

5

Modelo para previsão de cobertura em regiões urbanas na faixa de TV Digital

Neste capítulo são descritas as medidas realizadas em São Paulo pelo Instituto Presbiteriano Mackenzie, os testes do modelo de Okumura-Hata e de sua combinação com efeitos de difração simples e difração múltipla e o ajuste de seus coeficientes para a obtenção de um modelo de previsão otimizado localmente para a cidade de São Paulo.

5.1.

Banco de dados de medidas disponível

Foi utilizado neste trabalho o banco de medidas realizadas na região da Grande São Paulo pelo Instituto Presbiteriano Mackenzie, numa parceria ABERT/SET/Mackenzie. Os resultados finais foram publicados no *website* da ANATEL [15] e são de domínio público.

O banco de dados consiste na catalogação de 595 medidas pontuais realizadas na cidade de São Paulo, com suas localizações e resultados obtidos, bem com observações sobre as áreas e condições de medida (obstáculos, condições do tempo, visada, apontamento da antena, distância do transmissor, patamar de ruído, horário da medição, etc).

Para a realização das medidas foi utilizado um transmissor digital no canal 34 com potência média de 5 kW, operando com 2.5 kW, com possibilidade, através de chaveamento, de operar com moduladores dos três sistemas.

A estação transmissora foi instalada na Torre da TV Cultura canal 2, localizada no Sumaré – SP com cota de 816 m. Utilizou-se um sistema diretivo, através de uma antena “Slot”, que apresenta o zero grau do diagrama de irradiação voltado para 117° Nv. Foram realizadas medidas nos pontos de interseção entre círculos de 3 a 40 km, com radiais de abertura de 15 em 15 graus nos 220 graus de abertura do diagrama de irradiação da antena. Em cada radial, o passo foi de 3 km, para $d \leq 15$ km, de 5 km para $15 < d \leq 30$ km e de 10 km para $30 < d \leq 40$ km.

As medidas foram realizadas utilizando-se um veículo especialmente equipado. A antena do veículo de teste foi orientada conforme o melhor nível de sinal e menor degradação por multipercurso. O atenuador existente no veículo é ajustado para que o nível de potência na entrada do receptor seja -30 dBm (média para os receptores DVB-T, ATSC e ISDB-T). Note-se que, se não for conseguido o valor de -30 dBm na entrada do receptor, poderão ser usados valores menores, porém nunca inferiores a -50 dBm, para minimizar as influências da figura de ruído do sistema de amplificação e atenuação bem como dos receptores [7].

A seguir, registra-se o campo elétrico existente na posição da antena através de sua medida indireta na entrada do receptor. Injeta-se “ruído branco” até que a imagem atinja o LOP (limite de perceptibilidade). Anota-se a “quantidade de ruído injetada” em dB: ela será a “margem de erro relativa”.

Foram medidas e calculadas todas as perdas e ganhos que estavam no caminho do sinal de RF (antena, cabos, atenuadores, filtros, etc.) e levantadas nessas medidas a Intensidade de campo recebido em dB μ V/m, a relação C/N recebido em dB, C/N no limiar e a margem de recepção do ponto em dB [14,15].

Estes pontos foram levantados para a cobertura digital e analógica, sendo que em nosso estudo utilizamos apenas a cobertura digital.

5.2. Software de previsão de cobertura

Para teste dos modelos de previsão da perda de propagação foi utilizado o software NetDimension Planning versão 2.0, desenvolvido com a participação do CETUC, que permite calcular coberturas de sistemas celulares e ponto-multiponto utilizando os modelos de propagação já consagrados (Okumura-Hata, COST 231, espaço livre, difração) ou um modelo com parâmetros ajustados pelo usuário. Para tanto o NetDimension trabalha com bases topográficas digitais de alta resolução. No nosso caso foi utilizada uma base de dados topográfica de 20 metros de resolução da região da Grande São Paulo. A base de dados topográficos com os pontos de medida pode ser visualizada na figura 5.1.

A antena utilizada para os testes foi a slot TTSL-4UQM da Trans-Tel, a mesma utilizada no levantamento das medidas cujos diagramas de radiação horizontal e vertical são mostrados na figura 5.2.

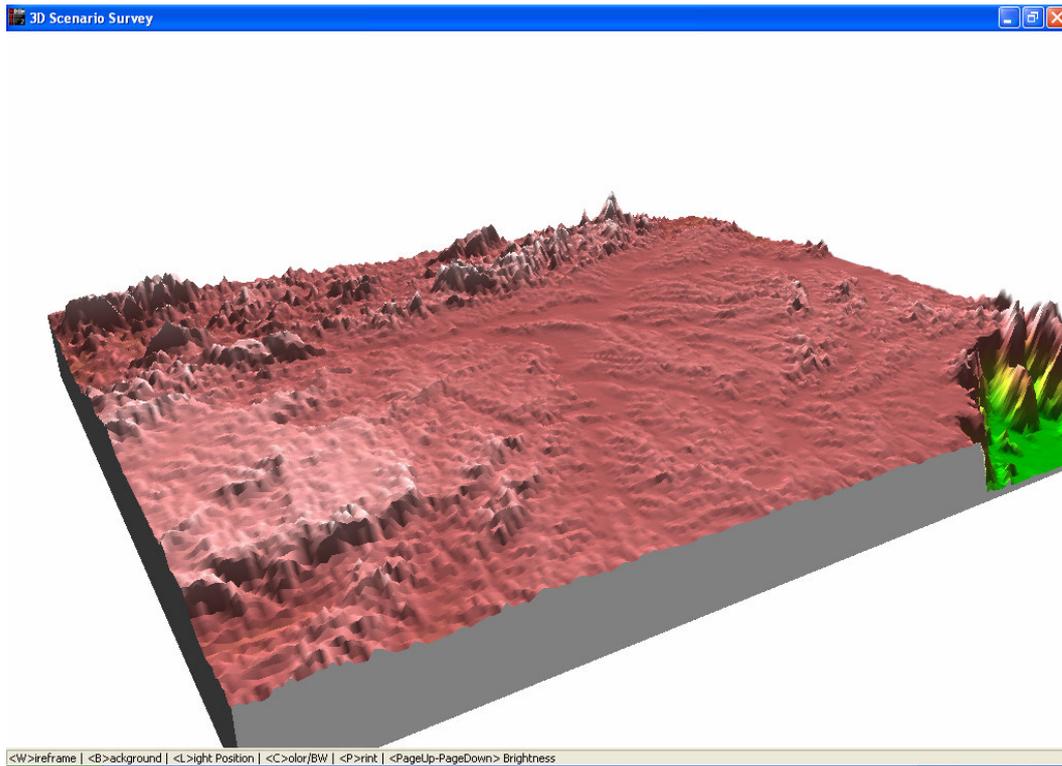


Figura 5.1(a) – Base de dados topográfica (vista 3D)

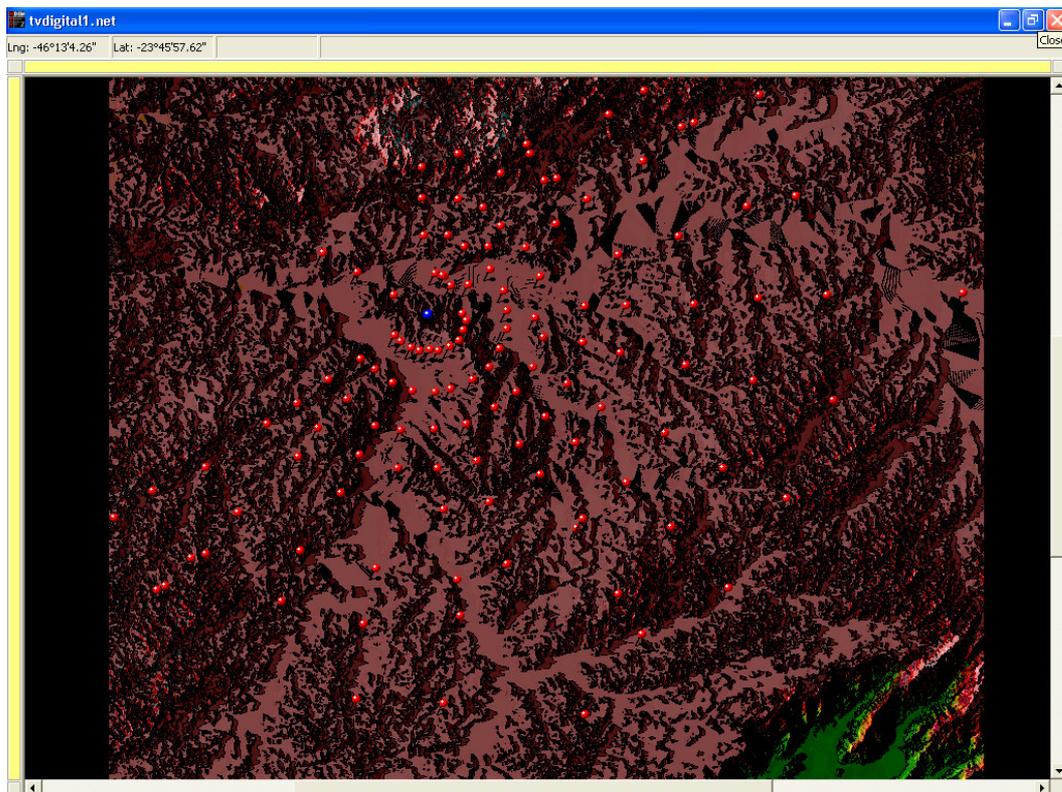


Figura 5.1(b) – Base de dados topográfica (vista 2D) e pontos de medida

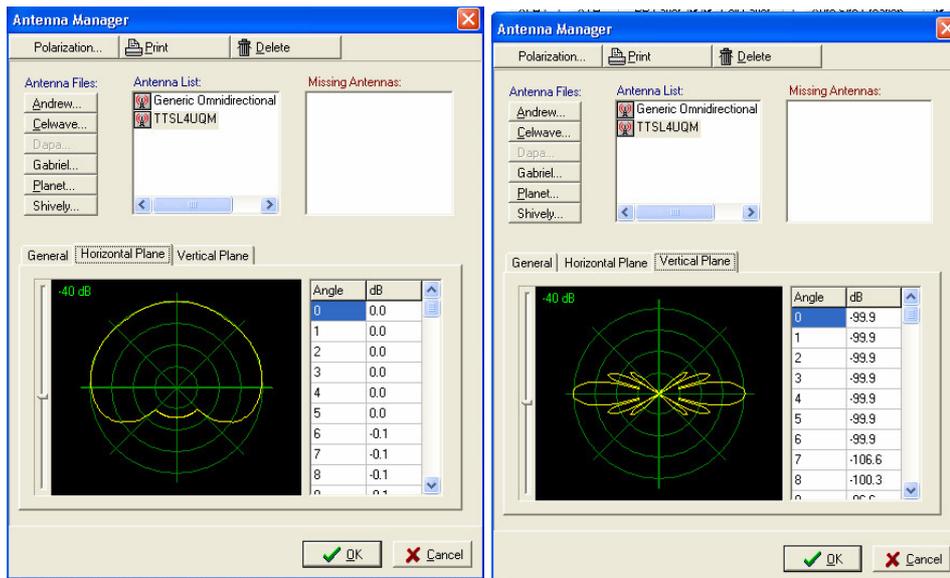


Figura 5.2 – Diagramas horizontal e vertical da antena utilizada

5.3. Testes do modelo de Okumura-Hata

O Netdimension foi configurado para utilizar o método de Okumura – Hata, por ser equivalente ao método recomendado pelo ITU-R para previsão de cobertura em ambientes urbanos na faixa de UHF (ITU-R - P. 1546) para distâncias até 20 Km. Para distâncias superiores a esta a diferença entre os dois métodos é pequena. As configurações utilizadas para a estação transmissora são as mesmas do teste e estão mostradas na figura 5.3.

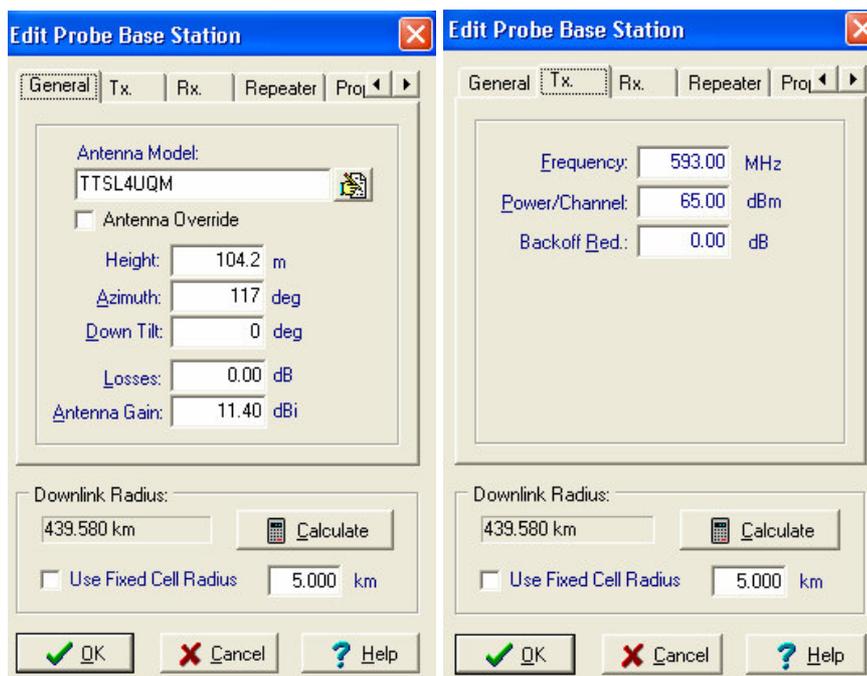


Figura 5.3 – Dados de configuração do transmissor

Inicialmente foi considerado o modelo de Okumura-Hata puro. A seguir foram realizados testes acrescentando ao modelo o efeito de difração por obstáculos, considerando tanto a difração simples pelo obstáculo principal do percurso como a difração por múltiplos obstáculos. Os métodos para cálculo de difração incluídos no NetDimension são os descritos no capítulo 3 deste trabalho.

O programa fornece a intensidade de campo bem como o percentual do erro para a realização das medidas. Para a realização destas análises o programa foi modificado por nossa solicitação para fornecer, adicionalmente, altura efetiva da antena transmissora em relação a cada ponto de recepção, bem como o ganho relativo da antena na direção de cada um destes pontos. Os resultados obtidos são descritos nas seções seguintes.

5.3.1. Okumura – Hata

Um ponto crítico na previsão de cobertura é a definição da altura da antena transmissora. Três enfoques podem ser utilizados, cuja eficiência depende do tipo de terreno em questão. Para terrenos relativamente planos, ainda que urbanizados, pode-se utilizar a altura real da antena sobre o relevo. Já para terrenos acidentados o método fornece melhores resultados quando se utiliza a altura absoluta ou a altura efetiva do transmissor.

A altura absoluta é definida como a diferença entre a altura total da antena transmissora sobre o nível do mar e a altura total da antena receptora na torre sobre o nível do mar.

A altura efetiva é definida como a altura da antena transmissora relativa à altura média de um perfil entre 1 e 15 Km do transmissor na direção do receptor.

Os resultados encontrados nesta primeira simulação são mostrados nas figuras 5.4 a 5.6 que apresenta os níveis de sinal recebido, medido e previsto pelo método de Okumura-Hata, em função da distância numa escala logarítmica. Observa-se que, para cálculos com a altura real e a altura absoluta a previsão é pessimista fornecendo valores de intensidade de campo inferiores aos medidos, enquanto que, quando a altura efetiva é utilizada os resultados passam a ser otimistas.

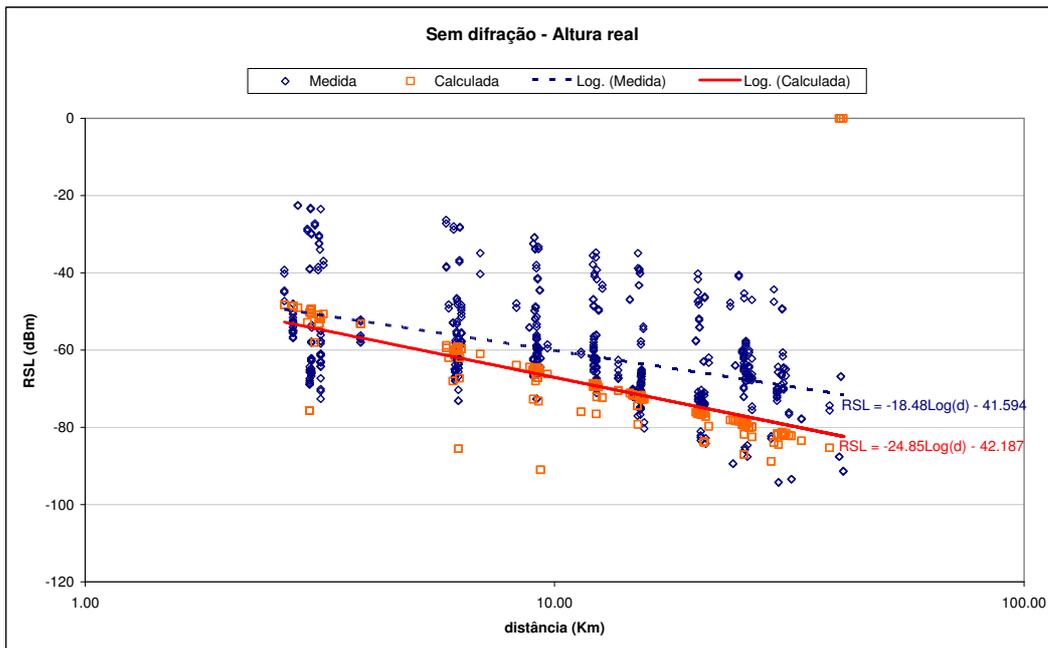


Figura 5.4 – Nível de sinal recebido: método de Okumura-Hata com altura real

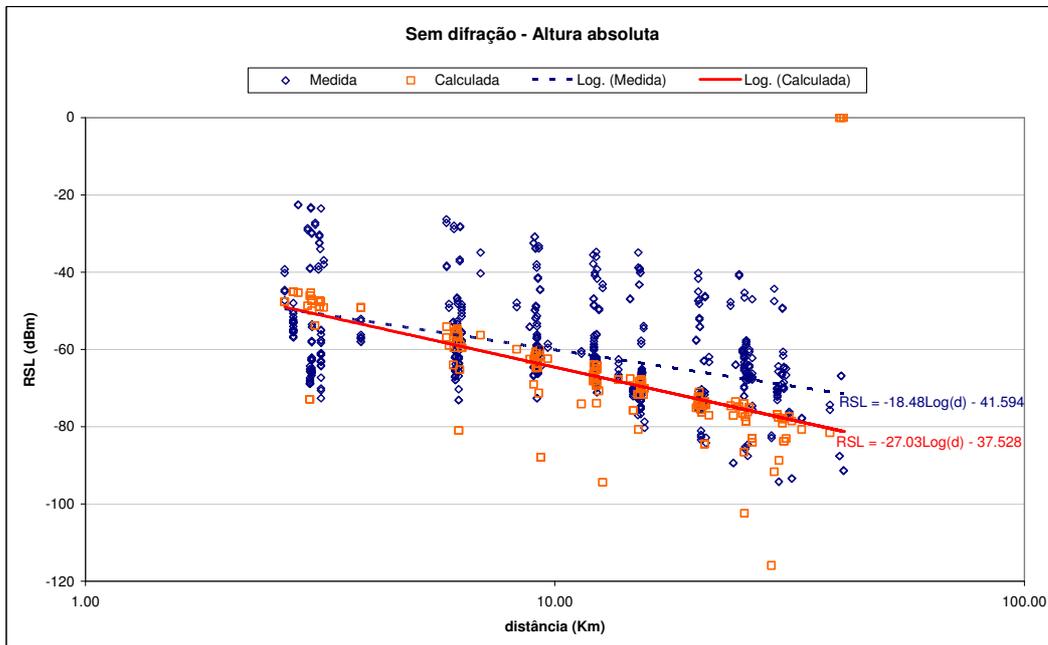


Figura 5.5 – Nível de sinal recebido: método de Okumura-Hata com altura absoluta

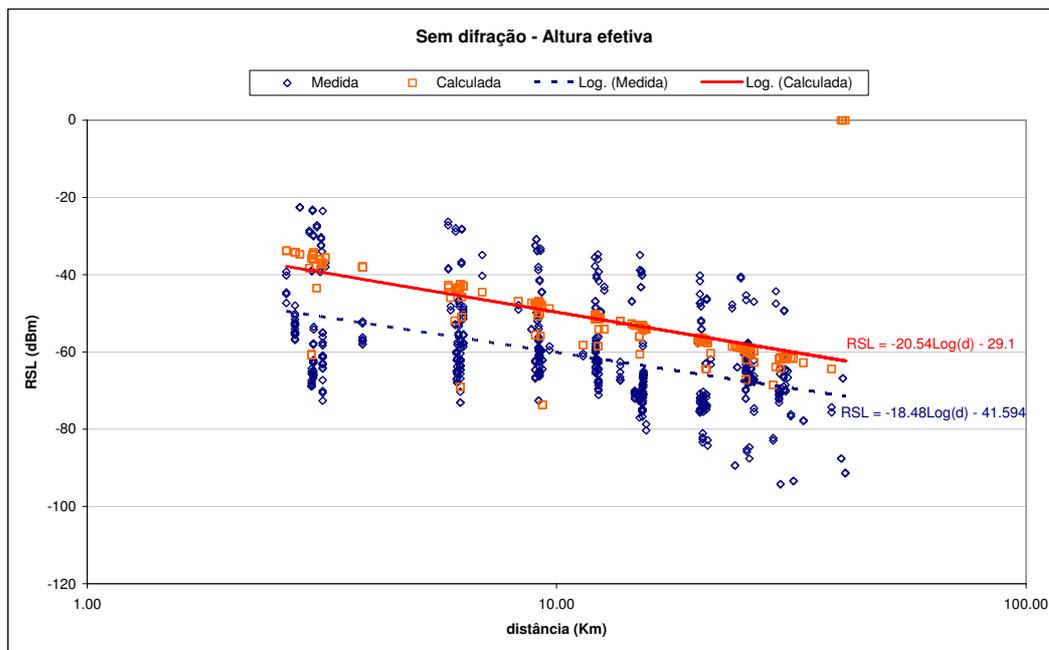


Figura 5.6 – Nível de sinal recebido: método de Okumura-Hata com altura efetiva

5.3.2. Okumura – Hata com Difração Simples

Tanto o método de Okumura-Hata como o da Recomendação P. 1546 fornecem valores medianos da intensidade de campo para uma determinada área de cobertura. Embora um valor mediano de perda por difração esteja incluído nos modelos, pontualmente podem ser observadas grandes variações. O desempenho pontual dos modelos pode ser melhorado incluindo uma fração da atenuação adicional por difração em relação ao ponto considerado. A questão é determinar que fração é adequada e que método de cálculo utilizar.

O segundo conjunto de testes foi realizado considerando o modelo de Okumura-Hata com a atenuação adicional por difração para cada ponto calculada utilizando o modelo de gume de faca para difração simples para o obstáculo principal do percurso.

Os resultados obtidos são mostrados nas figuras 5.7 a 5.9. Novamente observam-se resultados pessimistas para os casos de altura real e absoluta e superestimação para o caso de altura efetiva. As diferenças entre resultados previstos e medidos é, entretanto, menor do que nos casos anteriores.

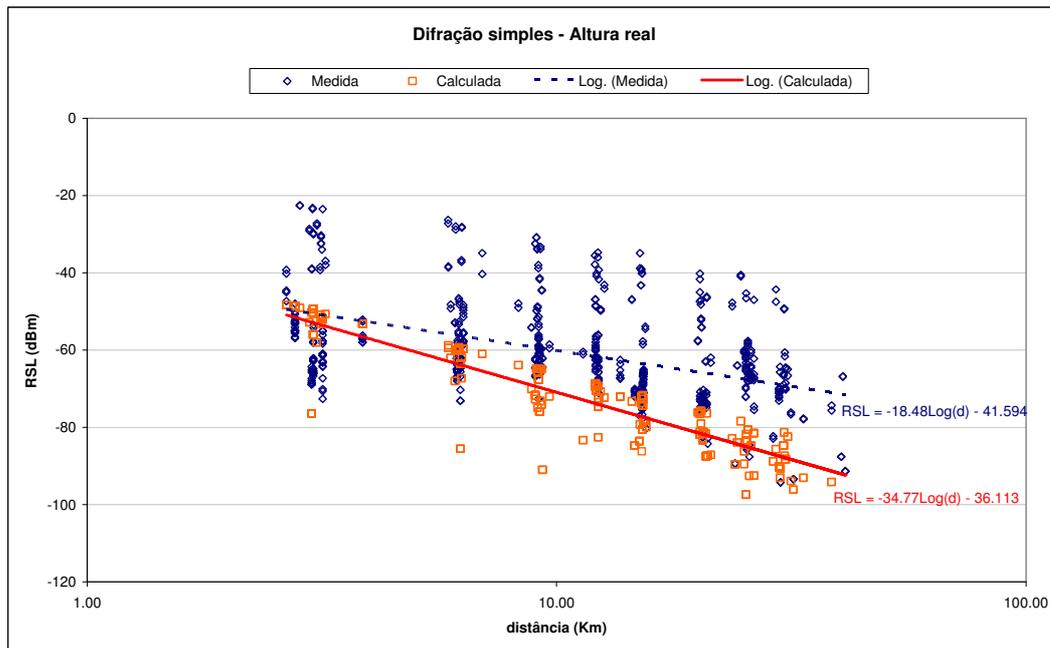


Figura 5.7 – Nível de sinal recebido: Okumura-Hata com altura real e difração simples

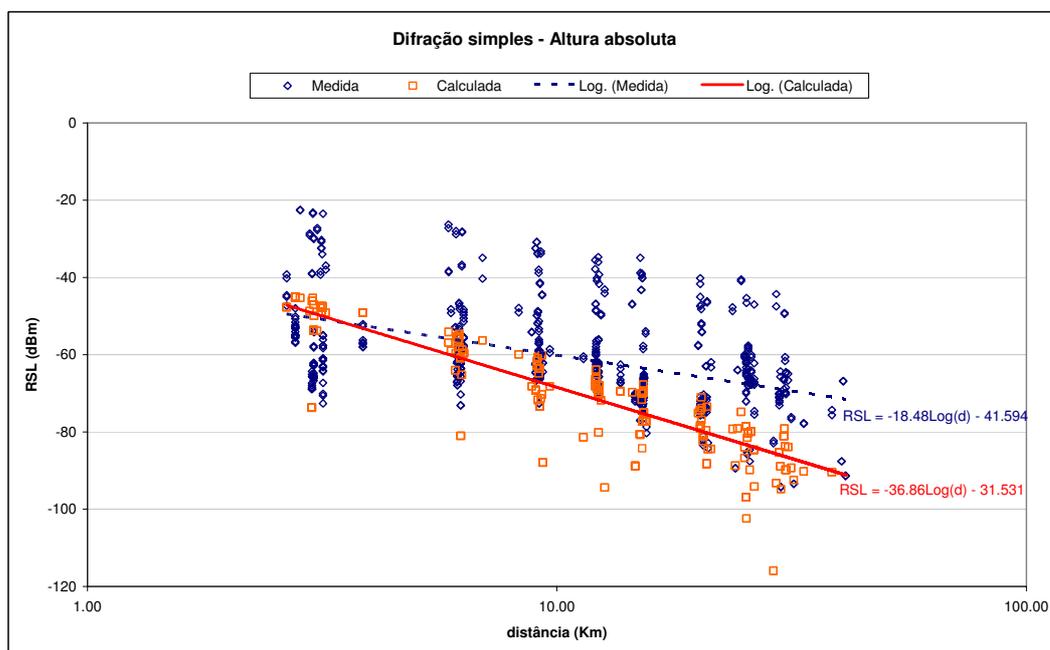


Figura 5.8 – Nível de sinal recebido: Okumura-Hata com altura absoluta e difração simples

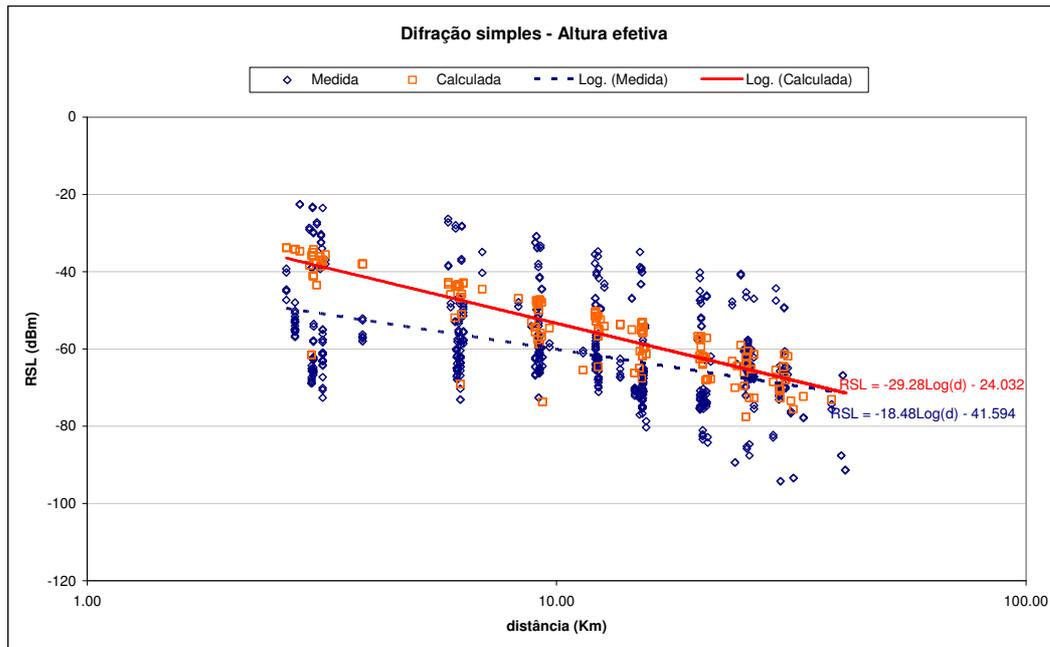


Figura 5.9 – Nível de sinal recebido: Okumura-Hata com altura efetiva e difração simples

5.3.3. Okumura – Hata com Difrações Múltiplas

O terceiro e último conjunto de testes foram realizados considerando o modelo de Okumura-Hata com a atenuação adicional por difração múltipla. Como visto no capítulo 3, o método para cálculo da difração por obstáculos múltiplos utiliza uma construção de Deygout para um obstáculo principal e até dois obstáculos secundários. O obstáculo principal é aquele que provoca a maior obstrução. A partir deste obstáculo são traçadas duas linhas de visada ao transmissor e receptor e determinadas as maiores obstruções ao primeiro elipsóide de Fresnel correspondentes a estas linhas de visada (pseudo-enlaces).

Os resultados obtidos são mostrados nas figuras 5.10 a 5.12. Ainda desta vez observam-se resultados pessimistas para os casos de altura real e absoluta. Já no caso do uso da altura efetiva há uma ligeira subestimação para distâncias mais curtas e uma ligeira superestimação para distâncias mais longas. Este caso apresenta, qualitativamente, os melhores resultados do conjunto de testes realizados.

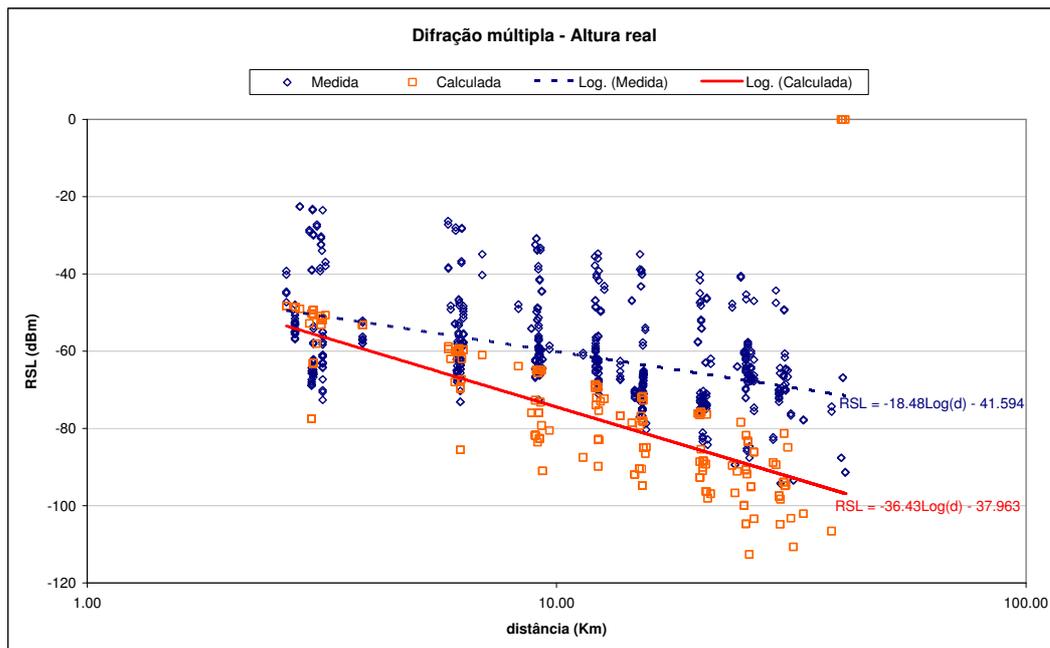


Figura 5.10 – Nível de sinal recebido: Okumura-Hata com altura real e múltiplas difrações

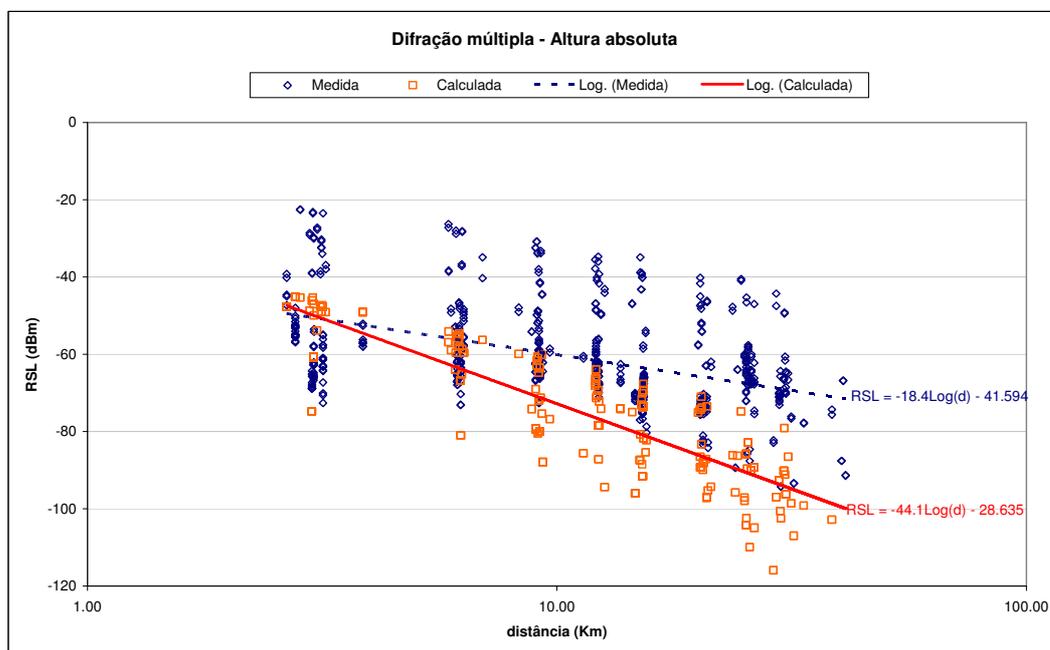


Figura 5.11 – Nível de sinal recebido: Okumura-Hata com altura absoluta e múltiplas difrações

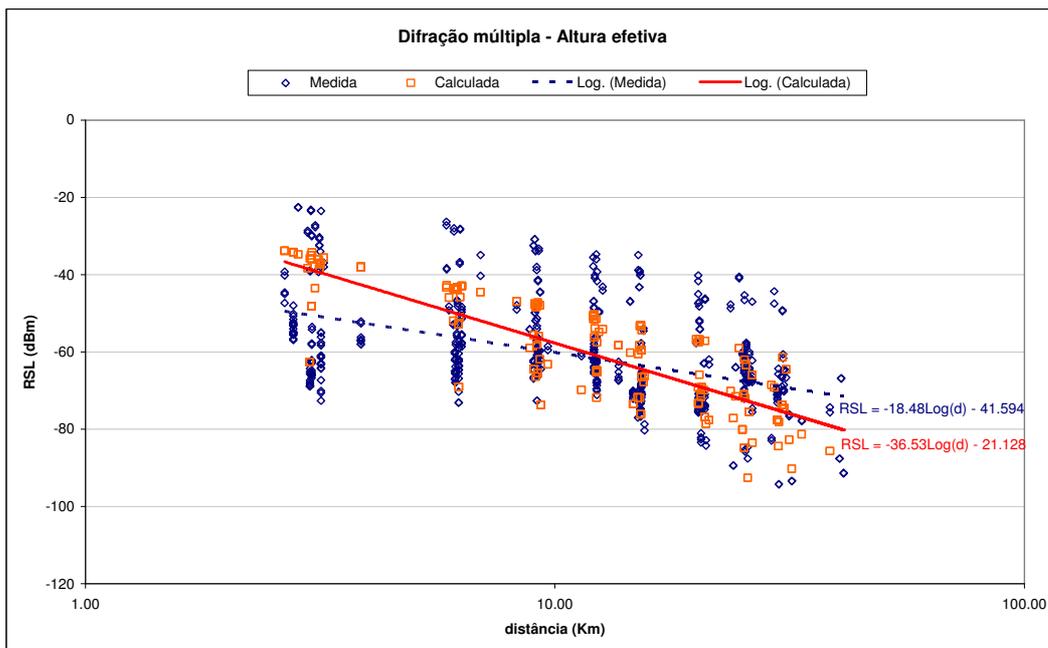


Figura 5.12 – Nível de sinal recebido: Okumura-Hata com altura efetiva e múltiplas difrações

5.4. Comparação dos erros

Com o objetivo de avaliar objetivamente o desempenho dos modelos testados foram calculados, para cada caso, o valor médio do erro relativo, sua variância e o valor médio quadrático. Os resultados são mostrados na tabela abaixo. Os resultados confirmam o melhor desempenho do método com difração por múltiplos obstáculos, embora o método com difração simples apresente variância ligeiramente inferior.

Altura da antena Transmissora	Difração	Valor médio erro (%)	Desvio (%)	RMS (%)
Real	Sem difração	-18.44	30.93	36.01
Absoluta	Sem difração	-14.16	31.32	34.38
Efetiva	Sem difração	12.31	23.48	26.51
Real	Dif. Simples	-23.35	29.98	38.00
Absoluta	Dif. Simples	-19.07	30.47	35.94
Efetiva	Dif. Simples	7.41	22.80	23.97
Real	Múltiplas dif.	-30.17	29.75	42.37
Absoluta	Múltiplas dif	-25.91	30.29	39.86
Efetiva	Múltiplas dif	0.58	23.25	23.26

Tabela 5.1 – Resumo da comparação dos erros

5.5. Ajustes do Modelo

A partir destes resultados, decidiu-se realizar um ajuste dos dados experimentais com um modelo do tipo Okumura-Hata considerando a altura efetiva da antena transmissora e uma componente adicional da difração múltipla. As figuras abaixo indicam que as suposições de uma dependência da perda total de propagação de crescimento linear com o logaritmo da distância e decréscimo linear com o logaritmo da altura efetiva são adequadas.

A expressão geral utilizada no ajuste é do tipo

$$L = a_0 + a_1 \log(F) - a_2 \log(h_{ef}) + (a_3 - a_4 \log(h_{ef})) \log(d) + a_5 ADIF \quad (5.1)$$

Onde:

L – Perda básica em dB

F – Frequência utilizada em MHz

h_{ef} – Altura efetiva em metros

d – distância em Km

A_{SD} – componente relativa à difração simples em dB

A_{MD} – componente relativa à difração múltipla em dB

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 e a_5 – constantes calculadas pelo Statistica.

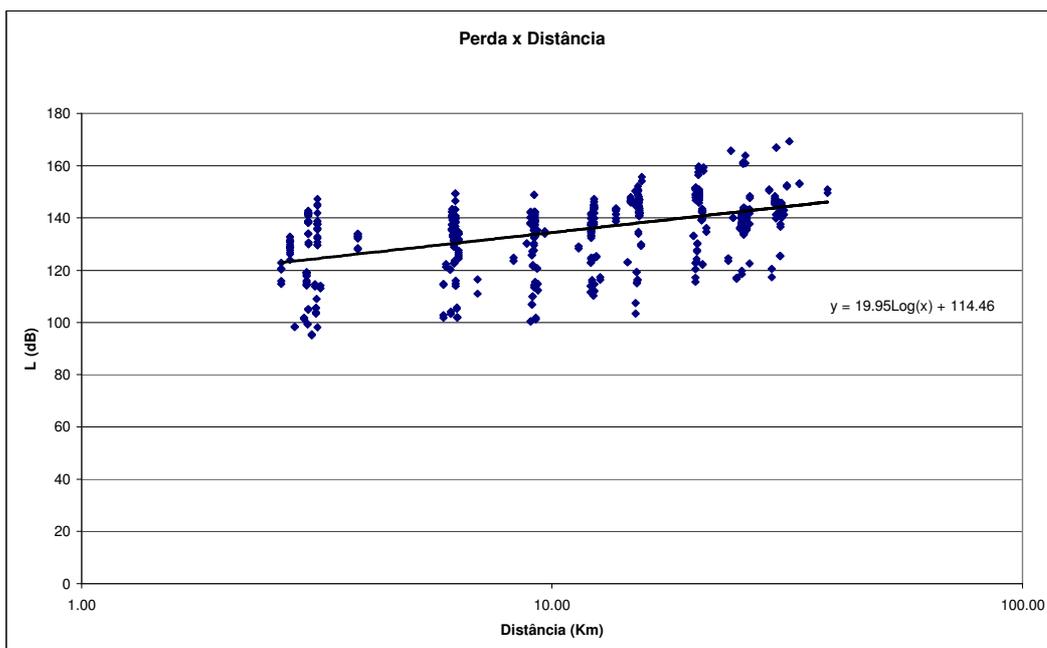


Figura 5.13 – Gráfico da Perda x distância

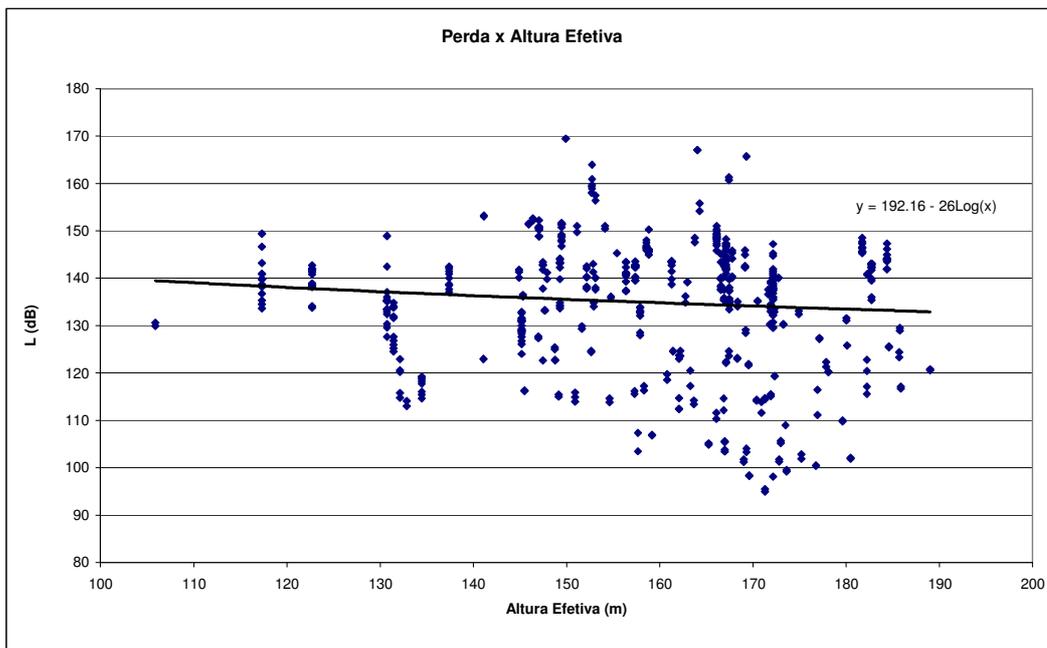


Figura 5.14 – Gráfico da Perda x altura efetiva

O coeficiente do termo relativo à frequência não pode ser obtido no ajuste, já que só se dispõe de dados numa única frequência. Assim será utilizado o coeficiente de Okumura-Hata e, para efeitos do ajuste, o segundo termo da expressão assume um valor constante dado por $26,16 \cdot \log(593 \text{ MHz}) = 72,54$.

O ajuste dos coeficientes foi realizado, para um conjunto de 579 pontos por regressão não linear, utilizando os métodos de deslocamento de padrões de Hooke-Jeeves combinado com o método de Newton, na forma implementada no programa Statistica [www.statsoft.com].

A expressão obtida para a perda de propagação a partir deste ajuste é da forma

$$L = 162,68 + 26,16\log(f) - 54,85\log(h_{ef}) - 14,61\log(d) + 1,5 A_{MD} \quad (5.2)$$

O ajuste forneceu valores nulos para a_4 . O fator de correlação entre valores previstos e medidos foi de 0,65 e o diagrama de espalhamento entre estes valores é mostrado na figura 5.15. A distribuição de erros é mostrada na figura 5.16.

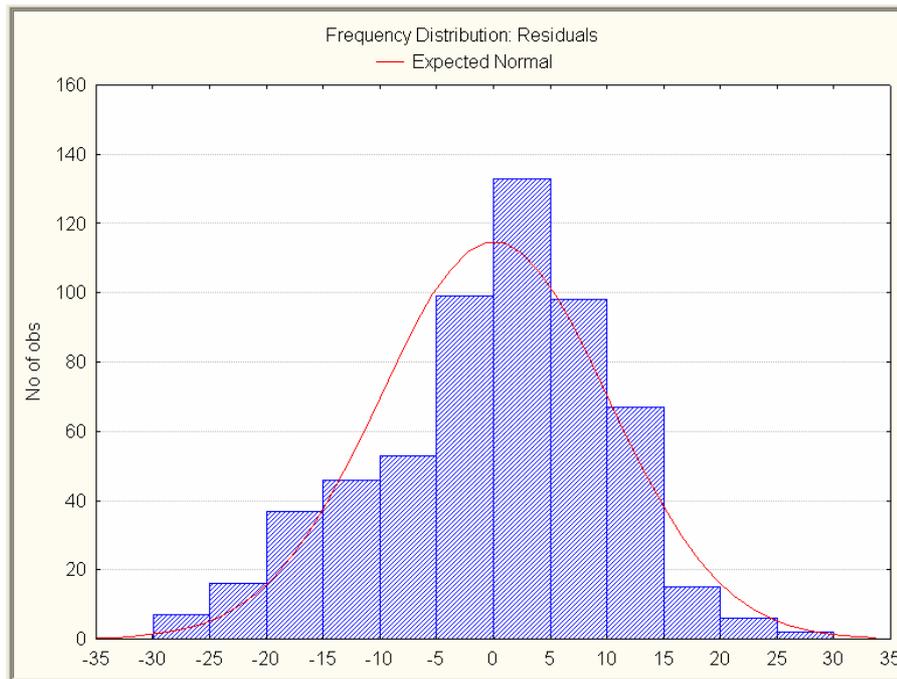


Figura 5.15 – Histograma de erros para o modelo

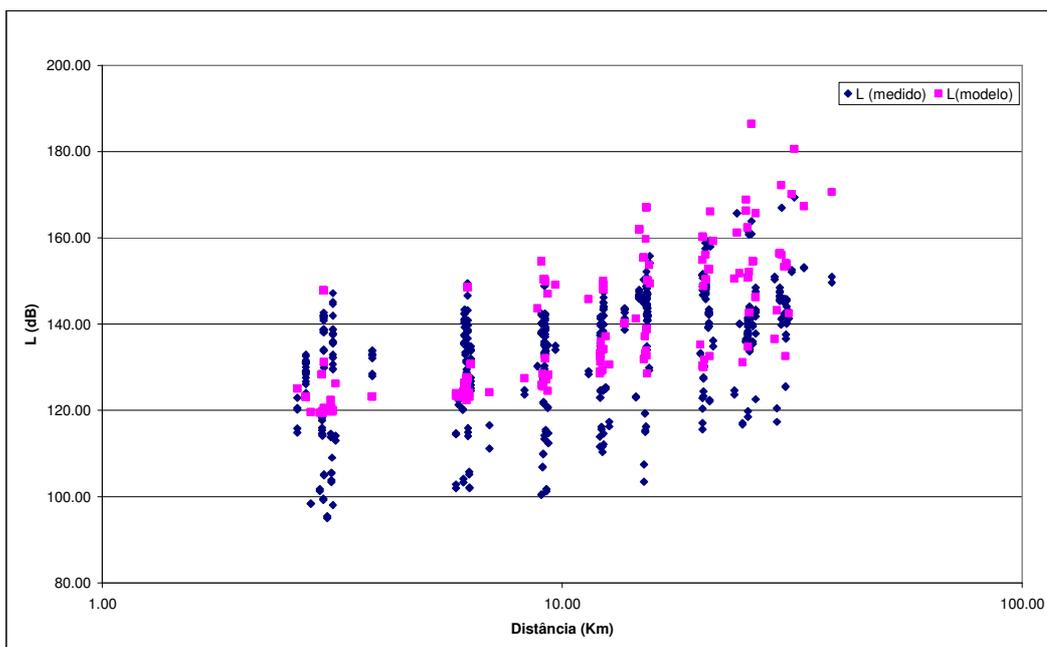


Figura 5.16 – Comparação da perda medida e prevista pelo modelo x distância

O resultado gerado pelo ajuste não foi considerado inteiramente satisfatório, uma vez que era esperada alguma dependência do coeficiente da distância com a altura efetiva da antena. Foram então realizados vários testes para indicar que conjunto de pontos experimentais estava contribuindo para mascarar a importância destes fatores. Foi possível identificar que, devido à grande altura da

antena transmissora, os pontos próximos ao transmissor são os responsáveis por este comportamento. Foi então realizado um novo ajuste, excluindo os pontos a menos de 3 Km do transmissor. A restrição adotada gerou um conjunto de 552 pontos. O comportamento deste novo conjunto de valores com a distância e a altura efetiva da antenna transmissora é mostrada nas figuras 5.17 e 5.18.

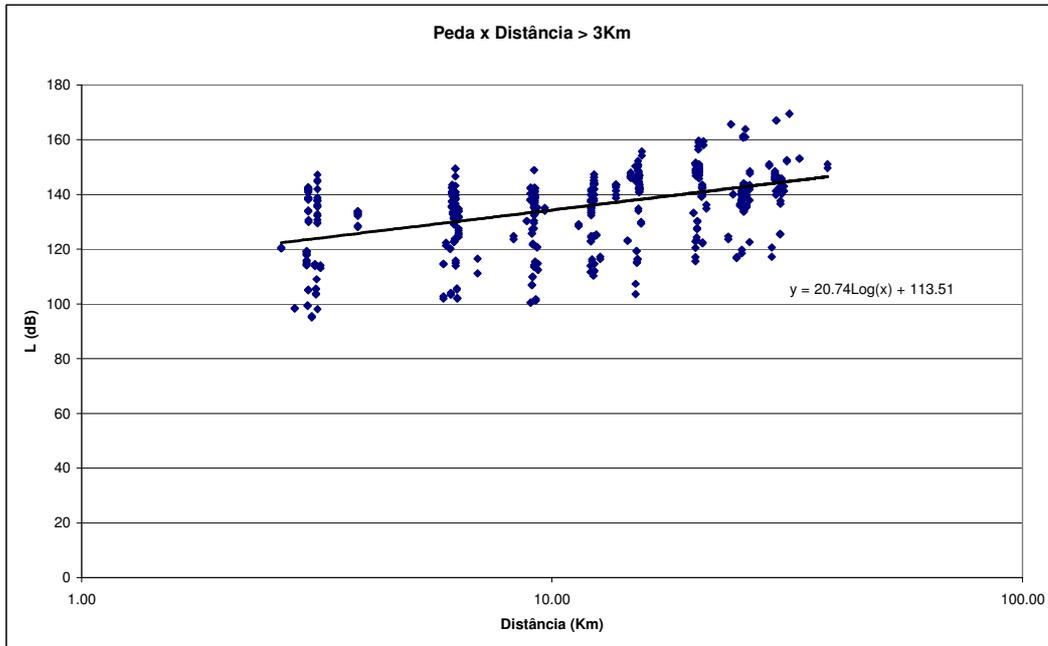


Figura 5.17 – Gráfico da Perda x distância com $d > 3$ Km

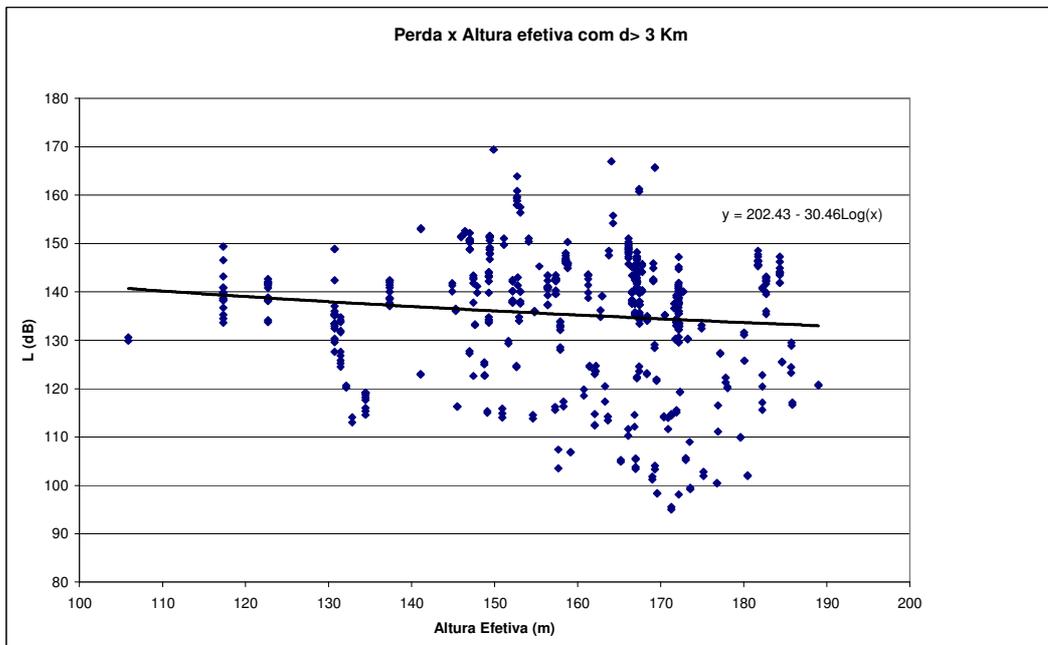


Figura 5.18 – Gráfico da Perda x altura efetiva com $d > 3$ Km

O novo ajuste forneceu uma expressão para a perda na forma:

$$L_{MD} = 100,98 + 26,16 \log(f) - 26,07 \log(h_{ef}) + [48,07 - 16,60 \log(h_{ef})] \log(d) + 0,866 A_{MD} \quad (5.3)$$

O fator de correlação entre valores previstos e medidos foi de 0,67 e o diagrama de espalhamento entre estes valores é mostrado na figura 5.19. A distribuição de erros é mostrada na figura 5.20.

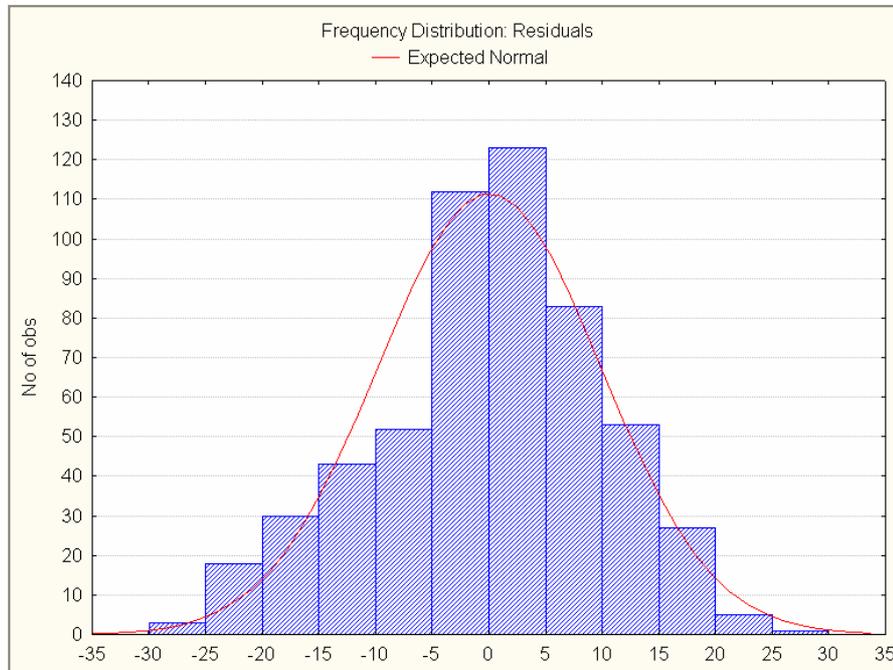


Figura 5.19 – Histograma de erros para o modelo com $d > 3$ km

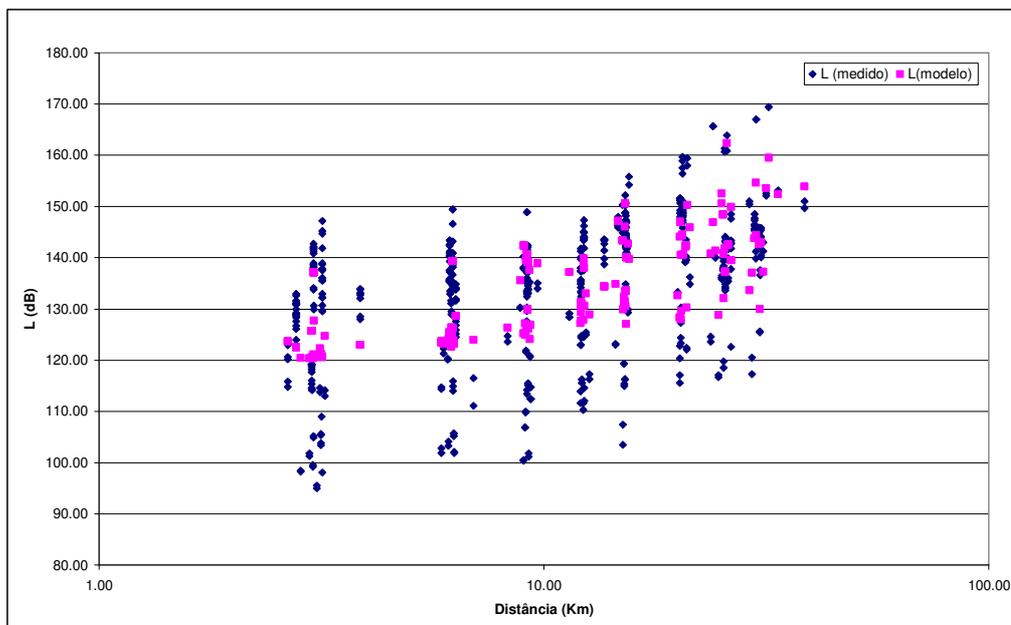


Figura 5.20 – Comparação da perda medida e prevista pelo modelo x distância para $d > 3$ km

Como uma alternativa simplificadora para este modelo foi realizado um ajuste considerando a perda por difração simples, bem mais fácil de calcular. O ajuste forneceu uma expressão da forma:

$$L_{SD}=120,61 + 26,16\log(f) - 35,72 \log (h_{ef}) + [52,80 - 17,37\log(h_{ef})]\log (d) + 1,59A_{SD} \quad (5.4)$$

O fator de correlação entre valores previstos e medidos foi de 0,65 e o diagrama de espalhamento entre estes valores é mostrado na figura 5.21. A distribuição de erros é mostrada na figura 5.22.

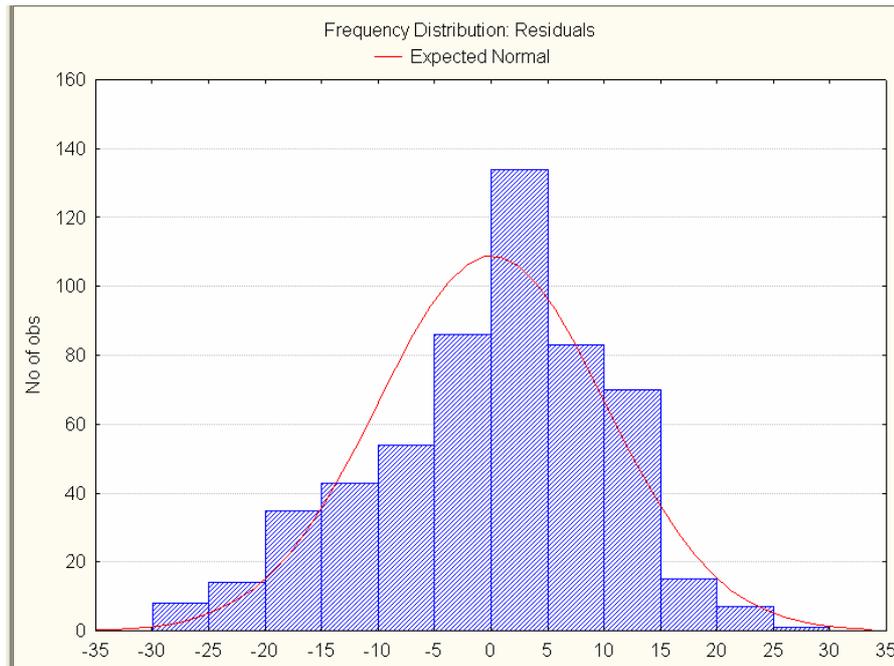


Figura 5.21 – Histograma de erros para o modelo para $d > 3\text{km}$ e difração simples

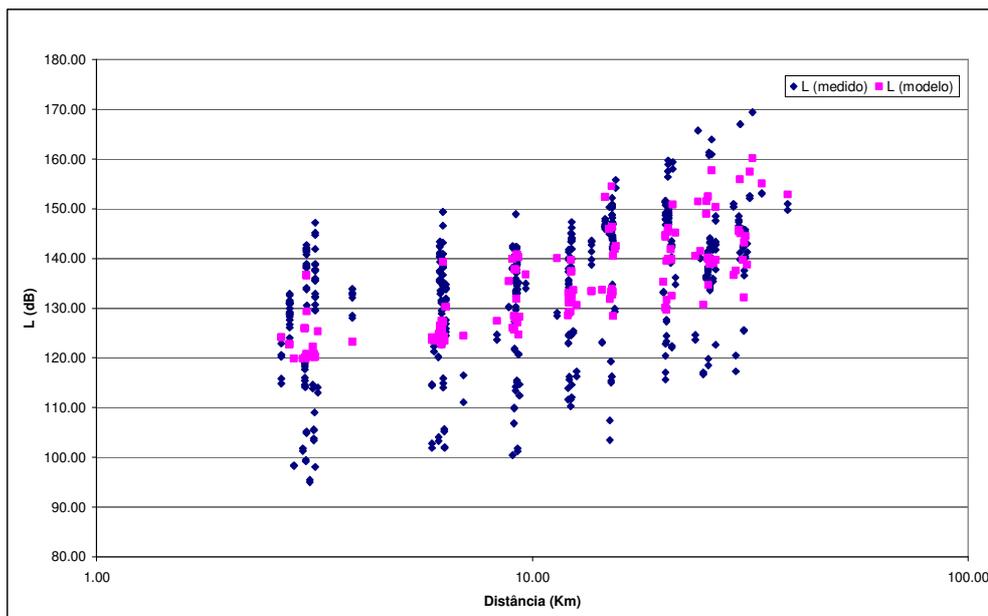


Figura 5.22 – Comparação da perda medida e prevista pelo modelo x distância para $d > 3\text{km}$ e difração simples

Os erros obtidos são mostrados na tabela abaixo.

Modelo	Valor médio (%)	Desvio padrão (%)	RMS (%)
Difração simples	-0,60	8,25	8,27
Múltiplas difrações	-0,57	8,06	8,08

Tabela 5.2 – Resumo da comparação dos erros para o novo modelo

5.6.

Okumura – Hata com mapa de 2 m de resolução

Como exercício suplementar, utilizamos um mapa de resolução maior do que o apresentado. O que utilizamos até então possui uma resolução de 20 m. A fim de ser ter uma maior relevância dos efeitos das construções, realizamos mais uma seqüência de testes utilizando o modelo de Okumura – Hata agora com um mapa de 2m de resolução. Os resultados obtidos são descritos abaixo:

5.6.1.

Okumura – Hata sem difração

Os resultados nesta primeira simulação são realizados levando em consideração a altura efetiva da antena. Como o mapa utilizado possui um raio de cobertura menor, reduzimos em 266 o número de medidas utilizadas.

O resultado encontrado nesta primeira simulação é mostrado na figura 5.23 que apresenta os níveis de sinal recebido, medido e previsto pelo método de Okumura-Hata, em função da distância numa escala logarítmica.

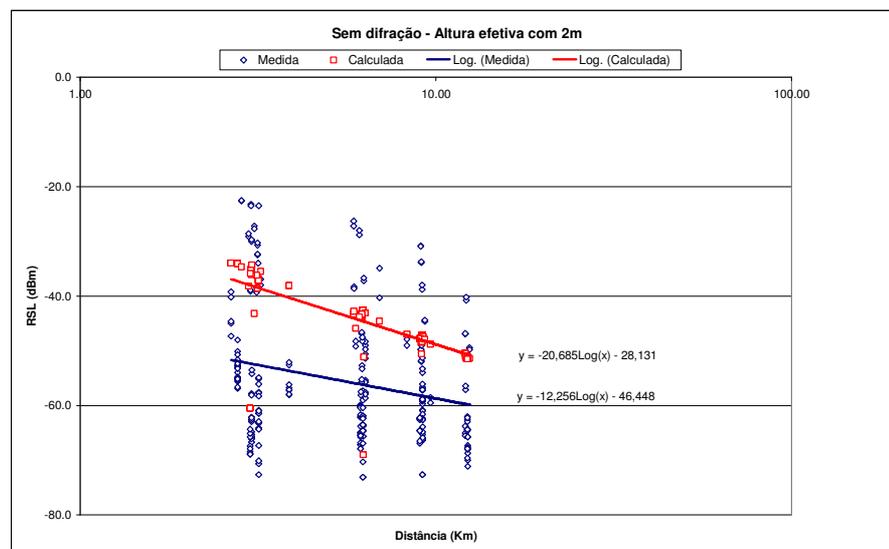


Figura 5.23 – Nível de sinal recebido: Okumura-Hata com altura efetiva (2m)

5.6.2. Okumura – Hata com Difração simples

O segundo teste foi realizado considerando o modelo de Okumura-Hata com a atenuação adicional por difração para cada ponto calculada utilizando o modelo de gume de faca para difração simples para o obstáculo principal do percurso.

O resultado obtido é mostrado na figura 5.24.

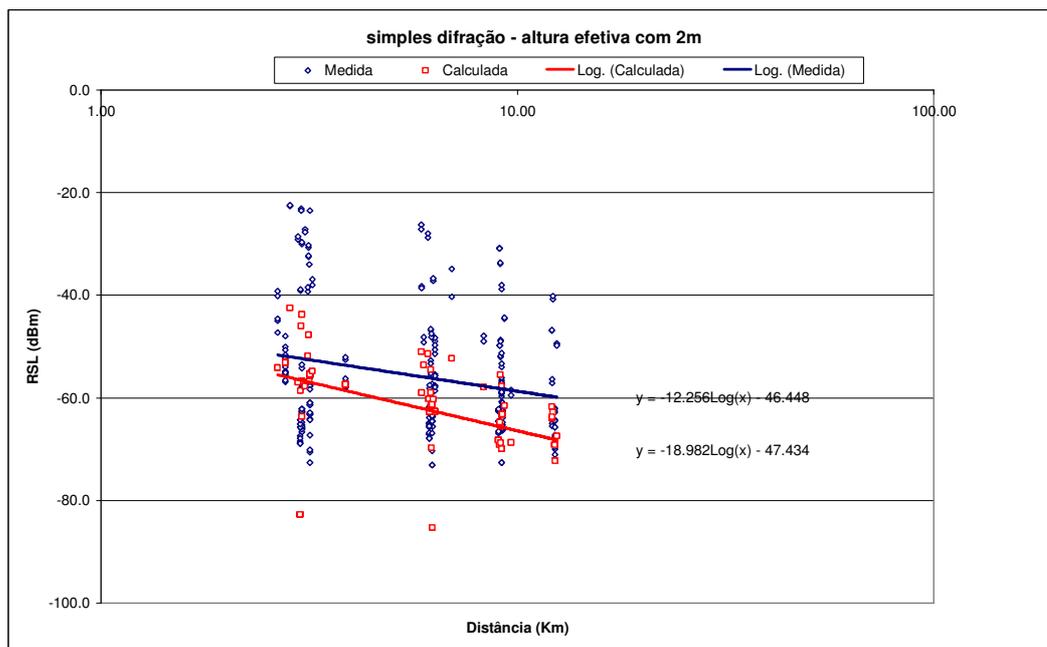


Figura 5.24 – Nível de sinal recebido: Okumura-Hata com altura efetiva e simples difração (2m)

5.6.3. Okumura – Hata com múltiplas difrações

O terceiro e último teste foi realizado considerando o modelo de Okumura-Hata com a atenuação adicional por difração múltipla.

O resultado obtido é mostrado na figura 5.25.

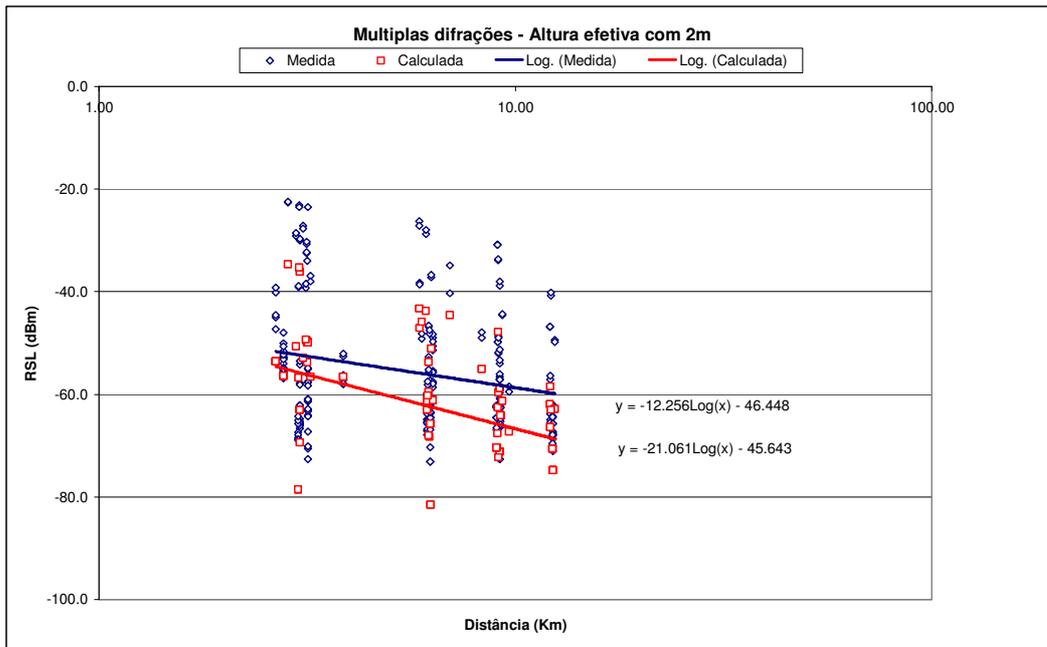


Figura 5.25 – Nível de sinal recebido: Okumura-Hata com altura efetiva e múltiplas difrações (2m)

Observa-se que o melhor resultado apresentado seja o da altura efetiva com múltiplas difrações. O valor médio do erro relativo, sua variância e o valor médio quadrático são apresentados na tabela 5.3.

Altura da antena Transmissora	Difração	Valor médio erro (%)	Desvio (%)	RMS (%)
Efetiva	Sem difração	17.24	24.80	30.21
Efetiva	Dif. Simples	-15.98	28.32	32.52
Efetiva	Múltiplas dif	-14.34	23.51	27.54

Tabela 5.3 – Resumo da comparação dos erros

Utilizando as distâncias maiores que 3 km observamos a seguinte variação da perda com a distância e a altura efetiva com múltiplas difrações:

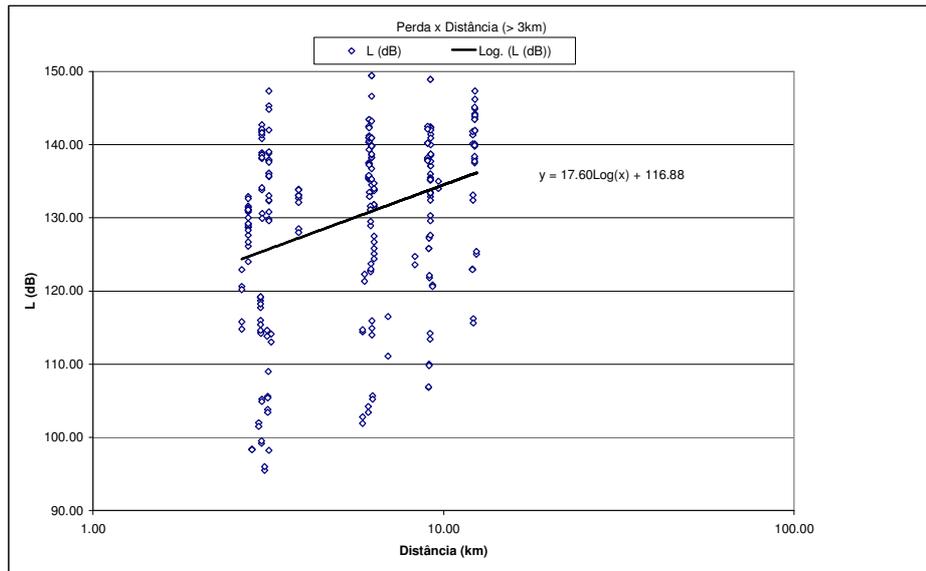


Figura 5.26 – Gráfica da Perda x distância com $d > 3$ Km

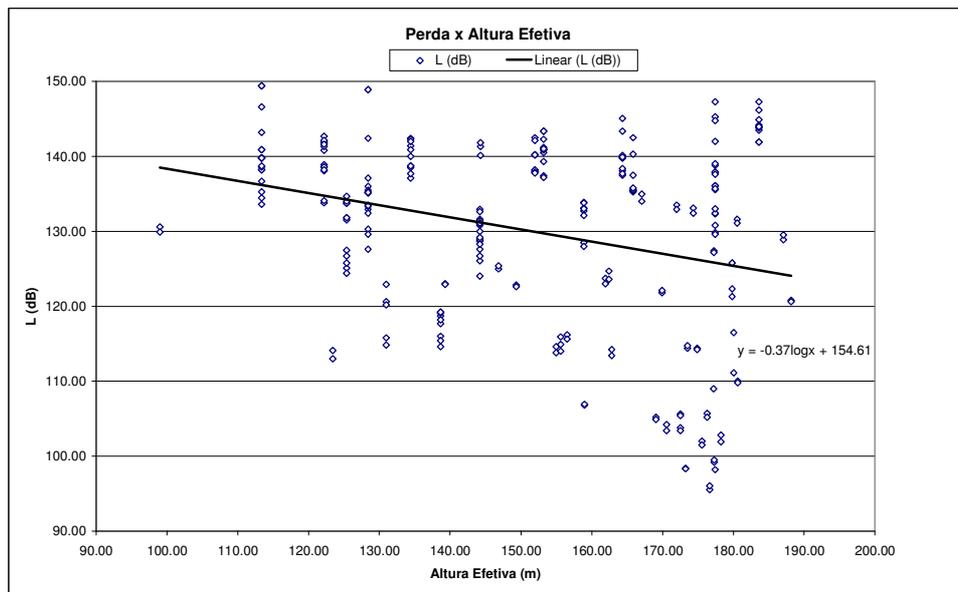


Figura 5.27 – Gráfica da Perda x altura efetiva com $d > 3$ Km

Utilizando o mesmo valor constante para o termo da frequência conforme modelo anterior dado por $26,16 \cdot \log(593 \text{ MHz}) = 72,54$ e, fazendo o ajuste dos coeficientes para um conjunto final de 237 pontos por regressão não linear, utilizando os métodos de deslocamento de padrões de Hooke-Jeeves combinado com o método de Newton, na forma implementada no programa Statistica, obtemos a expressão para a perda de propagação a partir deste ajuste da seguinte forma para múltiplas difrações:

$$L_{MD} = 28,60 + 26,16\log(f) + 14,35\log(d) + 1,05A_{MD} \quad (5.5)$$

O ajuste forneceu valores nulos para a_2 e a_4 . O fator de correlação entre valores previstos e medidos foi de 0,66 e o diagrama de espalhamento entre estes valores é mostrado na figura 5.28. A distribuição de erros é mostrada na figura 5.29.

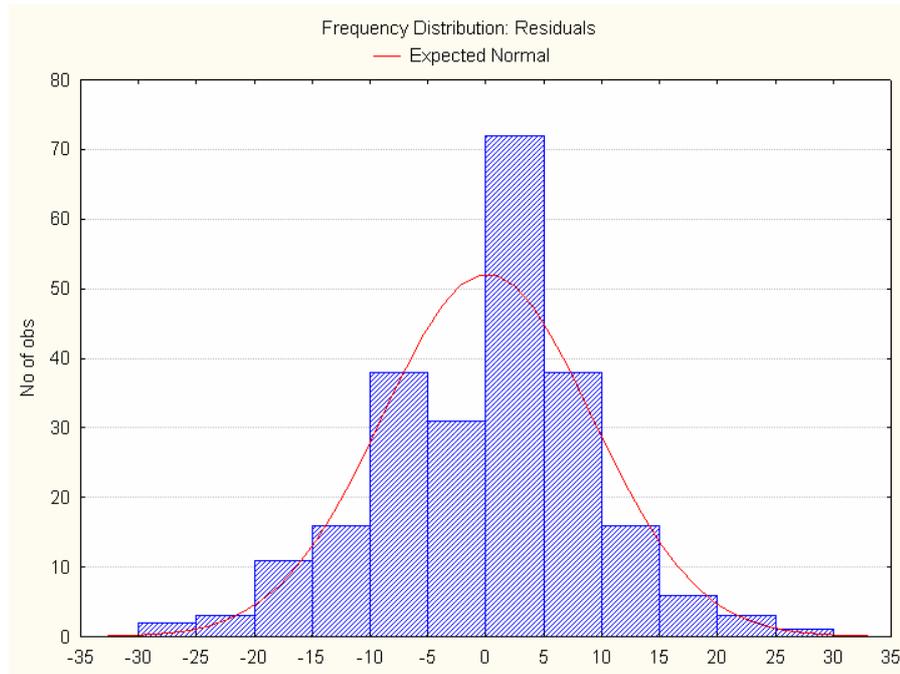


Figura 5.28 – Histograma de erros para o modelo com $d > 3$ km

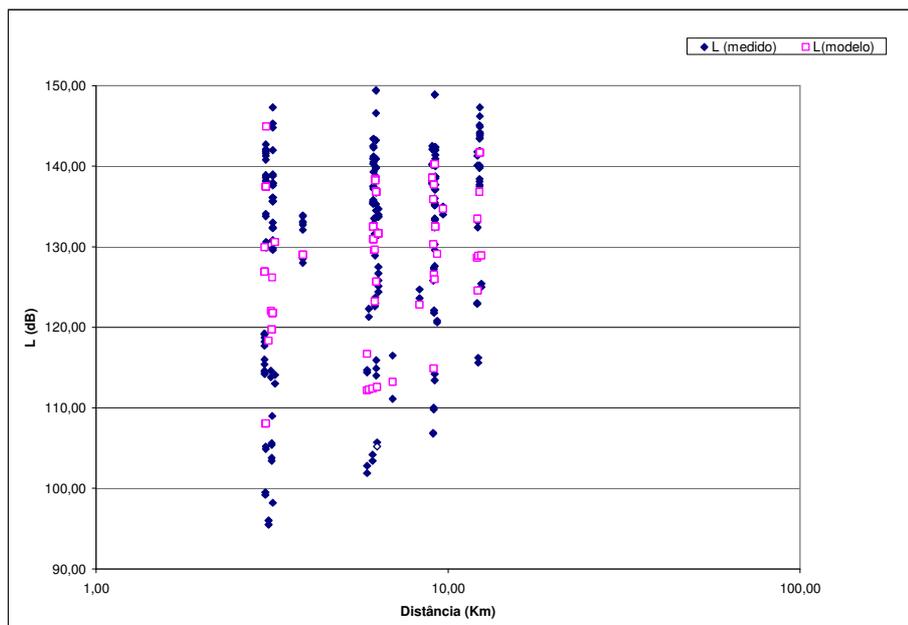


Figura 5.29 – Comparação da perda medida e prevista pelo modelo x distância para $d > 3$ km

Para o caso da perda por difração simples, o ajuste forneceu uma expressão da forma:

$$L_{SD}=17,12 + 26,16\log(f) - 0,43\log(h_{ef}) + [64,79 - 20,64\log(h_{ef})]\log(d) + 1,43A_{SD} \quad (5.6)$$

O fator de correlação entre valores previstos e medidos foi de 0,60 e o diagrama de espalhamento entre estes valores é mostrado na figura 5.30. A distribuição de erros é mostrada na figura 5.31.

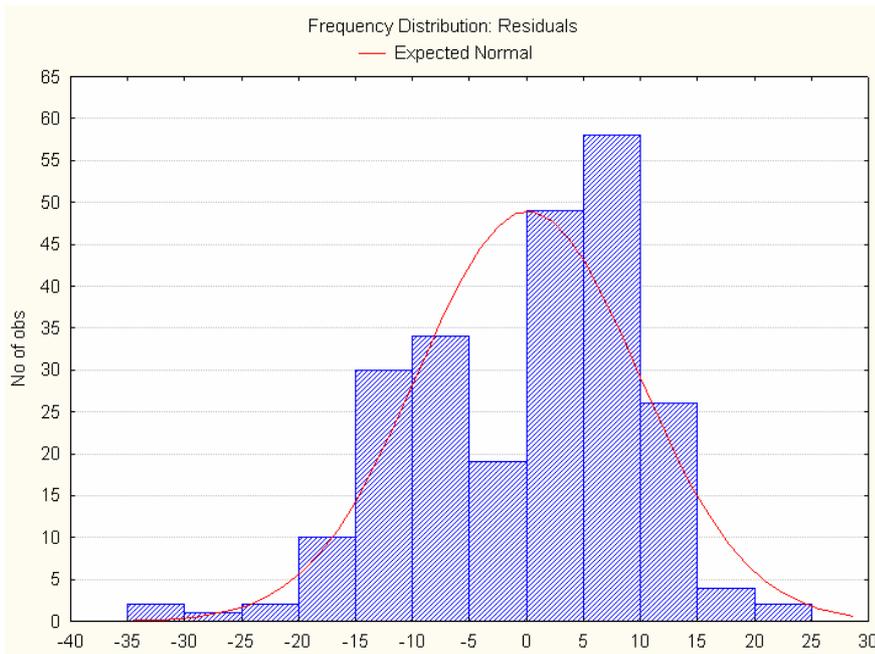


Figura 5.30 – Histograma de erros para o modelo para $d > 3\text{km}$ e difração simples

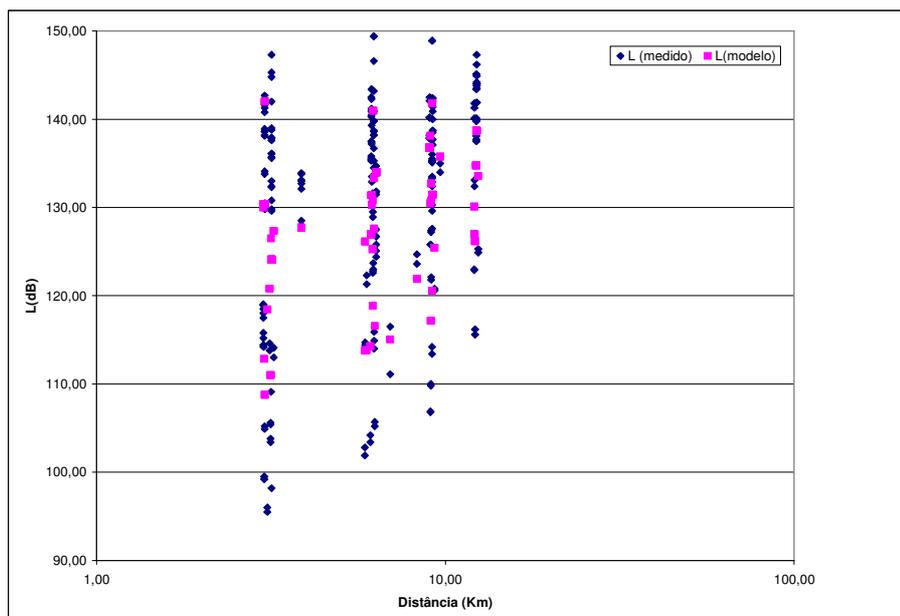


Figura 5.31 – Comparação da perda medida e prevista pelo modelo x distância para $d > 3\text{km}$ e difração simples

Os erros obtidos são mostrados na tabela abaixo.

Modelo	Valor médio (%)	Desvio padrão (%)	RMS (%)
Difração simples	-0,02	8,05	8,05
Múltiplas difrações	-0,56	7,58	7,60

Tabela 5.4 – Resumo da comparação dos erros para o novo modelo