

## 9

### Modelo geral de perda em propagação

Nesta seção será proposto um modelo geral de perda em propagação para todos os ambientes estudados. A análise em frequência no capítulo VIII propiciou a obtenção das superfícies interpoladas que representam, com boa precisão, a perda em cada ambiente em função da frequência com altura de transmissão fixa e posteriormente o estudo da perda com a altura de transmissão propiciou a sua caracterização no intervalo contínuo de altura entre 1,5 metro e 12 metros. O modelo geral se concentrará na caracterização de uma curva do tipo  $L_0 + \varphi \log d$  em função da frequência e altura de transmissão, será acrescentada uma perda provocada pela proximidade com uma árvore no caso do receptor posicionado nesta situação. Estendendo a ideia, pode-se considerar o modelo abaixo:

$$L(dB) = L_0(f, h_t) + \varphi(f, h_t) \log d + L_p \quad (9.1)$$

A equação 9.1 compõe os parâmetros perda inicial e *slope* como funções da frequência e da altura de transmissão. A perda em proximidade ( $L_p$ ) é incluída no cálculo geral da perda se o receptor estiver bem próximo do tronco da árvore. Este termo só é utilizado nesta condição.

#### 9.1

##### Modelo geral para floresta

A análise da perda inicial em função da frequência mostra pouca variação deste parâmetro. Pode-se notar leve tendência de aumento com a frequência para a faixa de 700 MHz a 800 MHz. A aproximação linear para a perda, tomada na página 182, pode ser vista na equação 9.2, abaixo:

$$L_0(dB) = 0,0478f(MHz) + 99,62 \quad (9.2)$$

Maiores variações da perda inicial ocorrem com a altura de transmissão. A aproximação linear deste parâmetro com a altura (pg. 195) está representada na equação 9.3, abaixo:

$$L_0(dB) = 149,7 - 2,22h_t(m) \quad (9.3)$$

As duas retas de ajuste linear para a perda inicial, tanto em função da frequência quanto em função da altura de transmissão podem ser utilizadas para prever o valor deste parâmetro. Para compor sua expressão para a floresta foi usada a média aritmética entre as expressões em função da frequência e da altura de transmissão, assim:

$$L_0(f, h_t) = \frac{L_0(f) + L_0(h_t)}{2} \quad (9.4)$$

Mesclando as equações 9.2, 9.3 e 9.4 o parâmetro perda inicial assume a forma:

$$L_0(f, h_t) = 0,0239f - 1,11h_t + 124,66 \quad (9.5)$$

Usando os mesmos critérios para o cálculo do fator de atenuação com a distância (pg. 182), tem-se:

$$\varphi(f) = 0,015f + 36,93 \quad (9.6)$$

E (pg. 196):

$$\varphi(h_t) = 50,06 - 0,251h_t \quad (9.7)$$

Compondo o *slope* de forma semelhante ao parâmetro  $L_0$ , tem-se:

$$\varphi(f, h_t) = \frac{\varphi(f) + \varphi(h_t)}{2} \quad (9.8)$$

Desenvolvendo a equação 9.8 com o uso das equações 9.6 e 9.7:

$$\varphi(f, h_t) = 0,0075f - 0,1255h_t + 43,49 \quad (9.9)$$

Desta forma, a expressão final para a perda em propagação no ambiente floresta assume a forma:

$$L(dB) = L_0(f, h_t) + \varphi(f, h_t) \log d + L_p \quad (9.10)$$

Reescrevendo a equação 9.10 com o auxílio das equações 9.9 e 9.5:

$$L(dB) = 124,66 + 0,0239f(MHz) - 1,11h_t(m) + [43,49 + 0,0075fMHz - 0,1255h_t m] \log d km + L_p \quad (9.11)$$

Onde  $f$  é a frequência em MHz,  $h_t$  é a altura de transmissão em metros,  $d$  é a distância do transmissor em quilômetros e  $L_p$  é a perda adicional por proximidade de uma árvore que vale 10,29 dB. Este modelo é válido para:

$$\begin{cases} 700 \text{ MHz} \leq f \leq 800 \text{ MHz} \\ 61 \text{ m} \leq d \leq 1000 \text{ m} \\ 1,5 \text{ m} \leq h_t \leq 12 \text{ m} \end{cases}$$

## 9.2

### Modelo geral para bosque

Utilizando análise semelhante à adotada para o ambiente floresta, tem-se para o parâmetro perda inicial:

$$L_0(dB) = 0,085f(MHz) + 65,5 \quad (9.12)$$

E:

$$L_0(dB) = 137,65 - 1,44h_t(m) \quad (9.13)$$

Desta forma:

$$L_0(f, h_t) = 0,0425f - 0,72h_t + 101,57 \quad (9.14)$$

Analisando a atenuação com à distância de analogamente à perda inicial:

$$\varphi(f) = 0,0292f + 19,2 \quad (9.15)$$

E:

$$\varphi(h_t) = 42,45 - 0,204h_t \quad (9.16)$$

Assim, compondo as duas expressões para o *slope* utilizando a média aritmética:

$$\varphi(f, h_t) = 0,0146f - 0,102h_t + 30,825 \quad (9.17)$$

Compondo todos os parâmetros na equação final da perda em propagação para o bosque, tem-se:

$$L(dB) = 101,57 + 0,0425f(MHz) - 0,72h_t(m) + [30,825 + 0,0146fMHz - 0,102h_t] \log dkm + L_p \quad (9.18)$$

Onde  $f$  é a frequência em MHz,  $h_t$  é a altura de transmissão em metros,  $d$  é a distância do transmissor em quilômetros e  $L_p$  é a perda adicional por proximidade de uma árvore, que vale 10,29 dB. Este modelo é válido para:

$$\begin{cases} 700 \text{ MHz} \leq f \leq 800 \text{ MHz} \\ 43 \text{ m} \leq d \leq 590 \text{ m} \\ 1,5 \text{ m} \leq h_t \leq 12 \text{ m} \end{cases}$$

### 9.3

#### Modelo geral para linha de árvores

Analisando a perda inicial para o ambiente linha de árvores da mesma forma que os outros ambientes, tem-se:

$$L_0(dB) = 123,05 - 0,0124f(MHz) \quad (9.19)$$

E:

$$L_0(dB) = 120,54 - 2,05h_t(m) \quad (9.20)$$

Assim:

$$L_0(f, h_t) = 0,0062f - 0,525h_t + 121,795 \quad (9.21)$$

Utilizando a mesma análise para a atenuação com a distância:

$$\varphi(f) = 49,43 - 0,0248f \quad (9.22)$$

E:

$$\varphi(h_t) = 0,0142h_t + 30,46 \quad (9.23)$$

Desta forma:

$$\varphi(f, h_t) = 39,945 - 0,0124f + 0,0071h_t \quad (9.24)$$

Assim a expressão final para a perda na morfologia linha de árvores, pode ser representada por:

$$L(dB) = 121,795 - 0,0062f(MHz) - 0,525h_t(m) + [39,945 - 0,0124fMHz + 0,0071h_tm] \log dkm + Lp \quad (9.25)$$

Onde  $f$  é a frequência em MHz,  $h_t$  é a altura de transmissão em metros,  $d$  é a distância do transmissor em quilômetros e  $L_p$  é a perda adicional por proximidade de uma árvore, que vale 10,29 dB. Este modelo é válido para:

$$\begin{cases} 700 \text{ MHz} \leq f \leq 800 \text{ MHz} \\ 46 \text{ m} \leq d \leq 535 \text{ m} \\ 1,5 \text{ m} \leq h_t \leq 12 \text{ m} \end{cases}$$

## 9.4

### Comparativo entre modelos

Nesta seção, o modelo de perda em propagação em ambientes vegetados será comparado a outros modelos da literatura. Os modelos utilizados nesta comparação são: Weissberger, COST 235 e Chen e Kuo, apresentados no capítulo IV.

O modelo de Weissberger calcula a perda em excesso à propagação em espaço livre, provocada pela propagação de uma onda em ambientes com vegetação arbórea. Sua faixa de utilização em frequência vai de 230 MHz até 96 GHz e em distâncias de até 400 metros. Neste comparativo será utilizado o modelo para árvores com folhas e acrescida à perda em propagação de espaço livre.

O COST 235 possui muitas semelhanças na sua formulação com o de Weissberger. A versão utilizada é a que prevê árvores com folhas. Em sua simulação foi acrescentada a perda em espaço livre para melhor comparação.

O modelo de Chen e Kuo só é válido para frequências acima de 1 GHz, desta forma será usada esta frequência na simulação assim como a expressão para polarização horizontal, que foi a utilizada neste trabalho. Aos valores da perda foi adicionada a atenuação provocada pela propagação em espaço livre, pois este também é formulado apenas com a perda em excesso.

A simulação comparativa é feita para cada morfologia vegetal nas frequências fixas de 700 MHz, 750 MHz e 800 MHz e nas alturas de transmissão de 1,5 m, 6 m e 12 m. A análise comparativa é bastante subjetiva, pois os três modelos utilizados não são funções da altura de transmissão o que dificulta uma abordagem mais quantitativa.

### 9.4.1

#### Floresta

Nas figuras 9.1, 9.2 e 9.3 estão plotados os gráficos dos modelos nas frequências de 700 MHz, 750 MHz e 800 MHz. Pode-se notar claramente que o modelo de perda para o ambiente floresta possui boa concordância com a curva de Weissberger, principalmente nas menores alturas de transmissão. O modelo COST 235 é bastante pessimista, o mesmo acontecendo com Chen e Kuo para distâncias acima de, aproximadamente, 150 metros. A menor frequência válida para Chen e Kuo é 1 GHz o que pode contribuir para a grande diferença encontrada na atenuação a maiores distâncias, pois sabe-se que a propagação em ambientes florestais sofre expressivo aumento da perda em frequências acima de 800 MHz [40].

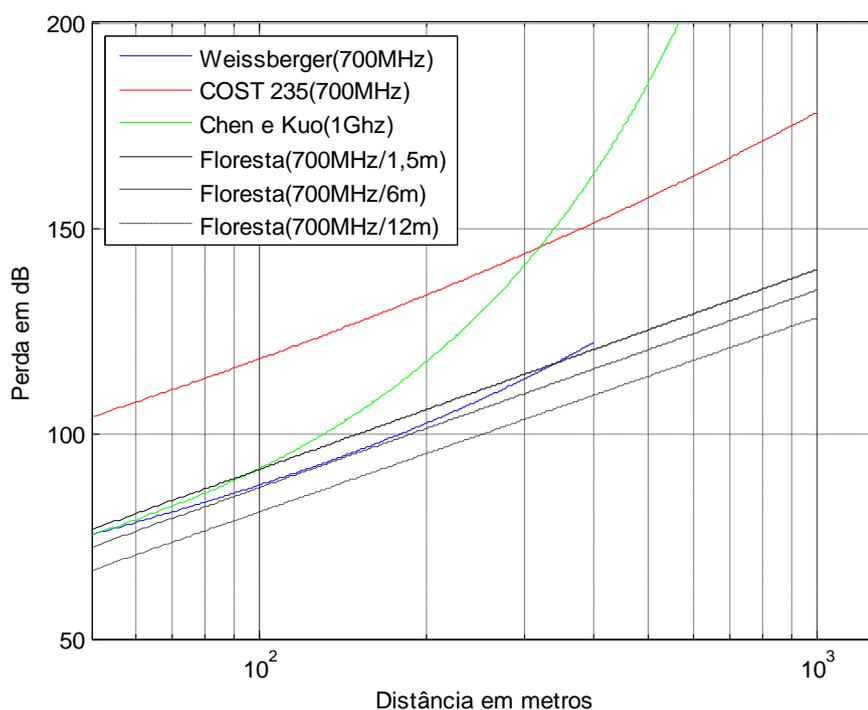


Figura 9.1 - Comparativo entre modelos na frequência de 700 MHz.

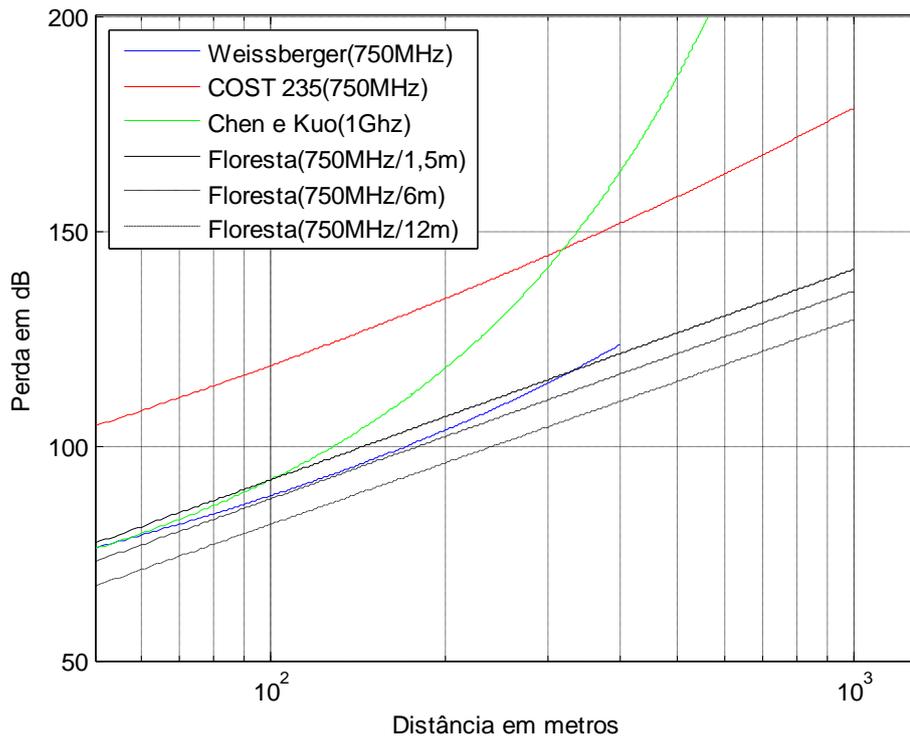


Figura 9.2 - Comparativo entre modelos na frequência de 750 MHz.

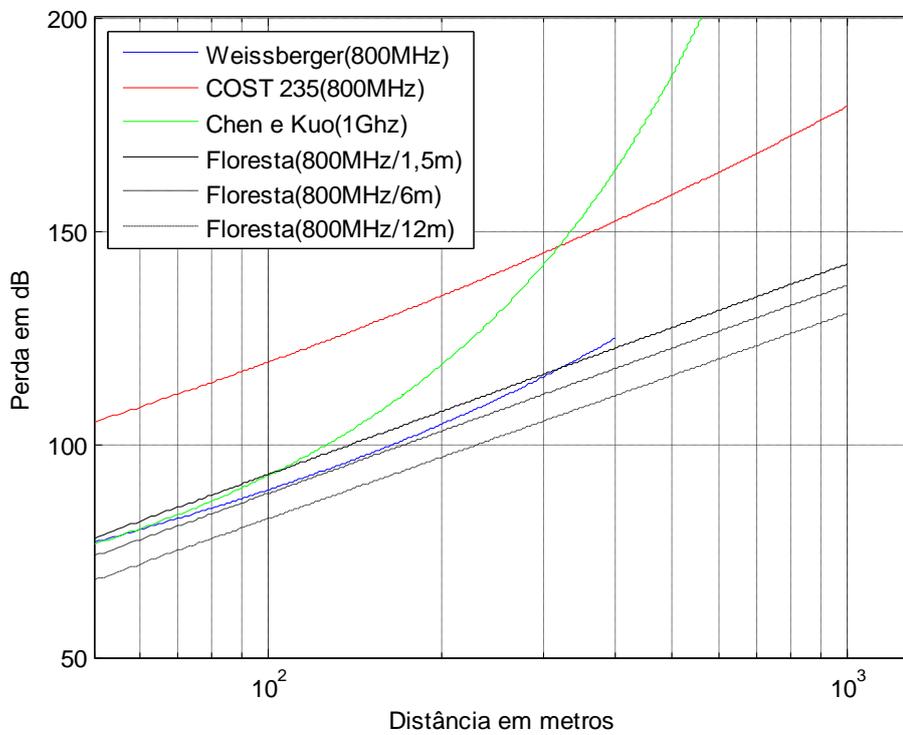


Figura 9.3 - Comparativo entre modelos na frequência de 800 MHz.

## 9.4.2

### Bosque

O modelo para o bosque possui boa semelhança com o da floresta e as mesmas considerações podem ser assumidas para ambos os modelos. As figuras 9.4, 9.5 e 9.6 mostram o modelo em comparação aos dos outros autores.

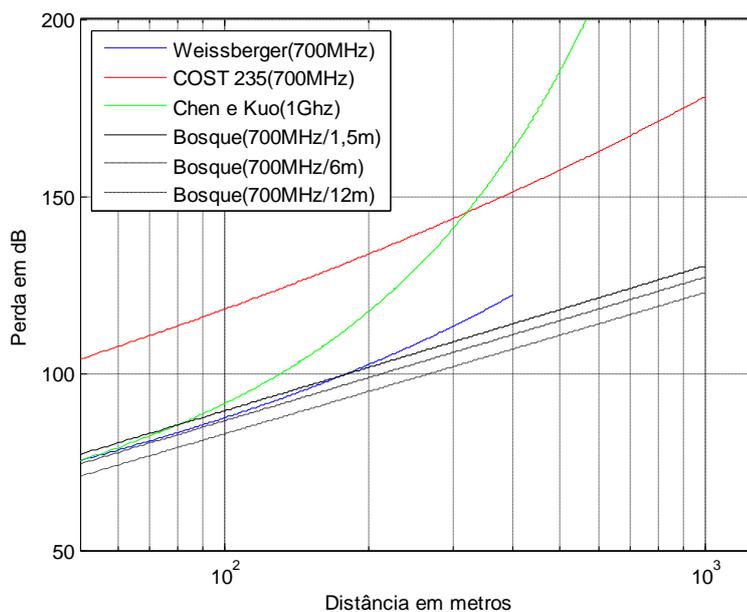


Figura 9.4 - Comparativo entre modelos na frequência de 700 MHz.

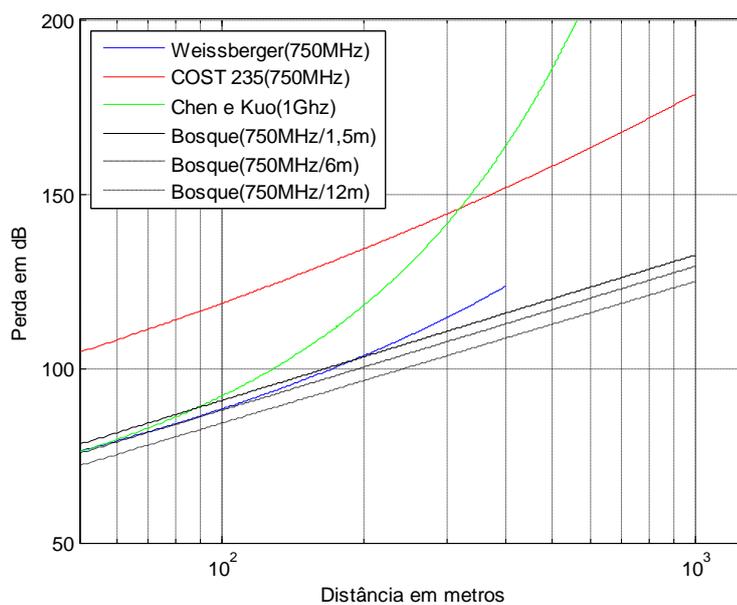


Figura 9.5 - Comparativo entre modelos na frequência de 750 MHz.

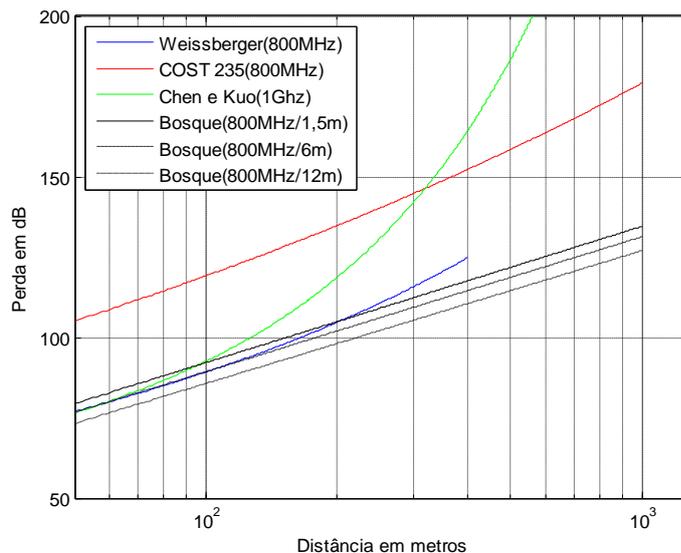


Figura 9.6 - Comparativo entre modelos na frequência de 800 MHz.

### 9.4.3

#### Linha de árvores

Dentre todos os modelos, a linha de árvores é a que apresenta claramente a menor concordância com os modelos de comparação. As discontinuidades e maior espaçamento entre os indivíduos na linha podem ser os responsáveis pelo comportamento mais otimista encontrado nesta morfologia. As figuras 9.7, 9.8 e 9.9 mostram a análise comparativa.

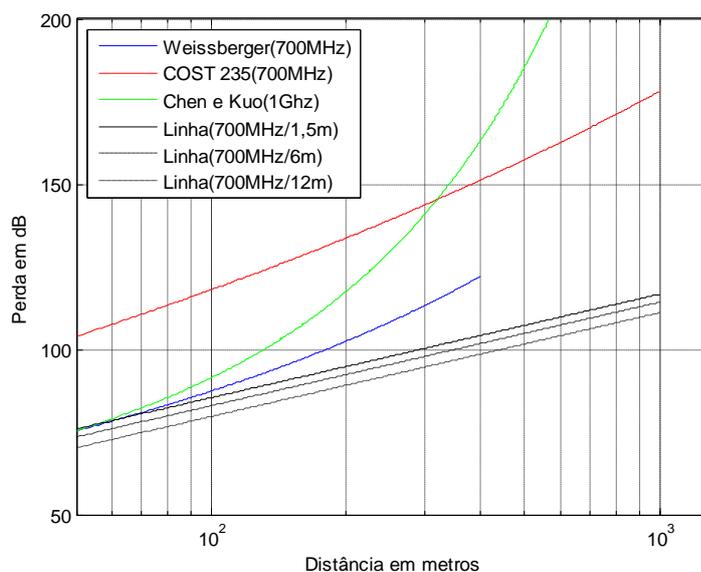


Figura 9.7 - Comparativo entre modelos na frequência de 700 MHz.

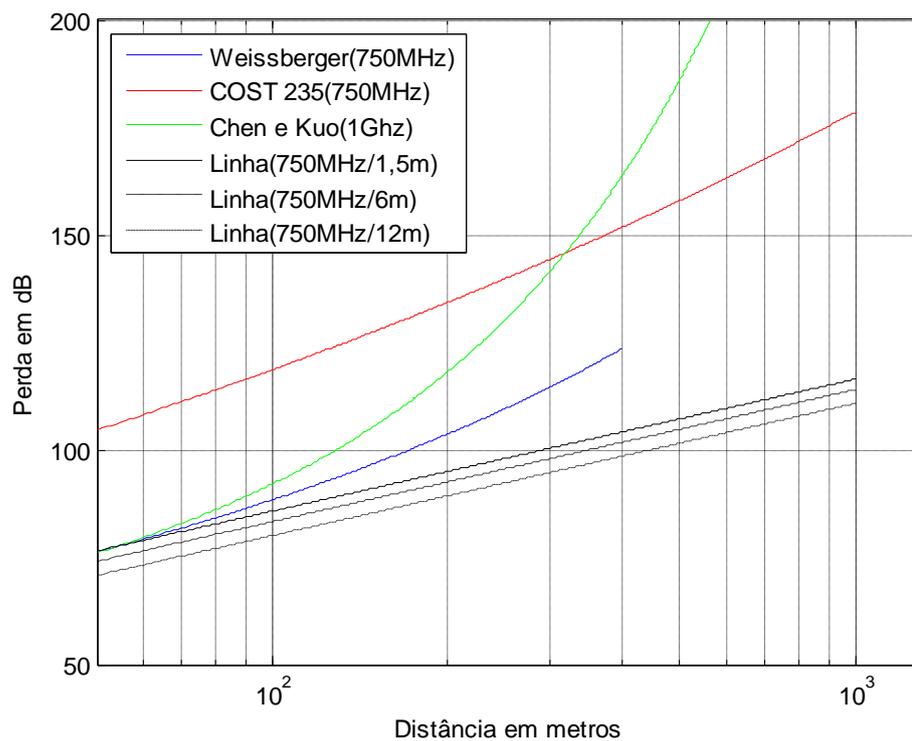


Figura 9.8 - Comparativo entre modelos na frequência de 750 MHz.

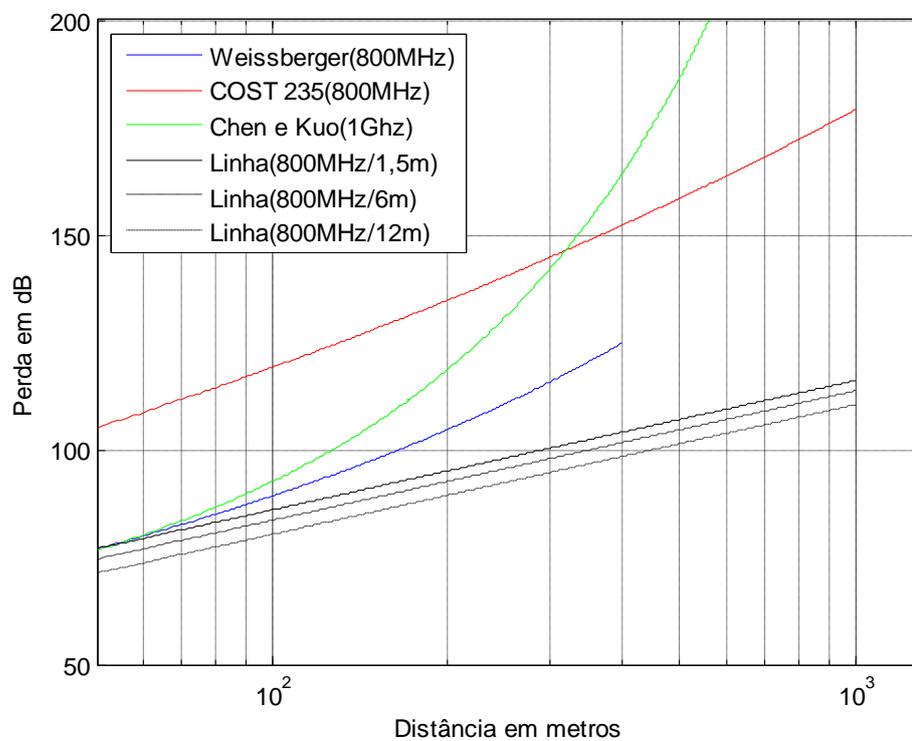


Figura 9.9 - Comparativo entre modelos na frequência de 800 MHz.

## Conclusão

O presente estudo abordou os efeitos provocados pela presença de árvores no percurso de propagação de ondas de rádio UHF na faixa de 700 MHz a 800 MHz.

Para tanto, foi feita uma revisão teórica com tópicos necessários ao desenvolvimento do trabalho e uma abordagem sobre importantes modelos relacionados ao tema na literatura.

Com o objetivo de adquirir dados, foram montados e configurados dois sistemas de medição que efetuaram 720 amostras de potência recebida em dois sítios com morfologias vegetais distantes mais de 3000 km entre si. Foram adquiridas duas antenas log-periódicas diretivas profissionais, desenvolvidas para este estudo por empresa participante do programa espacial brasileiro, para garantir o estado- de- arte em recepção e transmissão. Foi projetada e manufaturada uma torre de transmissão desmontável estaiada com 28 kg de peso, necessária à logística de medição em áreas de difícil acesso como a floresta amazônica. Um importante recurso utilizado, o laboratório móvel de medições eletromagnéticas do Inmetro, juntamente com sua equipe de medição, assegurou boa aquisição de dados nas medições feitas no Rio de Janeiro.

Foram utilizadas métricas e métodos usuais, presentes em outros trabalhos . No capítulo VII é proposta uma fórmula empírica para a interpolação de retas de melhor ajuste, baseadas em um ponderador linear. Em seguida foi analisada a perda em propagação para todos os ambientes em função da distância, altura de transmissão e frequência para cada morfologia vegetal. Foi feita uma breve análise sobre as estatísticas de erro e desvio padrão absolutos nos ambientes medidos.

O estudo sobre espécimes isolados analisou qualitativamente e quantitativamente os efeitos de proximidade com uma árvore propondo o valor de perda adicional de 10,29 dB, para esta situação.

Ao final, o modelo geral de perda em propagação em ambientes vegetados é proposto para todas as morfologias e comparado a importantes modelos da literatura. Análises gráficas demonstram, para pequenas distâncias que o modelo exibe boa concordância com os modelos de Weissberger e Chen e Kuo para as morfologias floresta e bosque. Para linhas de árvores e indivíduos isolados, o modelo proposto apresenta menores perdas, o que se explica pelo fato da menor densidade de vegetação.

### **Contribuições**

- O presente trabalho acrescenta literatura sobre o tema, pouco estudado no mundo;
- Importantes modelos de perda de propagação em ambientes vegetados foram elaborados sobre espécies de clima temperado. O modelo proposto aborda espécies tropicais;
- O Brasil é um país continental e possui grande parte de seu território coberto por vegetação arbórea e o modelo pode ser usado como ferramenta de predição, para prover comunicação na faixa estudada;
- O modelo proposto estende a quantidade de parâmetros analisados em importantes modelos, que usualmente são funções da frequência e da distância apenas.

### **Sugestão para trabalhos futuros**

- Efetuar medições em outros sítios, nas morfologias estudadas, para aumentar a base de dados de propagação em ambientes vegetados;
- Coletar dados nas morfologias utilizando maiores alturas de transmissão e diferentes faixas de frequência para verificar seus efeitos;
- Realização de campanhas de medição utilizando variados graus de diversidade na comunicação;
- Caracterização do sinal em faixa larga, utilizando modulações típicas das tecnologias 3G e 4G.