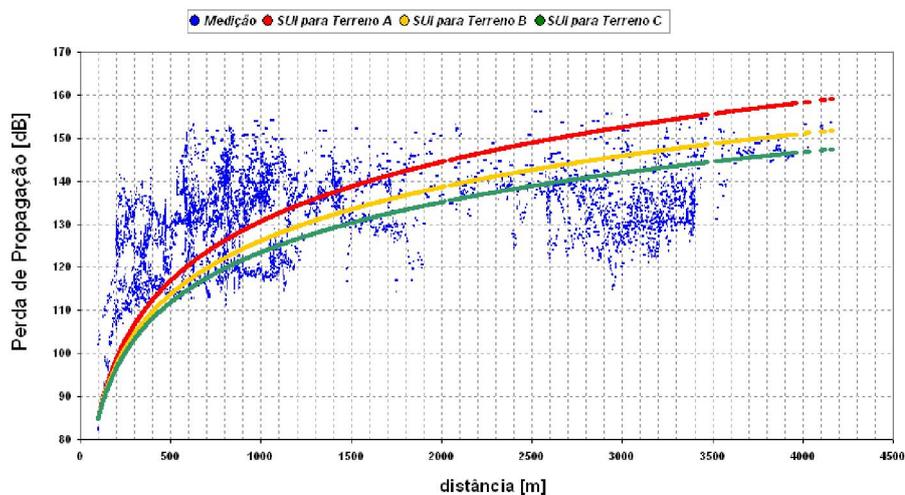


Figura 6.7: Perda de propagação vs distância, medição e SUI Model.

Dentre as três categorias de terreno para cálculo de perda de propagação, a categoria A apresenta o menor erro médio igual a -0,44 dB. O desvio padrão

nos três casos é elevado, como indicada na Tabela 6.1.

Categoria	Erro Médio [dB]	Desvio padrão [dB]
SUI A	-0,44	14,41
SUI B	4,50	13,23
SUI C	7,43	12,56

Tabela 6.1: Erros de medição e cálculo para modelo SUI.

Observa-se, entretanto, uma tendência à subestimação para pequenas distâncias e à superestimação da perda para distâncias acima de 2 km. Ajustando-se os parâmetros a , b e c por estimação não linear para minimizar o erro médio quadrático, a melhor combinação de parâmetros obtida $a = 4,46$, $b = 0,0055$ e $c = 12,6$. Com estes valores e considerando a altura da ERB utilizada de 42 m, o fator de propagação resulta em 4,53, uma representação do modelo é apresentado na figura 6.8. O erro médio obtido com este ajuste é de -0,17 dB com desvio padrão de 14,26 dB. A expressão para o modelo é:

$$L_{ajuste1} = 20\log_{10}(4\pi 100/\lambda) + 10(4,46 - 0,0055h_b + 12,6/h_b)\log_{10}(d/100) + 6\log_{10}(f/2000) \quad (6-3)$$

onde,

λ é o comprimento de onda em metros,

f é a frequência em MHz. O valor de 3.420 MHz na medição realizada,

d é a distância em metros e

hb é a altura da estação base.

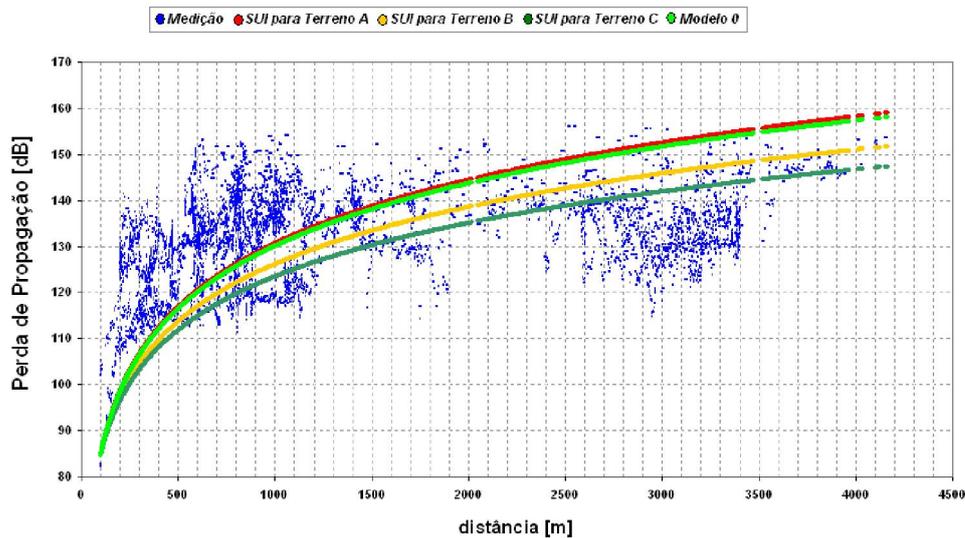


Figura 6.8: Perda de propagação vs distância, Modelo 0 - Primeiro ajuste.

6.6 Modelos propostos

Considerando os resultados apresentados nas seções anteriores, foram desenvolvidos dois novos modelos, baseados no modelo SUI, para a previsão da perda de propagação.

O primeiro modelo considera uma distinção entre as situações LOS e NLOS. Para a situação NLOS foi introduzida uma dependência com a distância no fator de propagação na forma $\gamma = a + b * d + c/d$. O ajuste dos parâmetros por regressão não linear fornece $a=3,83$, $b=-0,0002$ e $c=1599,224$.

$$L_{ajuste2LOS} = 112,8 + 20 \log_{10}(d/100) \quad (6-4)$$

Já para o caso LOS o ajuste foi considerada uma expressão semelhante à da propagação em espaço livre mas ajustada a constante de modo a minimizar o erro médio.

$$L_{ajuste2NLOS} = 82,468 + 10 * (3,83 - 0,0002d + 1600/d) \log_{10}(d/100) \quad (6-5)$$

Com este modelo composto o erro médio obtido é de -0,036 dB com desvio padrão de 8,37 dB. A Figura 6.9 apresenta a comparação entre as perdas de propagação medidas e as previstas por este modelo em função da distância.

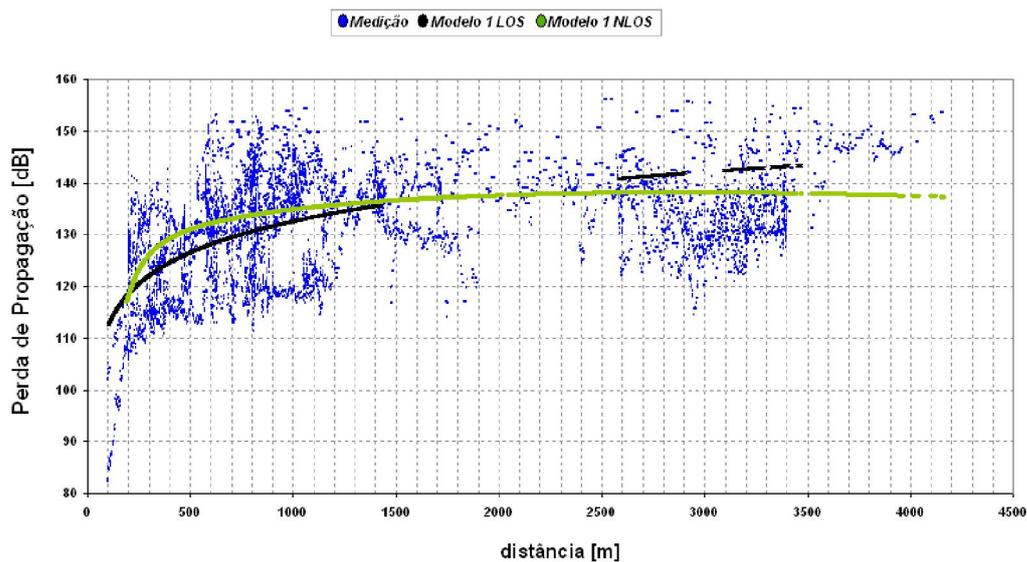


Figura 6.9: Perda de propagação vs distância, Modelo 1.

As Figuras 6.10 a 6.16 mostram os histogramas e distribuições dos erros de previsão, além de uma comparação entre valores medidos e previstos.

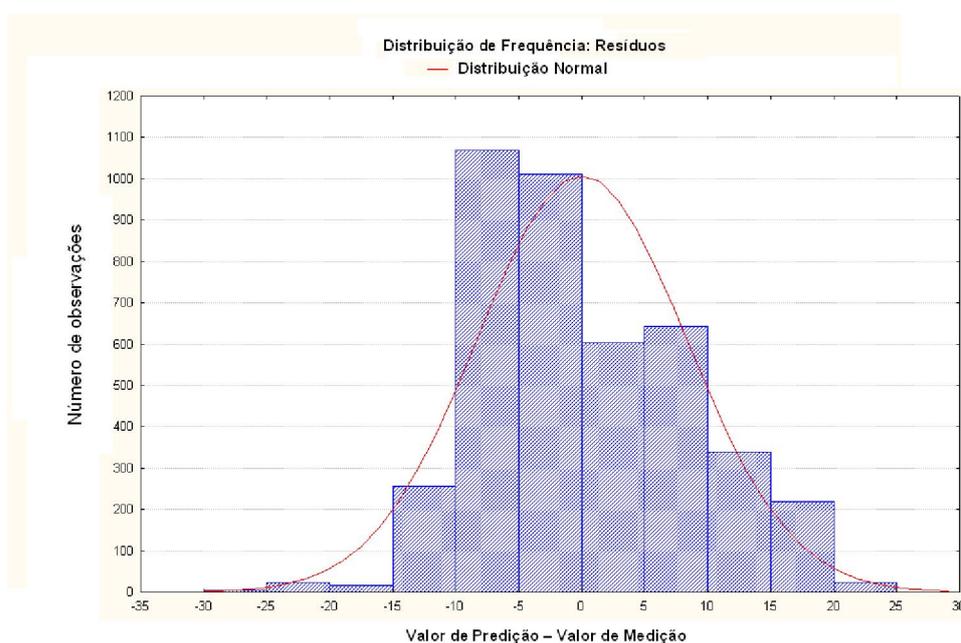


Figura 6.10: Distribuição estatística de erros, Modelo 1 - LOS.

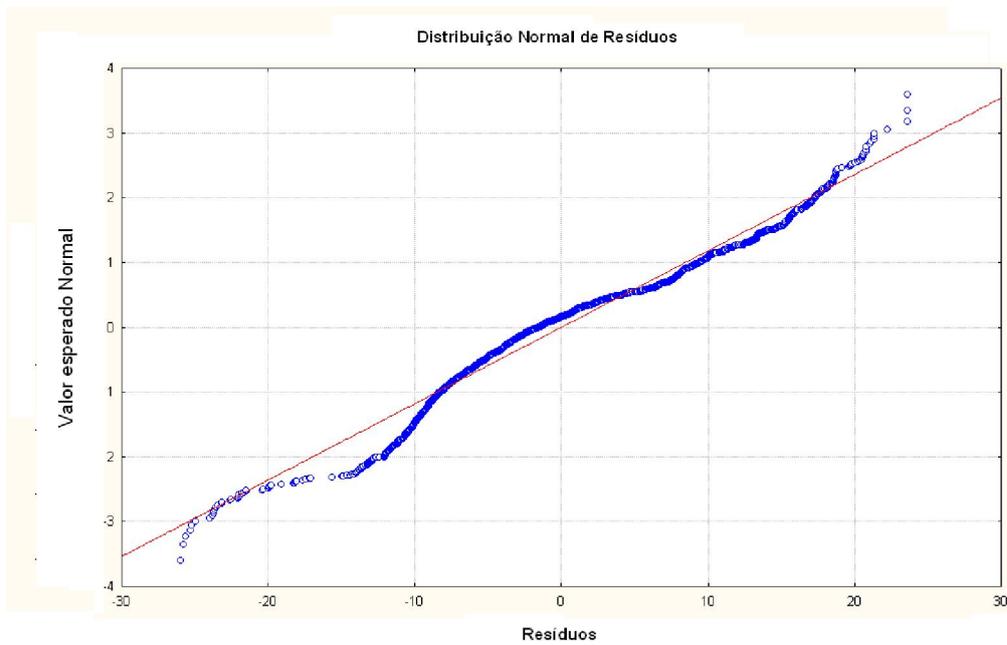


Figura 6.11: Distribuição estatística normal e resíduos, Modelo 1 - LOS.

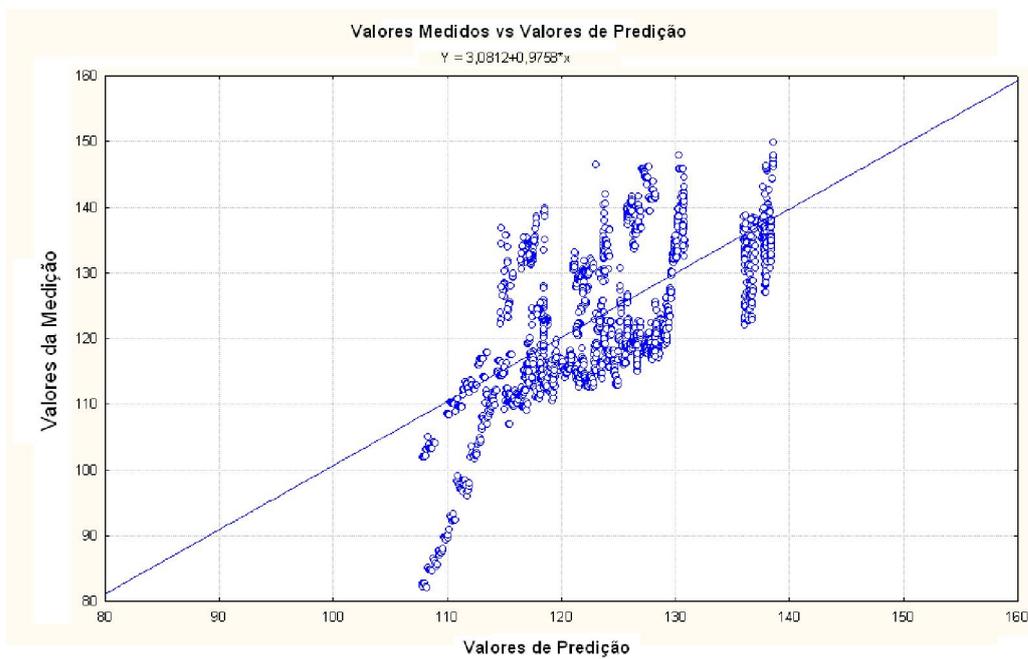


Figura 6.12: Valores medidos vs predição, Modelo 1 - LOS.

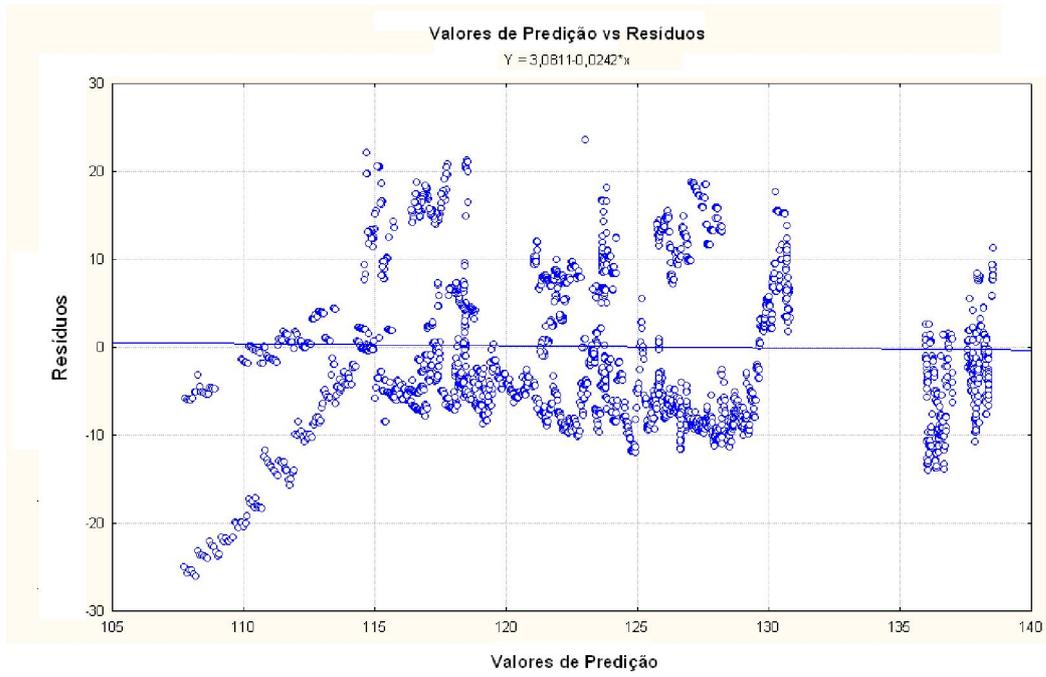


Figura 6.13: Resíduos vs Predição, Modelo 1 - LOS.

Para o caso NLOS, as figuras de distribuição e comparação com as medições são as indicadas nas figuras 6.14, 6.15 e 6.16.

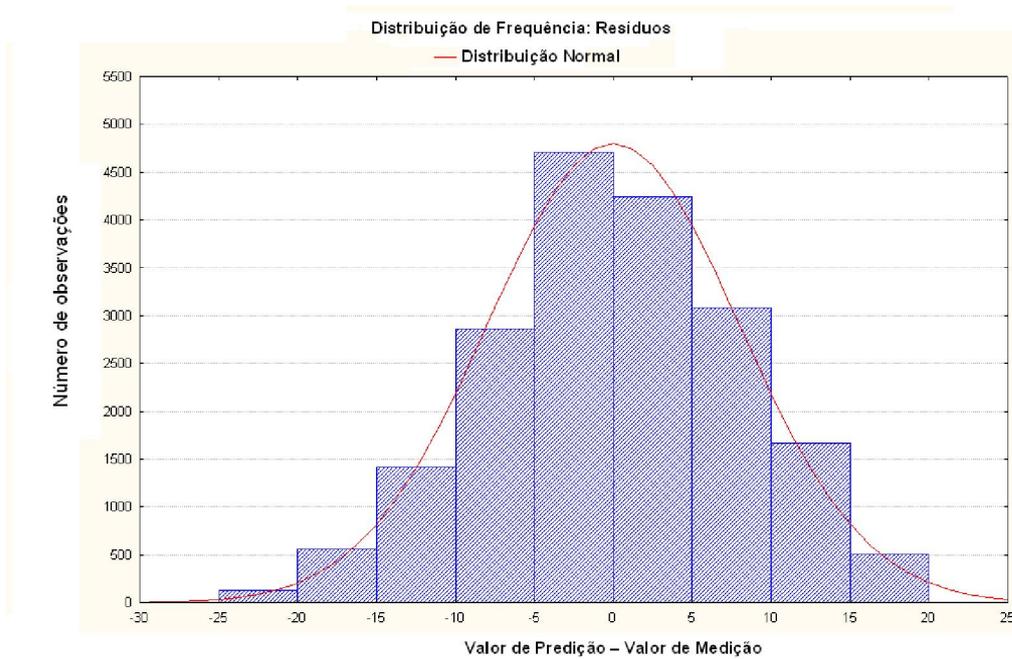


Figura 6.14: Distribuição estatística de erros, Modelo 1 - NLOS.

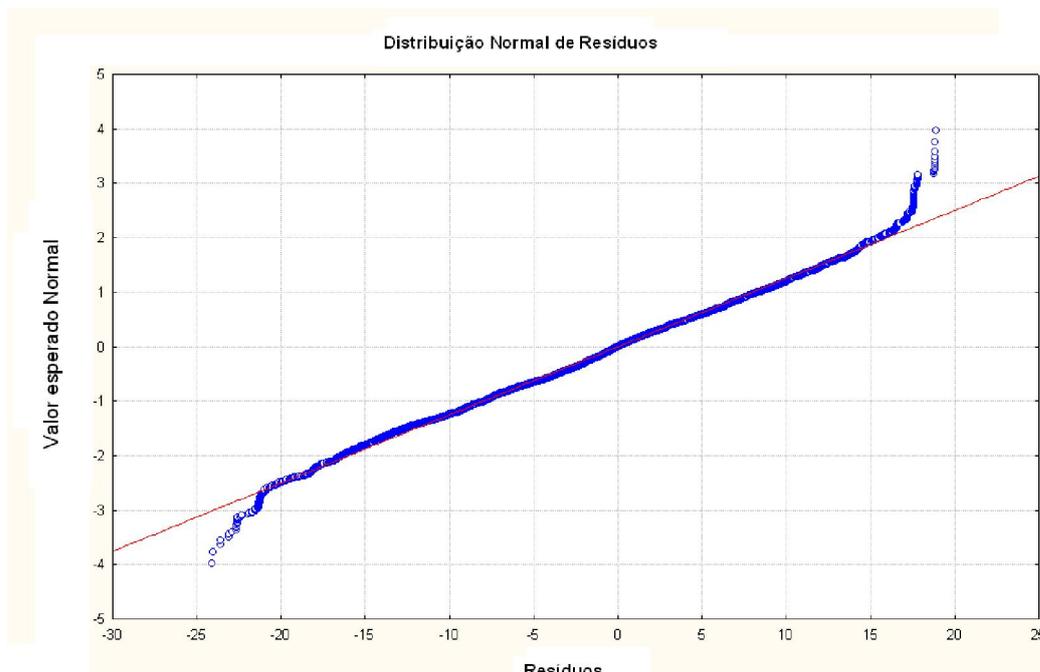


Figura 6.15: Distribuição estatística normal e resíduos, Modelo 1 - NLOS.

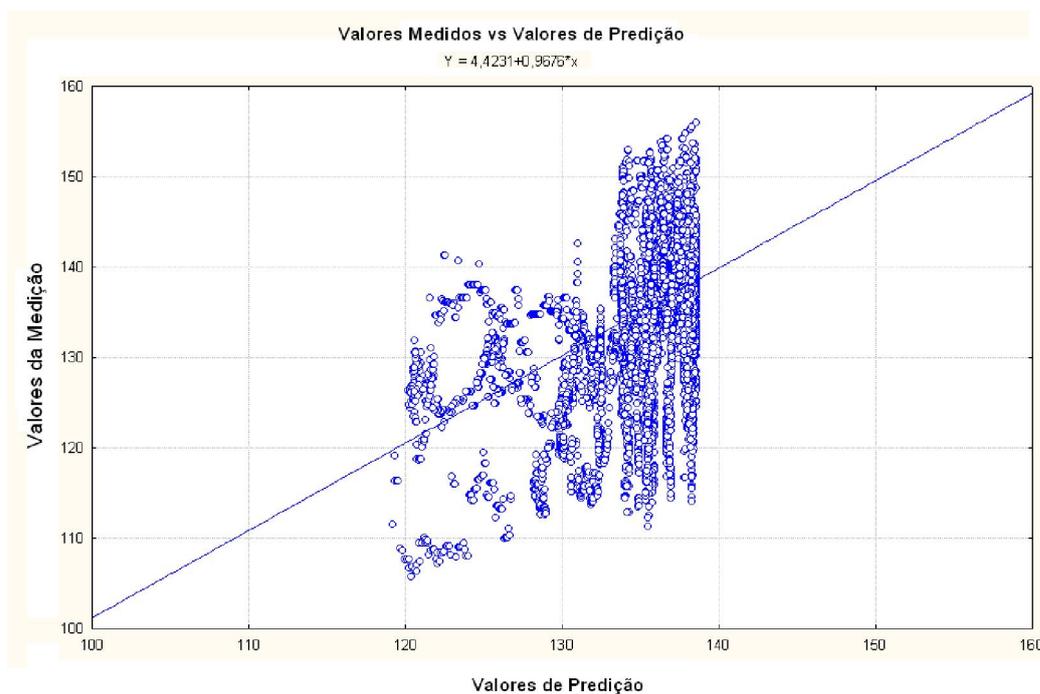


Figura 6.16: Valores medidos vs predição, Modelo 1 - NLOS.

Para um modelo bem ajustado espera-se que os erros de previsão apresentem uma distribuição gaussiana. Esta condição foi bem atendida no caso da condição NLOS mas na condição LOS existe ainda uma ligeira tendência à subestimação da atenuação.

O segundo modelo proposto apresenta uma única expressão para os casos LOS e NLOS com a inclusão de um termo adicional, proporcional à difração gume de faca pelo obstáculo principal do perfil entre transmissor e receptor. A expressão resultante é:

$$L_{ajuste3} = 84,52 + 10\log_{10}(a + b/d)\log_{10}(d/100) + cDiff \quad (6-6)$$

onde,

d é a distância em metros,

$Diff$ é a difração obtida pelo equivalente gume de faca e

a , b e c são os parâmetros de ajuste obtidos pela estimação não linear. Os valores obtidos foram $a=2,97$, $b=1428,59$ e $c=0,267$.

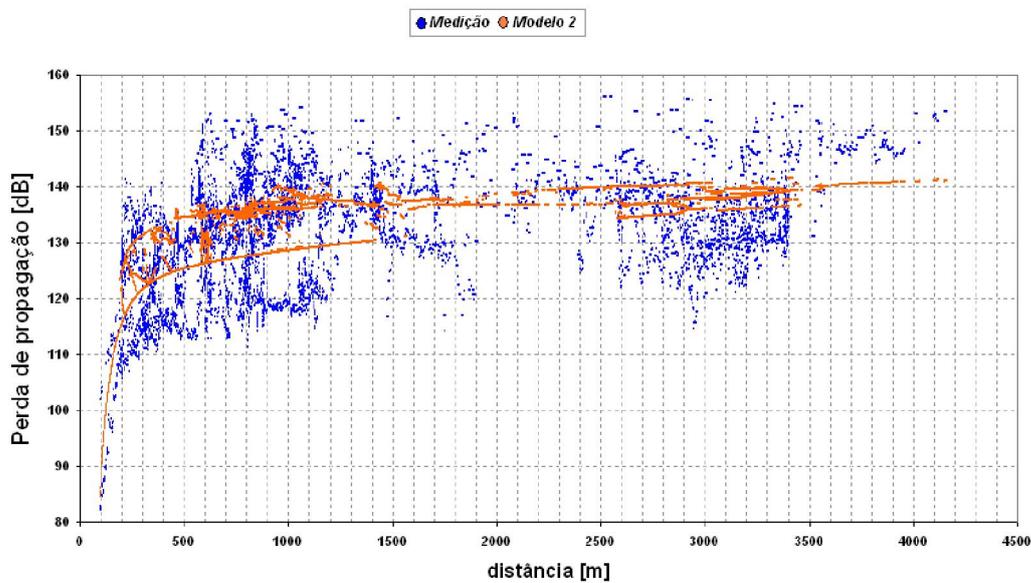


Figura 6.17: Perda de propagação vs distância, Modelo 2.

O erro médio obtido com este modelo é de 0,0044 dB com desvio padrão de 8,00 dB. A análise das estatísticas de erro é apresentada nas Figuras 6.18 a 6.21.

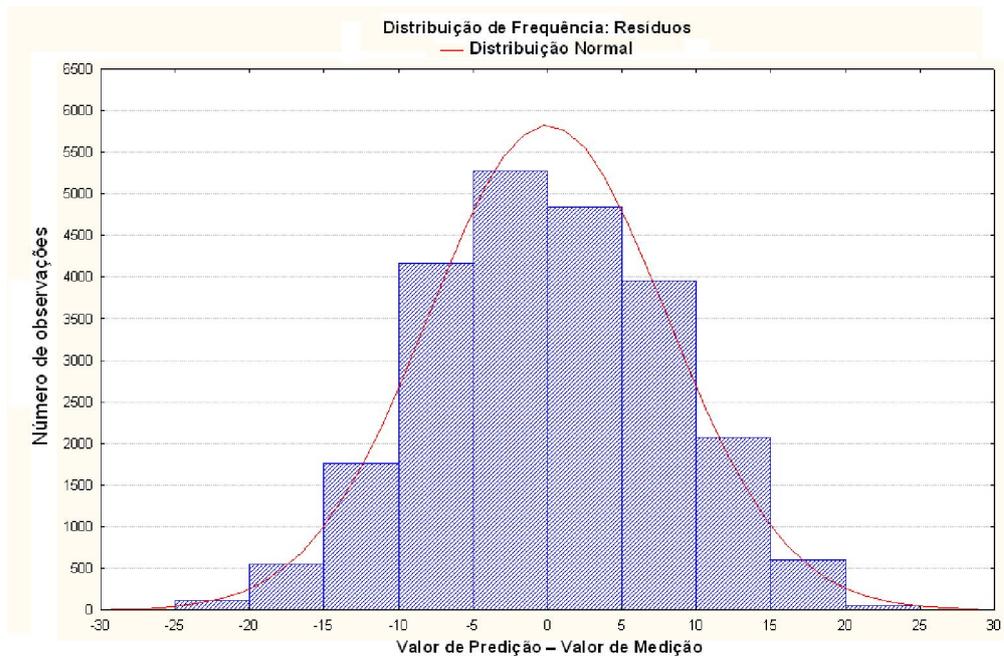


Figura 6.18: Distribuição estatística de erros, Modelo 2.

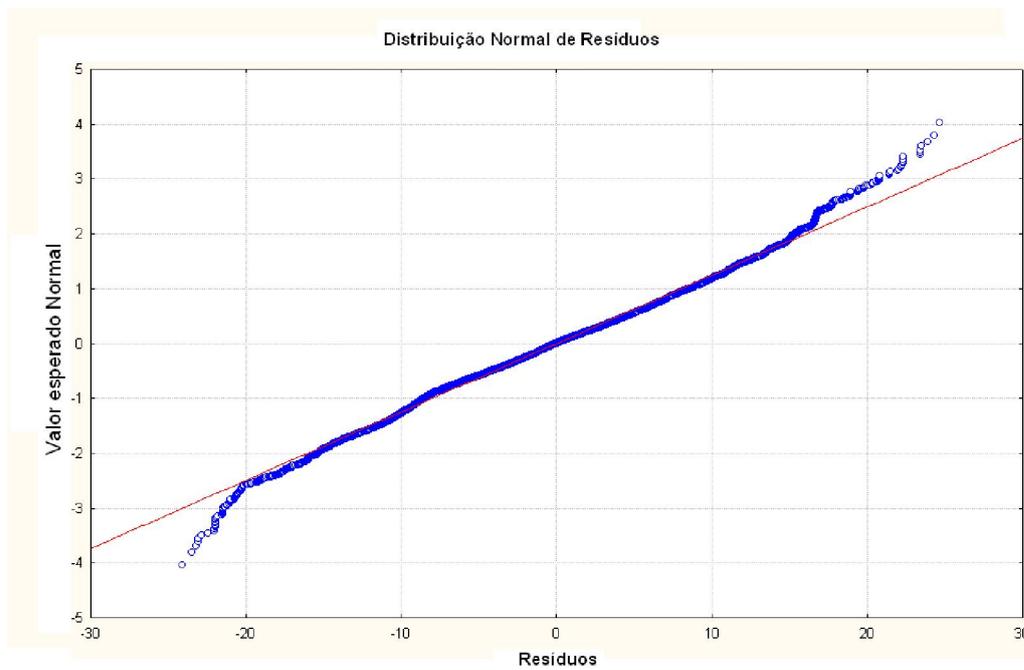


Figura 6.19: Distribuição estatística normal e resíduos, Modelo 2.

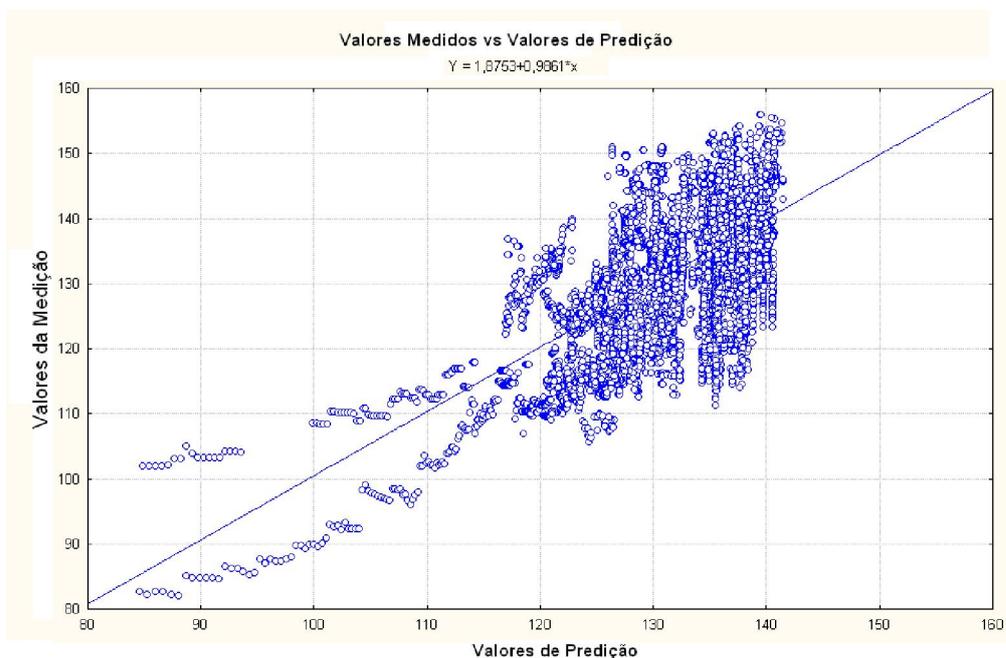


Figura 6.20: Valores medidos vs predição, Modelo 2.

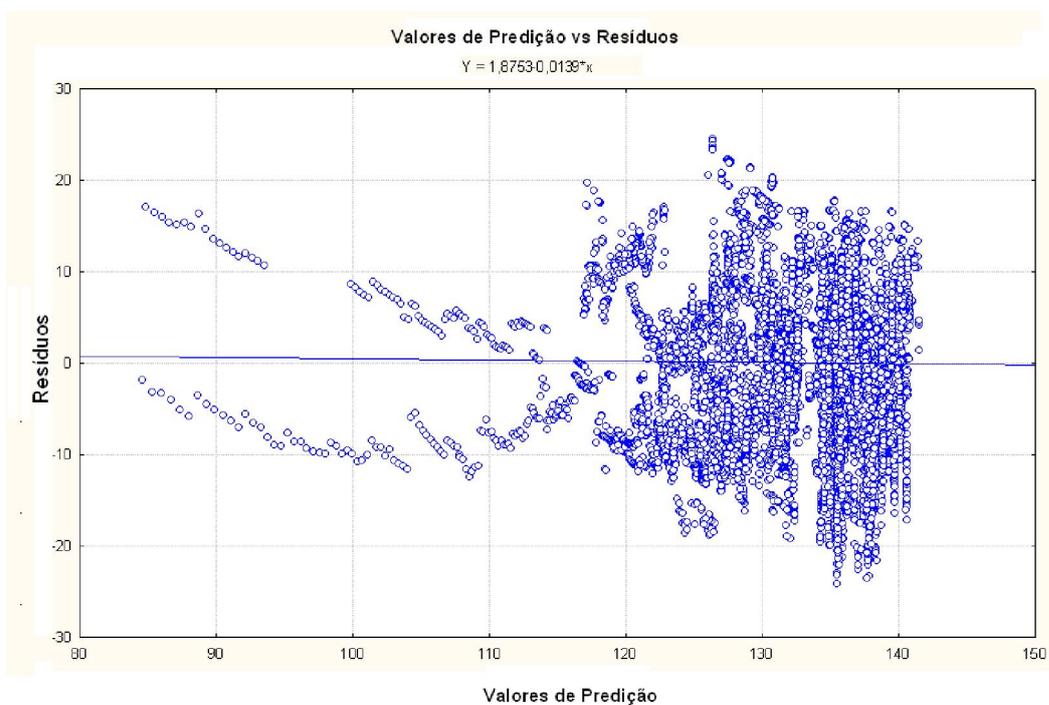


Figura 6.21: Resíduos vs Predição, Modelo 2.

Em resumo, os erros encontrados para os diferentes modelos são:

Modelo	Erro médio	Desvio Padrão do erro	Erro RMS
ITU-R P.1411 LOS	21,95	10,45	24,31
ITU-R P.1411 NLOS	19,70	15,58	25,12
ITU-R P.1546 LOS	-15,74	7,64	17,49
ITU-R P.1546 NLOS	-19,16	11,78	22,50
SUI Terreno A	-0,44	14,41	14,42
SUI Terreno B	4,50	13,23	13,97
SUI Terreno C	7,43	12,56	14,60
Ajuste SUI	-0,17	14,26	14,26
Modelo 1	-0,36	8,37	8,37
Modelo 2	0,0044	8,00	8,00

Tabela 6.2: Erros de medição e cálculo.

Recomenda-se o uso do modelo 1 para uma avaliação simplificada, sem necessidade de conhecimento do perfil do terreno, e do modelo 2 para uma avaliação mais precisa.

6.7

Caracterização de Canal Banda Larga

Parâmetros do perfil de Retardos

O perfil de retardos para a região foi obtido a partir de todas as amostras do conjunto de medições coletadas com o sinal transmitido com largura de banda de 20 MHz. Com esta largura de banda obtém-se a melhor resolução temporal para os retardos, correspondente a uma resolução especial de 15 metros. Nos perfis de retardo obtidos, o algoritmo CFAR permitia determinar os componentes de multipercurso válidos (τ), para posteriormente obter os parâmetros do perfil de retardos, como o retardo médio ($\bar{\tau}$) e o retardo RMS (τ_{RMS}). As expressões utilizadas para este cálculo são [50]:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k p(k)^2 \tau(k)}{\sum_k p(k)^2} \quad (6-7)$$

$$\tau_{RMS} = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (6-8)$$

onde,

$$\overline{\tau^2} = \frac{\sum_k p(k)^2 \tau(k)^2}{\sum_k p(k)^2} \quad (6-9)$$

$p(k)$ é a amplitude da componente k do perfil de retardos e

$\tau(k)$ é o retardo de propagação da componente k do perfil de retardos.

A Tabela 6.3 mostra os valores médios e o desvio padrão dos retardos obtidos em cada uma das rotas de medição.

Nome arquivo de Medição	Média de retardo RMS [μ seg]	Desvio padrão do retardo RMS [μ seg]	Observação
02/11/2008 20MHz part1	0,216	0,201	Predominante NLOS
02/11/2008 20MHz part2	0,168	0,126	NLOS
02/11/2008 20MHz part3	0,217	0,159	NLOS
02/11/2008 20MHz part4	0,205	0,153	Predominante NLOS
02/11/2008 20MHz part5	0,164	0,123	Predominante NLOS
04/11/2008 20MHz part1	0,285	0,211	Predominante NLOS
04/11/2008 20MHz part2	0,148	0,127	NLOS
04/11/2008 20MHz part3	0,280	0,174	NLOS
04/11/2008 20MHz part4	0,201	0,154	Predominantemente LOS
04/11/2008 20MHz part5	0,209	0,201	Predominantemente LOS
04/11/2008 20MHz part6	0,142	0,127	Predominantemente LOS
06/11/2008 20MHz part1	0,171	0,119	NLOS
06/11/2008 20MHz part2	0,195	0,150	NLOS

Tabela 6.3: Erros de medição e cálculo - Perfil de retardos.

Os resultados apresentados na Tabela 6.3, estão em concordância com o ambiente e não diferenciam de forma marcada uma situação com linha de visada ou não. Os valores encontrados apresentam valores similares em toda a região, o que caracteriza uma mesma área tanto para as medições realizadas

no bairro da Gávea como Lagoa e Leblon. O valor médio para as medições realizadas com canal de 20 MHz é de 0,196 μseg e o desvio padrão de 0,161 μseg .

Como visto anteriormente o valor de LT_s ou prefixo cíclico deve ser maior do que o espalhamento de retardo. No caso de um sinal transmitido com 20 MHz, com duração de bloco de 43,52 μsegs , o tempo mínimo de prefixo cíclico recomendado é 10 vezes o retardo médio ou, neste caso, 1,96 μsegs . Isto corresponde a um intervalo de guarda mínimo de 1/22, sendo valores típicos 1/64, 1/32, 1/16 e 1/8. O correto dimensionamento do intervalo garante o bom desempenho da rede quanto à robustez ao multipercurso na taxa de transmissão utilizada.

De forma a avaliar o comportamento do retardo RMS e do retardo médio, as Figuras 6.22 e 6.23 apresentam a sua variação em função da distância.

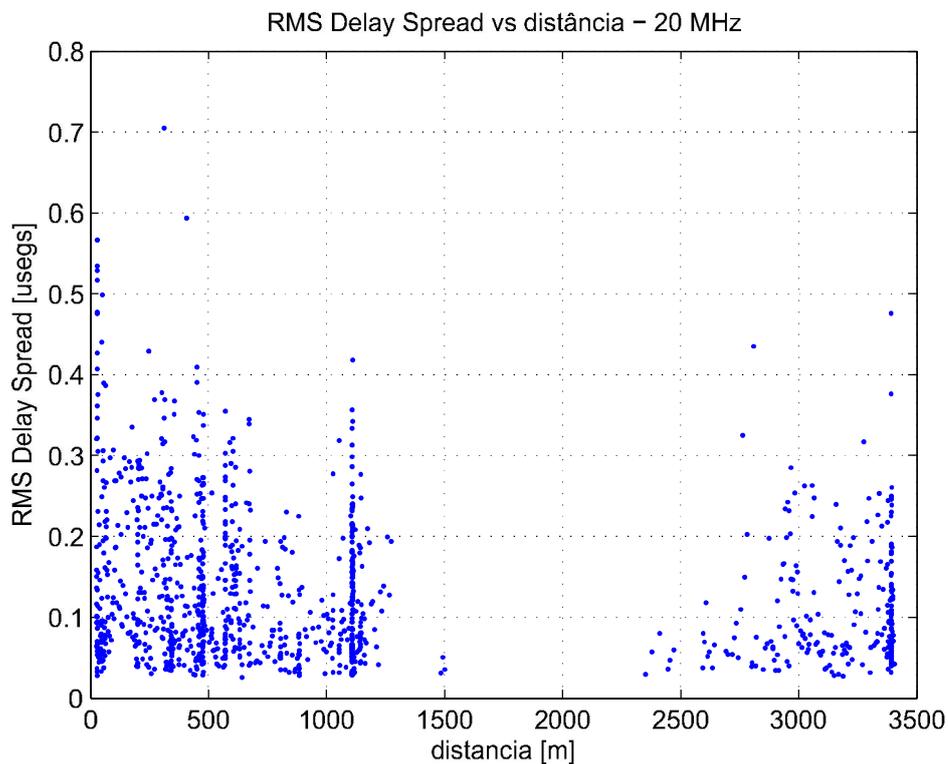


Figura 6.22: Retardo RMS em função da distância.

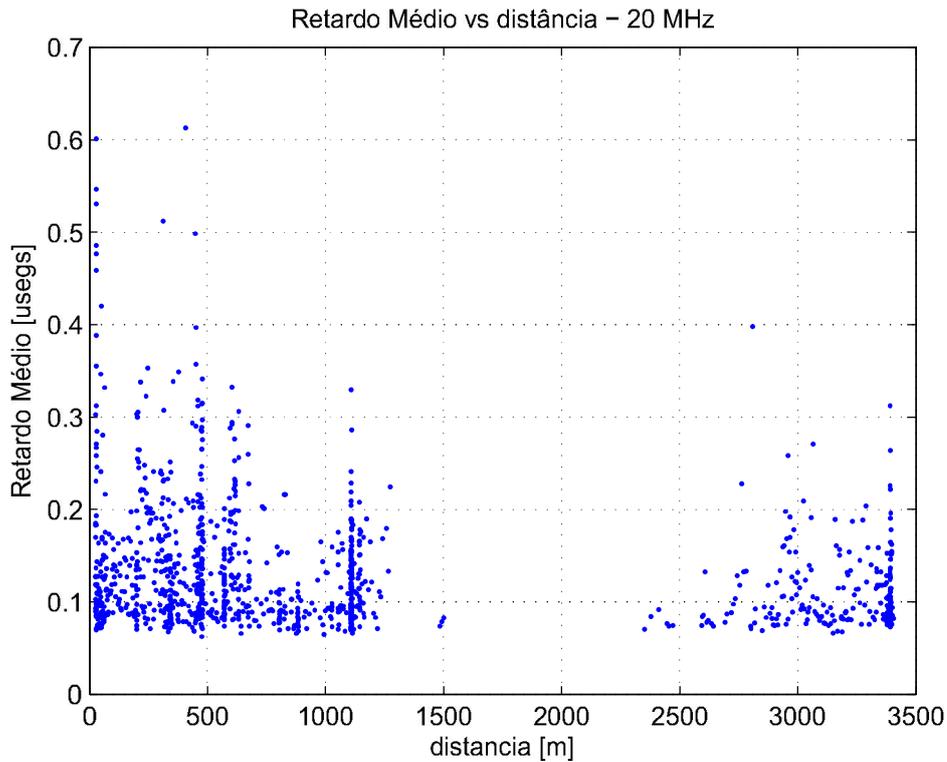


Figura 6.23: Retardo médio em função da distância.

Como podemos observar nas Figuras 6.22 e 6.23, há um comportamento variado do valor médio e do valor retardo RMS ao longo das distâncias de medição. O valor decresce para distâncias até 700 metros. Este comportamento pode ser atribuído à contribuição dos lóbulos secundários da antena. Entre 700 e 1.500 metros o valor passa a aumentar. Finalmente, para distâncias acima de 2 km, do outro lado da lagoa, a tendência também é de aumento. Observou-se ainda que estas tendências são devidas às componentes medidas em situações LOS. As componentes NLOS mostram grande espalhamento, não sendo possível uma caracterização da dependência com a distância.

A partir desta primeira avaliação, o comportamento do espalhamento de retardos com a distância, em situações LOS foi empiricamente ajustado em cada uma das três regiões. O ajuste foi utilizando valores com distâncias de separação de 50 metros. Este espaçamento permite obter um conjunto representativo de valores para obtenção dos modelos empíricos.

Para o caso dos valores médios de retardo RMS, os ajustes obtidos são mostrados nas Figuras 6.24 a 6.29.

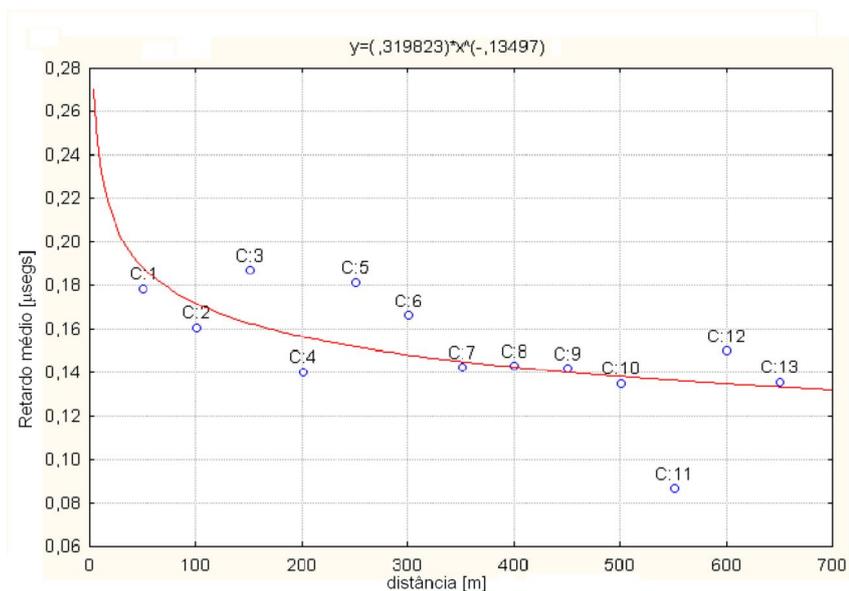


Figura 6.24: Modelo para valor médio do retardo RMS em função da distância (0 a 700 metros) LOS.

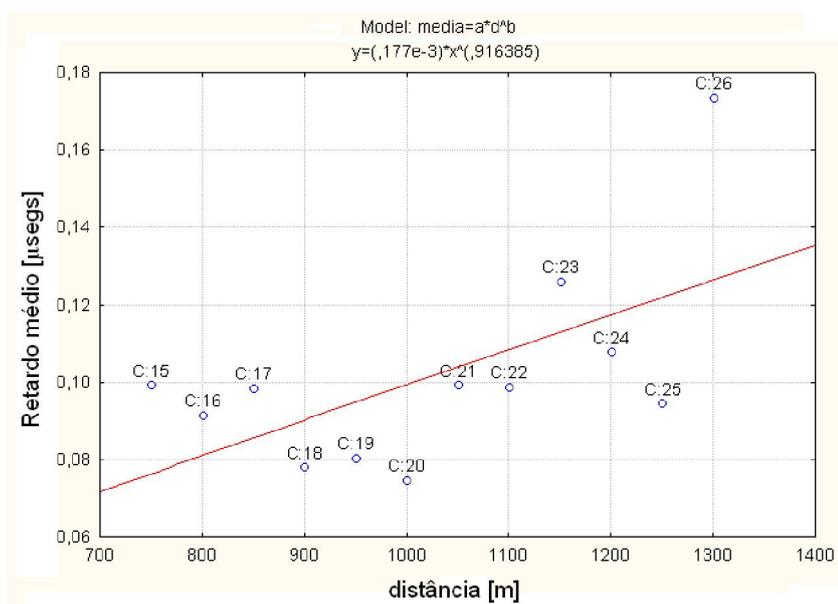


Figura 6.25: Modelo para valor médio do retardo RMS em função da distância (700 a 1.500 metros) LOS.

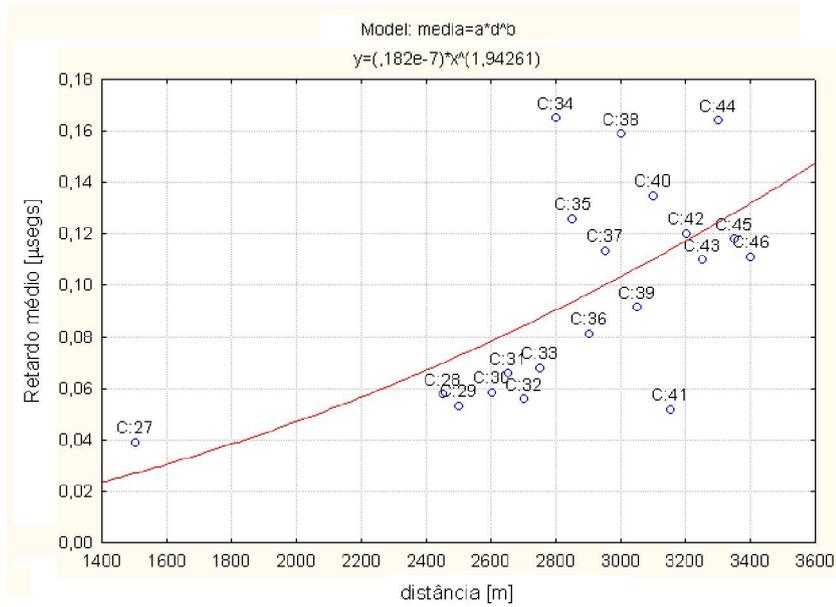


Figura 6.26: Modelo para valor médio do retardo RMS em função da distância (maior a 1500 metros) LOS.

Para o caso do desvio padrão do retardo RMS, os ajustes obtidos são mostrados nas figuras seguintes:

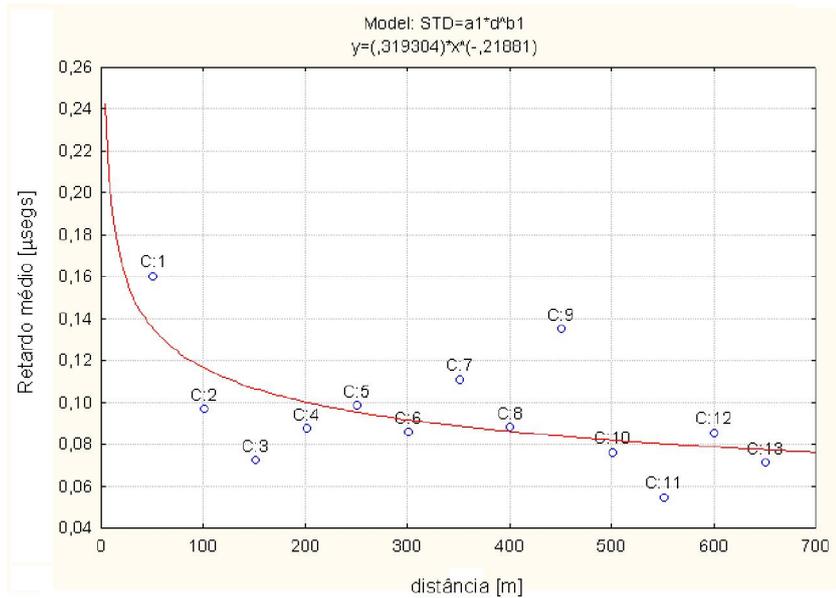


Figura 6.27: Modelo para desvio padrão do retardo RMS em função da distância (0 a 700 metros) LOS.

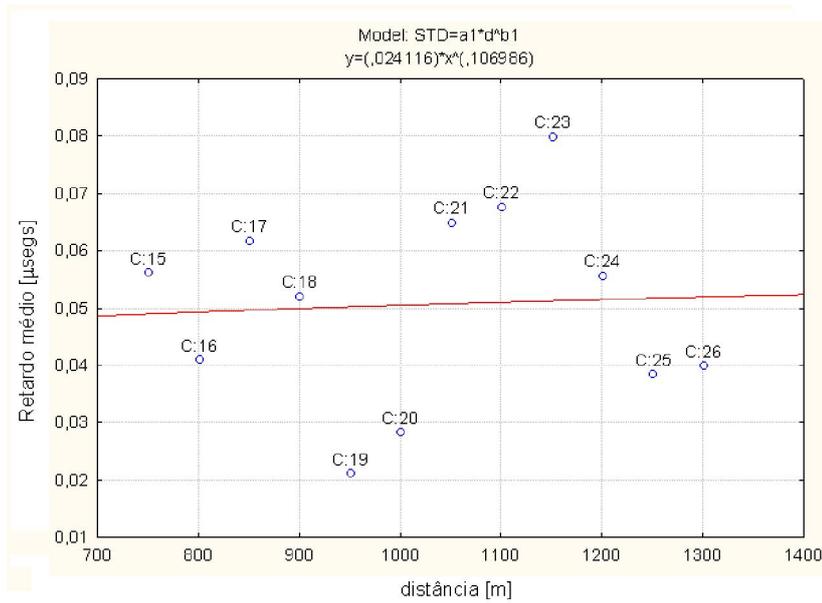


Figura 6.28: Modelo para desvio padrão do retardo RMS em função da distância (700 a 1.500 metros) LOS.

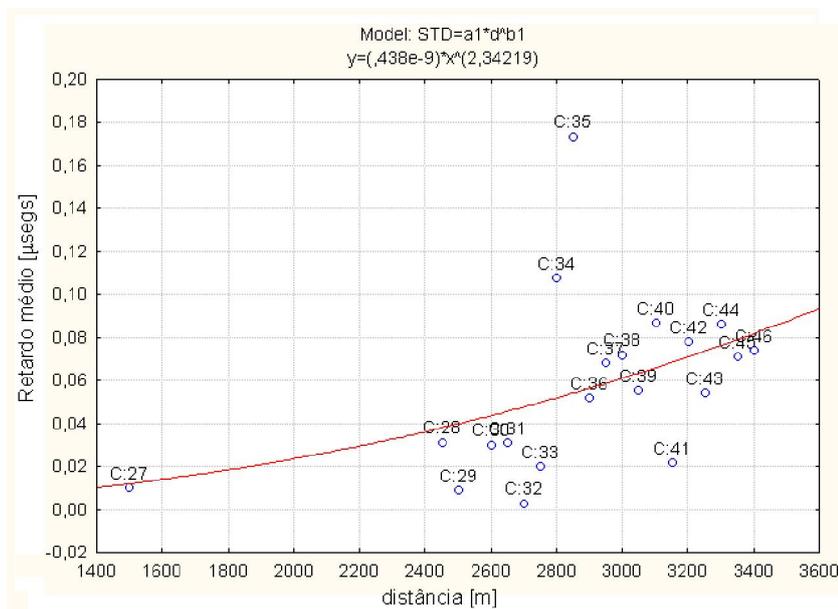


Figura 6.29: Modelo para desvio padrão do retardo RMS em função da distância (maior a 1.500 metros) LOS.

As expressões que correspondem aos ajustes mostrados nas Figuras 6.24 a 6.29 são as seguintes:

Para distâncias entre 0 e 700 metros:

$$\overline{\tau_{RMS}} = 0,32d^{-0,13} \tag{6-10}$$

$$\sigma_{\tau_{RMS}} = 0,32d^{-0,21} \tag{6-11}$$

Para distâncias entre 700 e 1500 metros:

$$\overline{\tau_{RMS}} = 0,17d^{0,91} \tag{6-12}$$

$$\sigma_{\tau_{RMS}} = 0,02d^{0,11} \tag{6-13}$$

Para distâncias maiores a 1500 metros:

$$\overline{\tau_{RMS}} = 0,18d^{1,94} \tag{6-14}$$

$$\sigma_{\tau_{RMS}} = 0,44d^{2,34} \tag{6-15}$$

Amplitudes dos retardos

Para caracterizar as amplitudes dos retardos foram obtidas as potências médias associadas a cada valor de retardo para toda a região de medição. Tanto no caso LOS como no caso NLOS foi possível um ajuste destas amplitudes por uma função logarítmica do retardo. Os ajustes são mostrados nas Figuras 6.30 a 6.32.

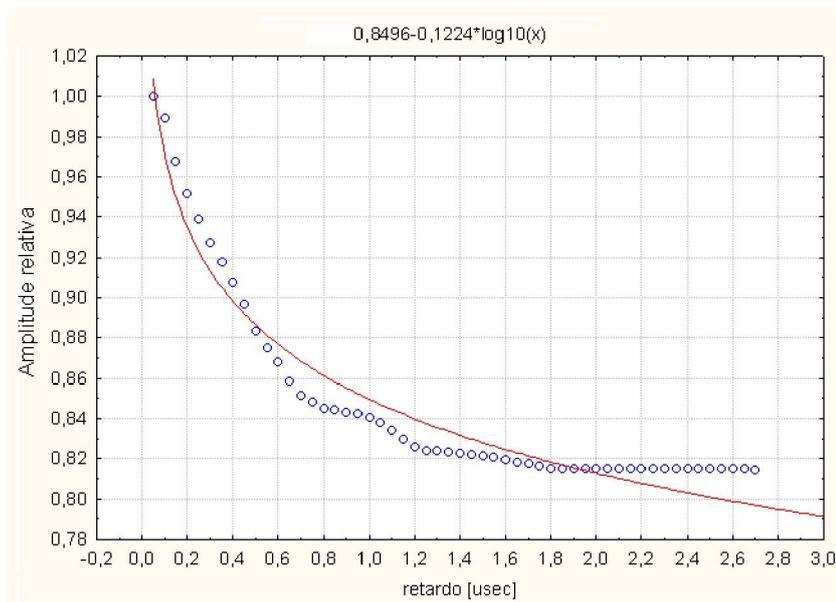


Figura 6.30: Perfil de retardos 20 MHz - LOS.

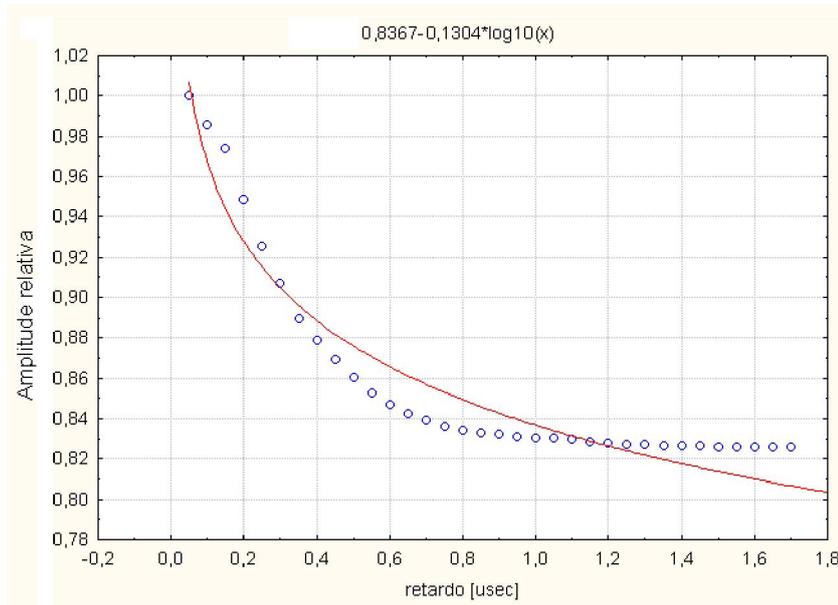


Figura 6.31: Perfil de retardos 20 MHz - NLOS.

Considerando todo o conjunto de medições, tanto em situações LOS como NLOS, a densidade de probabilidades foi também ajustada por uma função logarítmica do retardo.

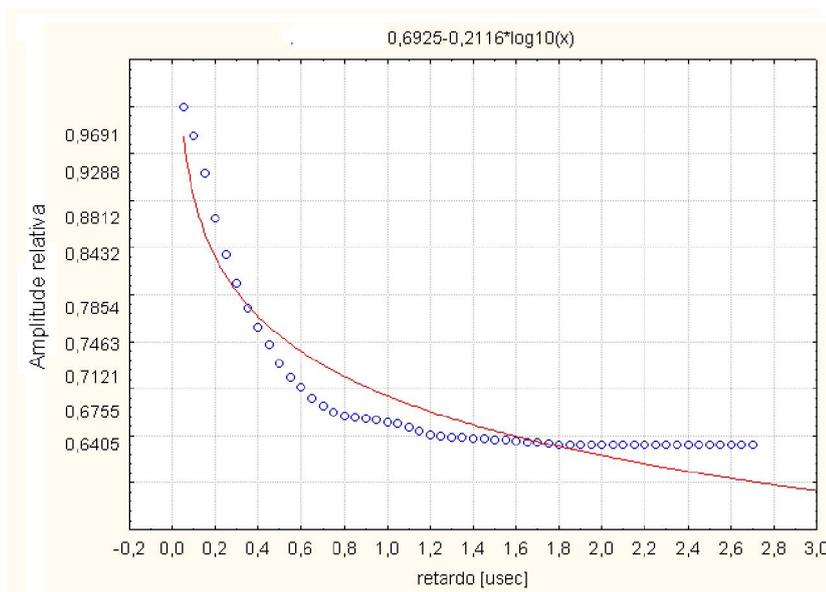


Figura 6.32: Perfil de retardos 20 MHz Situações LOS e NLOS.

Esta função, obtida com largura de banda de 20 MHz, foi comparada com as obtidas com as larguras de canal de 1,75 MHz, 3,5 MHz e 7 MHz. O objetivo é o de determinar o comportamento do perfil de retardos, de forma a permitir o escalonamento dos parâmetros que caracterizam o canal para alta resolução a partir de medições de mais baixa resolução. As funções obtidas para cada largura de canal são apresentadas a seguir, com os respectivos ajustes:

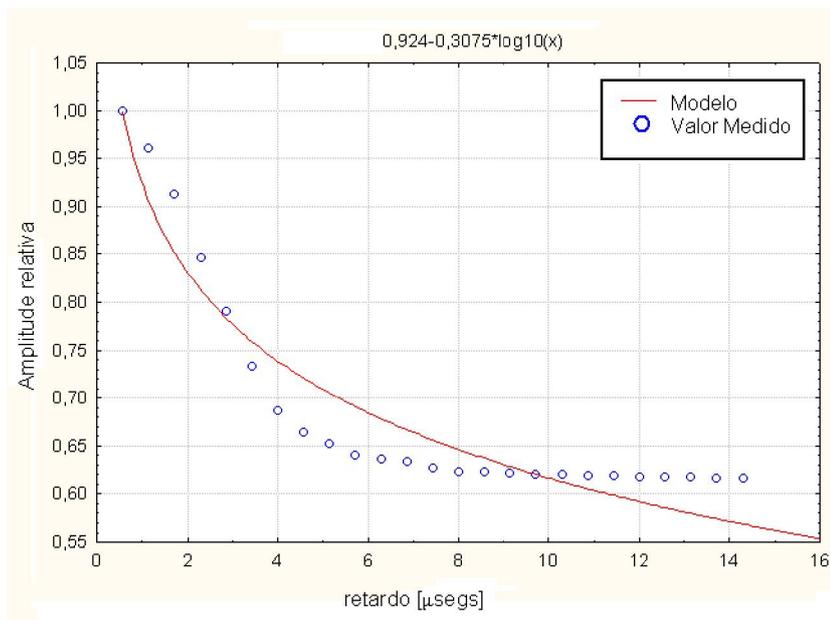


Figura 6.33: Perfil de retardos 1,75 MHz Situações LOS e NLOS.

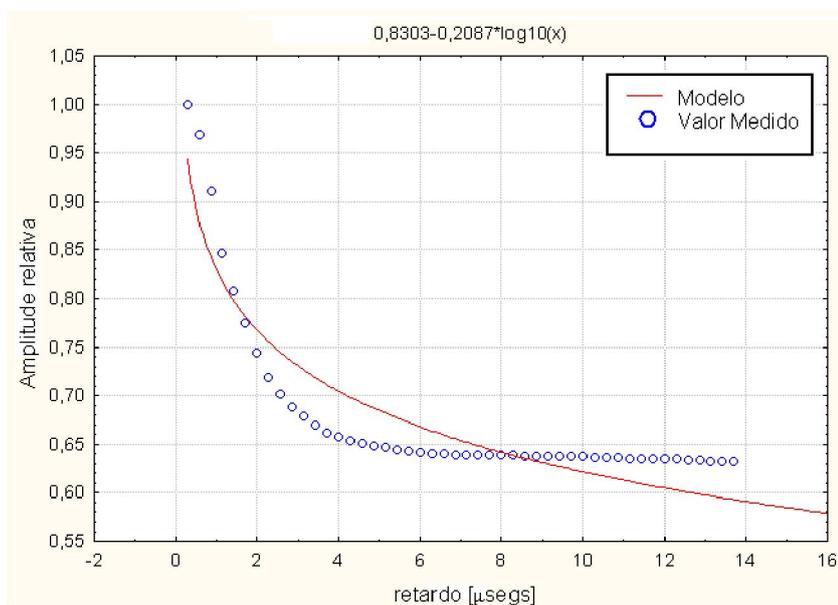


Figura 6.34: Perfil de retardos 3,5 MHz Situações LOS e NLOS.

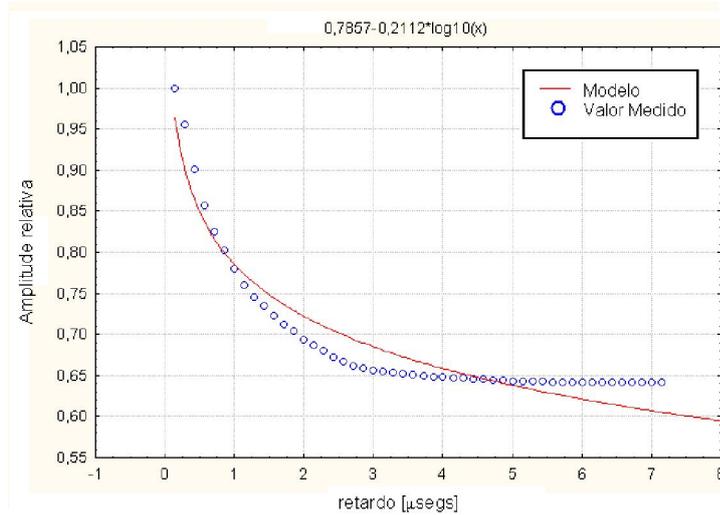


Figura 6.35: Perfil de retardos 7 MHz Situações LOS e NLOS.

Como podemos observar nas expressões de ajuste, o coeficiente multiplicativo do logaritmo é da mesma ordem de grandeza em todos os casos, com um maior de desvio apenas no caso das medições na banda de 1,75 MHz. Fixando este coeficiente em 0,21, foram obtidos os valores de *off-set* para cada largura de banda. O ajuste do *off-set* é mostrado na Figura 6.36.

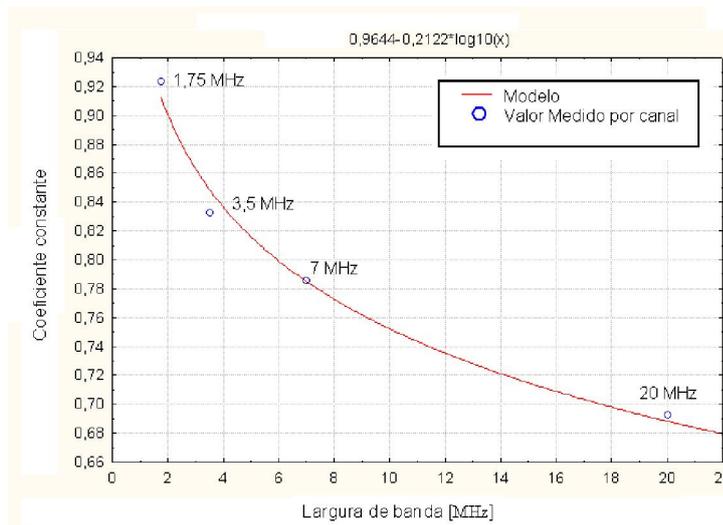


Figura 6.36: Modelo de coeficiente constante em função da largura de canal.

Finalmente o modelo resultante para as amplitudes do perfil de retardos é dado pela seguinte expressão:

$$Pot_{rel} = 0,9644 - 0,21122 \log_{10}(B) - 0,21 \log(\tau) \quad (6-16)$$

onde,

B é a largura do canal em MHz e

τ é o retardo em μ secs.