

# Simulação Estatística Bidimensional do Modelo de Bertoni – Walfisch para Canal de Rádio Móvel

Ananias P. Neto\*, Edilberto O. Rozal\*, Evaldo G. Pelaes\*  
UFPA – Universidade Federal do Pará, PPGEE, Belém – Pará – Brasil

**Resumo** — Vários modelos teóricos e experimentais têm sido propostos para a predição da perda de percurso em sistemas de comunicações móveis. Porém, sabe-se que em ambiente real, o sinal recebido está sujeito a variações. O modelo de Bertoni-Walfisch [1] prevê o efeito dos prédios no sinal transmitido, caracterizam a área urbana como sendo aquela apresentada por um grande número de prédios com altura quase uniforme e que se encontram em fila. Uma nova extensão deste modelo é apresentada neste trabalho, considerando a altura e a distância dos prédios como uma variável aleatória bidimensional. Resultados de simulações são apresentados considerando a análise bidimensional para diferentes casos.

**Palavras-Chave** — Ambientes urbanos, Canal de propagação, Modelos estatísticos, Comunicações móveis.

**Abstract** — Some theoretical and experimental models have been considered for the prediction of the path loss in mobile communications systems. However, one knows that in real environment, the received signal is subject to variations. The model of Bertoni-Walfisch [1] foresees the effect of the building in the transmitted signal, characterizes the urban area as being that one presented by a great number of building with height almost uniform and that they meet in line. A new extension of this model is made in this work, which consists of simulating some of its parameters as bidimensional random variables.

**Index Terms** — Urban environments, Propagation channel, Statistical models, Wireless communications.

## I. INTRODUÇÃO

O modelo de predição desenvolvido para uma dada área urbana não pode dar resultados aceitáveis para diferentes áreas uma vez que, cada modelo apresenta parâmetros diferentes que variam de acordo com as características da área considerada. Com o propósito de calcular a perda de percurso em áreas urbanas, suburbanas e rurais em sistemas de comunicação móveis, o modelo de Lee [2,3], Okumura-Hata [3,4], Bertoni-Walfisch [1], Carey [3,5], e o de Egli [3,6] tem sido sugeridos e usados para o cálculo da predição da propagação na literatura. O modelo de Bertoni-Walfisch é usado para estimar a perda de percurso em um ambiente urbano para comunicação celular. O modelo é uma combinação de modelos empíricos e determinísticos usados na estimativa da perda de percurso em ambientes urbanos sobre uma faixa de frequência de 800 a 2000 MHz. Caracteriza ambientes urbanos e suburbanos onde os prédios

estão a uma altura razoavelmente uniforme e são construídos em fileiras com uma separação pequena entre os prédios vizinhos. Neste método, o sinal recebido não possui componente em linha de visada, sendo composto por diversos raios espalhados próximos ao terminal móvel.

## II. PARÂMETROS DO MODELO DE BERTONI-WALFISCH

Além dos parâmetros básicos tais como a frequência de operação, a distância entre transmissor e receptor, a altura da antena transmissora e receptora, o modelo leva em consideração dois parâmetros muito importantes para o cálculo da perda: a altura dos prédios e a distância entre os prédios. O modelo de Bertoni-Walfisch apresenta um melhor desempenho quando comparado com outros modelos de predição, uma vez que ele leva em consideração as características de cada área urbana onde o modelo é aplicado. Para o terreno nivelado e dentro do horizonte de rádio, a perda de transmissão média para 922 MHz, assumindo uma antena isotrópica é dada por [3]:

$$L = 151,8 + 5 \log \left[ \left( \frac{d_b}{2} \right)^2 + (h_b - h_m)^2 \right] - 9 \log d_b + 20 \log \left\{ \tan^{-1} [2(h_b - h_m) / d_b] \right\} - 18 \log (h - h_b) + 38 \log D \quad (1)$$

Onde  $d_b$  é distância centro-a-centro das fileiras dos prédios em metros,  $h_b$  é a altura média dos prédios em metros,  $h_m$  é a altura da antena móvel em metros,  $h$  é a altura da estação base da antena transmissora em metros e  $D$  é a distância entre a estação base e a antena móvel em Km [1]. Os parâmetros como a altura média do prédio  $h_b$ , e a distância centro-a-centro das fileiras dos prédios  $d_b$ , são muito importantes para calcular toda a perda de percurso neste modelo. Por outro lado estes parâmetros podem variar para cada ambiente urbano.

Conseqüentemente, estes parâmetros devem ser generalizados a fim de que se possa usar o modelo de Bertoni-Walfisch em diferentes áreas urbanas. Para generalizar este modelo, Cavdar [7] desenvolveu um método para estimar os parâmetros  $h_b$  e  $d_b$ , os quais foram modelados como variáveis aleatórias com funções distribuição de probabilidade Gaussiana e de Rayleigh. Estas funções de distribuição foram escolhidas levando em consideração as características físicas das áreas urbanas. A Figura 1 mostra o modelo de Bertoni-Walfisch, onde a distância entre os prédios  $d_b$  é uma variável aleatória. Na Figura 2, a altura dos prédios  $h_b$  é uma variável. Nos dois casos, os parâmetros  $h_b$  e  $d_b$  são tratados como variáveis aleatórias unidimensionais. Em seguida será feita uma análise bidimensional.

\* UFPA, Av. Augusto Corrêa, 01, Belém-PA, Brasil, phone:+55-91-2111302, Fax: +55-91-2111634, A. P. Neto, [apneto@ufpa.br](mailto:apneto@ufpa.br), E. O. Rozal, [edilbe@ufpa.br](mailto:edilbe@ufpa.br), E. G. Pelaes, [pelaes@ufpa.br](mailto:pelaes@ufpa.br); Este trabalho foi realizado com apoio da UFPA, CAPES e do Projeto ERICSSON/AMAZONIA CELULAR/UFPA.

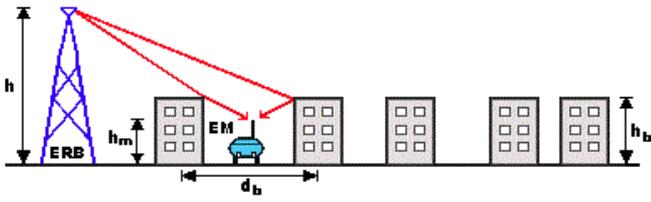


Fig. 1. Modelo de Bertoni-Walfisch com  $d_b$  variável.

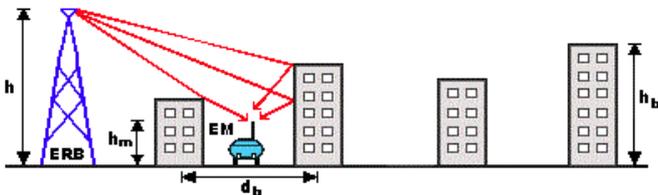


Fig. 2. Modelo de Bertoni-Walfisch com  $h_b$  variável.

III. ANÁLISE BIDIMENSIONAL DO MODELO DE BERTONI – WALFISCH

Até então, os parâmetros  $d_b$  e  $h_b$  foram modelados apenas para o caso unidimensional. No entanto, torna-se interessante observar as características da perda de percurso quando estes dois parâmetros variam simultaneamente, tratando-se o par  $(d_b, h_b)$  como duas variáveis aleatórias independentes, usadas na análise. Desta forma, pode-se tomar todos os valores em alguma região  $R$  do plano Euclidiano, na qual a função densidade de probabilidade  $f(d_b, h_b)$  é aquela que satisfaz a seguinte condição [8]:

i)  $f(d_b, h_b) \geq 0$ , para todo  $(d_b, h_b) \in R$ ; (2)

ii)  $\iint_R f(d_b, h_b) d_{d_b} d_{h_b} = 1$ . (3)

Através do conceito da independência de dois eventos, pode-se intuitivamente dizer que  $d_b$  e  $h_b$  são variáveis aleatórias independentes. Esta é uma noção extremamente importante, pois se  $(d_b, h_b)$  é uma variável aleatória bidimensional, logo:

$$p(d_b = d_{bj}, h_b = h_{bi}) = p(d_b = d_{bj}) \cdot p(h_b = h_{bi}) \quad (4)$$

Para todo i e j. Com isto, pode-se calcular o efeito de cada um destes dois parâmetros e por fim estabelecer o produto entre estes para obter a superfície representativa da função densidade de probabilidade bidimensional e para a função distribuição cumulativa bidimensional.

Este modelo se aproxima mais de uma situação real, como mostrado na Figura 3.

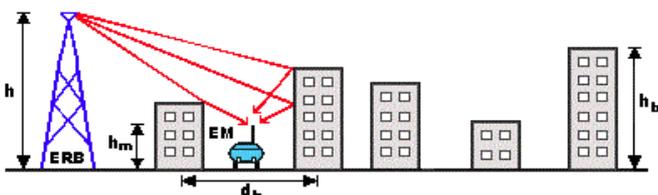


Fig. 3. Modelo de Bertoni-Walfisch com  $d_b$  e  $h_b$  variáveis.

IV. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA O MODELO BIDIMENSIONAL

As Figuras 4 - 27 mostram os resultados das simulações obtidos para o modelo Bertoni-Walfisch, considerando caso bidimensional. A Figura 4 mostra a perda de percurso em função das distâncias entre os prédios  $d_b$ , para diferentes alturas dos prédios. A Figura 5 mostra a perda de percurso considerando as alturas dos prédios  $h_b$ , para diferentes distâncias entre os prédios, para uma distância de enlace  $D = 500$  m. Observa-se nessas figuras que esses parâmetros são sumariamente importantes no cálculo da perda de percurso, devido à diferença destes parâmetros em várias áreas urbanas, eles podem ser modelados como variáveis aleatórias.

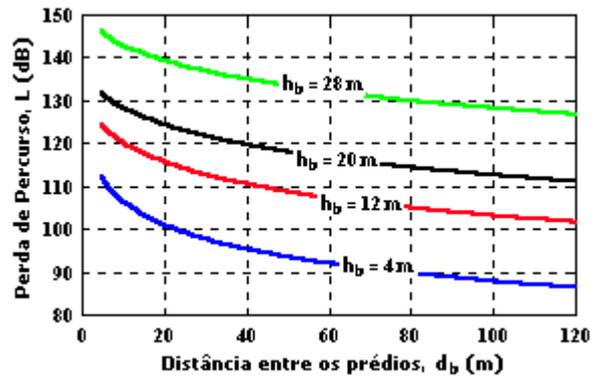


Fig. 4. Variação da perda de percurso em função de  $d_b$  para cada valor fixo de  $h_b$ , e  $D = 500$  m.

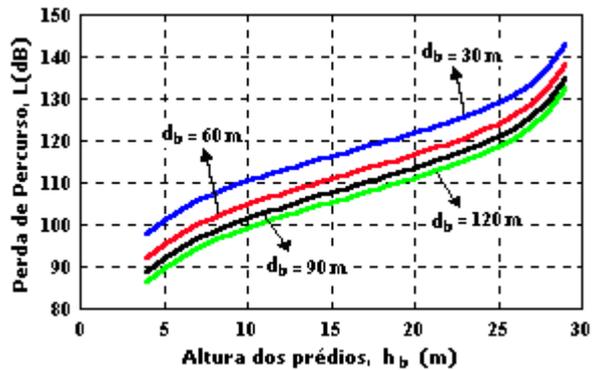


Fig. 5. Variação da perda de percurso em função de  $h_b$  para cada valor fixo de  $d_b$ , e  $D = 500$  m.

As Figuras 6 e 7 mostram a função densidade de probabilidade bidimensional e a função distribuição cumulativa bidimensional, respectivamente, da perda de percurso para a distribuição Gaussiana, onde as alturas dos prédios  $h_b$ , estão entre 6 a 16 metros, e as distâncias entre os prédios  $d_b$ , estão compreendidas entre 7 a 15 metros, considerando-se uma distância de enlace  $D = 500$  m. Estes resultados, inclusive os subseqüentes foram obtidos tomando-se o valor médio e o desvio padrão dos parâmetros  $h_b$  e  $d_b$  em cada simulação.

As Figuras 8 e 9 mostram a função densidade de probabilidade bidimensional e a função distribuição cumulativa bidimensional, respectivamente, da perda de percurso para a distribuição Gaussiana, em que as alturas dos

prédios  $h_b$ , são bem superiores ao caso anterior, na faixa de 15 a 25 metros, e as distâncias entre os prédios  $d_b$ , permanecem entre 7 a 15 metros, para  $D = 500$  m.

As Figuras 10 e 11 mostram, respectivamente, os contornos de densidade de probabilidade (vista superior) das superfícies representativas da FDP bidimensional para os casos anteriores (Figs. 6 e 8, respectivamente).

As Figuras 12 e 13 mostram a função densidade de probabilidade bidimensional e a função distribuição cumulativa, respectivamente, da perda de percurso para a distribuição Gaussiana, onde as alturas dos prédios  $h_b$ , estão na faixa de 10 a 20 metros, e as distâncias entre os prédios  $d_b$ , estão entre 10 a 20 metros, para  $D = 500$  m.

As Figuras 14 e 15 mostram também a função densidade de probabilidade bidimensional e a função distribuição cumulativa bidimensional, respectivamente, da perda de percurso para a distribuição Gaussiana, onde as alturas dos prédios  $h_b$ , permanecem entre 10 a 20 metros, e as distâncias entre os prédios  $d_b$ , são maiores que no caso anterior, entre 80 a 120 metros, para  $D = 500$  m.

As simulações foram repetidas para esses mesmos parâmetros, porém, para uma distância de enlace  $D = 1$  Km, para a distribuição Gaussiana (Figs. 16 a 23), e para distribuição de Rayleigh (Figs. 24 a 27).

## V. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os efeitos da variação das alturas dos prédios  $h_b$ , e das distâncias entre os prédios  $d_b$ , são analisadas usando as superfícies representativas da função densidade de probabilidade bidimensional da perda de percurso (FDP de L(dB)) e da função distribuição cumulativa bidimensional da perda de percurso (FDC de L(dB)).

Nas superfícies mostradas nas Figs. 6 e 8, observa-se que com o aumento da variação das alturas dos prédios  $h_b$ , ocasiona uma mudança na superfície de um formato mais achatado (Fig. 6), para um menos achatado (Fig. 8), devido à diminuição da variância  $\sigma^2$  da perda devido aos parâmetros  $d_b$  e  $h_b$ . Na Fig. 6 onde as alturas dos prédios  $h_b$  variam entre 6 a 16 m, o valor para variância é de  $\sigma^2_{(6-16)} = 51,30$  e na Fig. 8, onde as alturas dos prédios  $h_b$ , variam entre 15 a 25 m, o valor da variância encontrado foi de  $\sigma^2_{(15-25)} = 41,78$ . Nota-se também uma assimetria à direita da superfície tanto em relação à perda devido a  $d_b$  quanto a  $h_b$  (Fig. 6), mostrando uma maior frequência para baixos valores de perda devido a  $d_b$ . Esta assimetria torna-se mais evidente para maiores intervalos de alturas dos prédios com relação à perda devido a  $d_b$  (Fig. 8). As Figuras 7 e 9 mostram as superfícies representativas da FDC bidimensional da perda de percurso, para os cenários analisados anteriormente, nota-se que ocorrem mudanças nas superfícies, evidenciando os efeitos causados pelas suas variâncias.

As Figuras 10 e 11 apresentam os contornos de densidade de probabilidade. Observa-se que na Figura 10 os contornos apresentam formas circulares, enquanto que na Figura 11 os formatos dos contornos são elípticos, evidenciando o efeito do aumento das alturas dos prédios.

Nas superfícies mostradas nas Figuras 12 e 14 percebe-se que com o aumento da variação das distâncias entre os prédios  $d_b$ , ocorre uma mudança na superfície, de um formato menos achatado (Fig. 12), para um formato mais achatado (Fig. 14), devido ao aumento da sua variância  $\sigma^2$  da perda devido aos parâmetros  $d_b$  e  $h_b$ . Na Figura 12, onde as distâncias entre os prédios  $d_b$  estão no intervalo de 10 a 20 m, a variância é de  $\sigma^2_{(10-20)} = 111,61$  e na Figura 14, onde as distâncias entre os prédios  $d_b$  estão no intervalo de 80 a 120 m, o valor obtido da variância foi de  $\sigma^2_{(80-120)} = 130,81$ . Observa-se também uma assimetria à direita da superfície tanto em relação à perda devido a  $d_b$  quanto a  $h_b$  (Figs. 12 e 14). As Figuras 13 e 15 mostram as superfícies representativas da FDC bidimensional da perda de percurso, quando  $d_b$  varia de 10 a 20 m e de 80 a 120 m, respectivamente,  $h_b$  variando de 10 a 20 m e  $D = 500$  m, percebe-se que ocorrem mudanças nas superfícies, evidenciando os efeitos causados pelas suas variâncias.

Estes efeitos também foram observados para a distância de enlace  $D = 1$  Km (Figs. 16 - 23), notando-se um aumento no valor das perdas devido à  $d_b$  e  $h_b$ , quando comparadas com as mesmas superfícies para  $D = 500$  m.

As Figuras 24 a 27 mostram, respectivamente, as superfícies bidimensionais das FDP e FDC das perdas relativas aos parâmetros  $h_b$  e  $d_b$  sendo modelados como variáveis aleatórias com distribuição de Rayleigh, para uma distância de enlace igual a 500 m; onde nestas foram observadas as mesmas características quando nas simulações realizadas para distribuição Gaussiana.

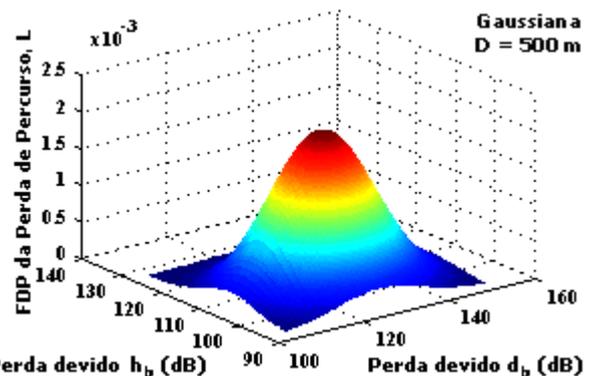


Fig. 6. FDP de L(dB), para  $h_b$  entre 6 – 16 m,  $d_b$  entre 7 – 15 m.

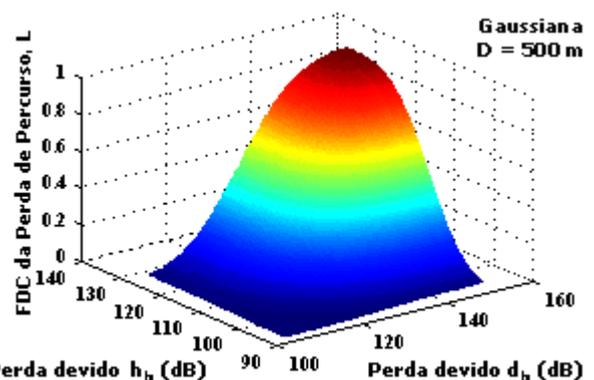


Fig. 7. FDC de L(dB), para  $h_b$  entre 6 – 16 m,  $d_b$  entre 7 – 15 m.

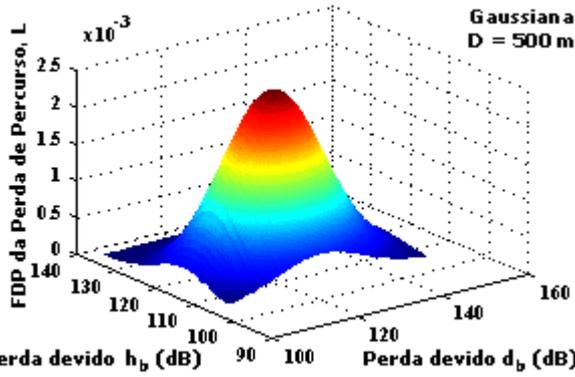


Fig. 8. FDP de L(dB), para  $h_b$  entre 15 – 25 m,  $d_b$  entre 7 – 15 m.

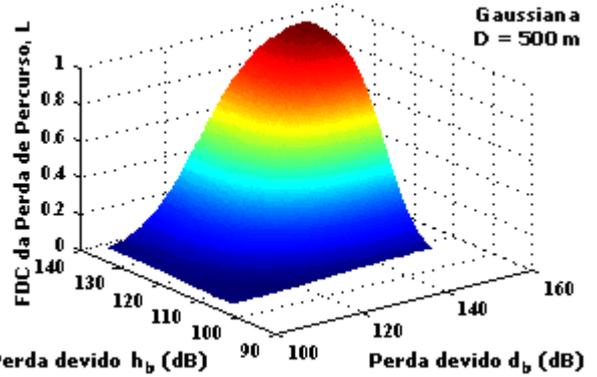


Fig. 9. FDC de L(dB), para  $h_b$  entre 15 – 25 m,  $d_b$  entre 7 – 15 m.

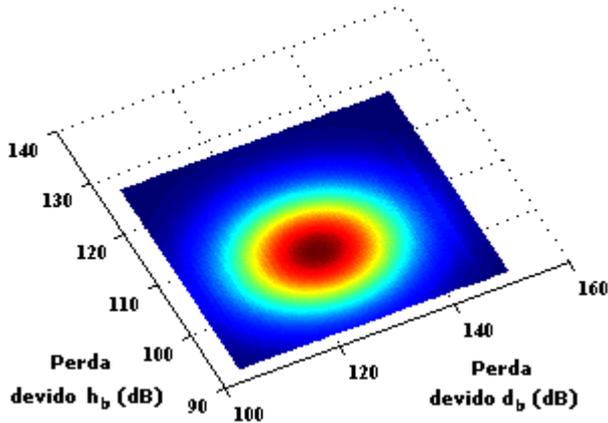


Fig.10. Vista Superior da FDP Bidimensional para  $h_b$  entre 6 – 16 m e  $d_b$  entre 7 – 15 m,  $\sigma^2_{(6-16)}=51,30$ .

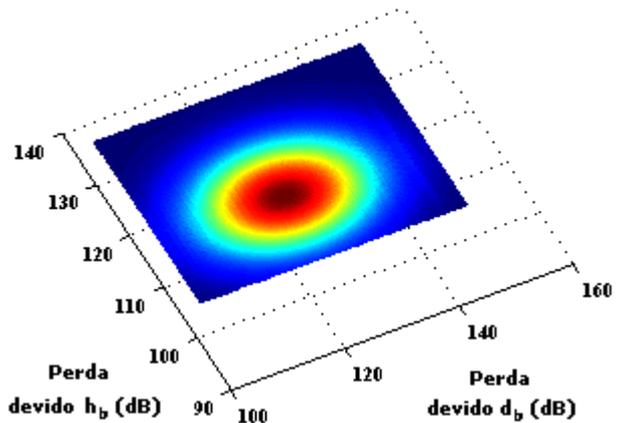


Fig.11. Vista Superior da FDP Bidimensional para  $h_b$  entre 15 – 25 m e  $d_b$  entre 7 – 15 m,  $\sigma^2_{(15-25)}=41,78$ .

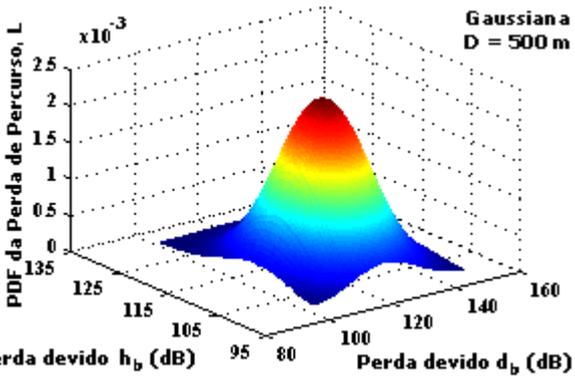


Fig. 12. FDP de L(dB), para  $h_b$  entre 10 – 20 m,  $d_b$  entre 10 – 20 m.

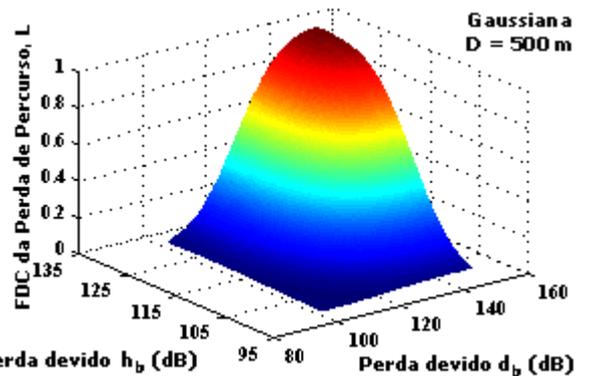


Fig. 13. FDC de L(dB), para  $h_b$  entre 10 – 20 m,  $d_b$  entre 10 – 20 m.

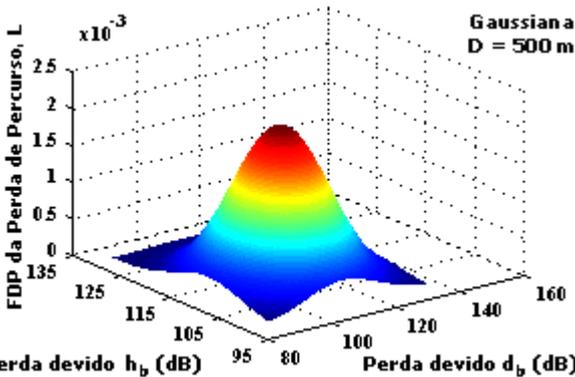


Fig. 14. FDP de L(dB), para  $h_b$  entre 10 – 20 m,  $d_b$  entre 80 – 120 m

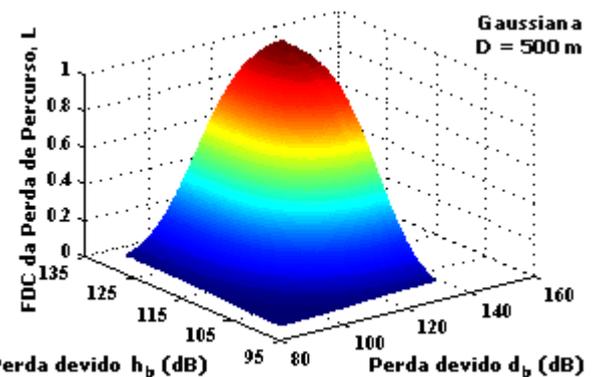


Fig. 15. FDC de L(dB), para  $h_b$  entre 10 – 20 m,  $d_b$  entre 80 – 120 m

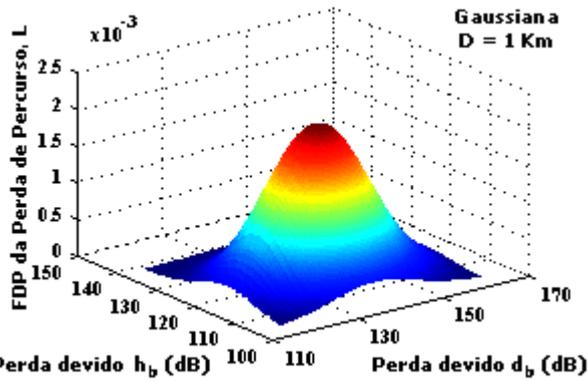


Fig. 16. FDP de L(dB), para  $h_b$  entre 6 – 16 m,  $d_b$  entre 7 – 15 m.

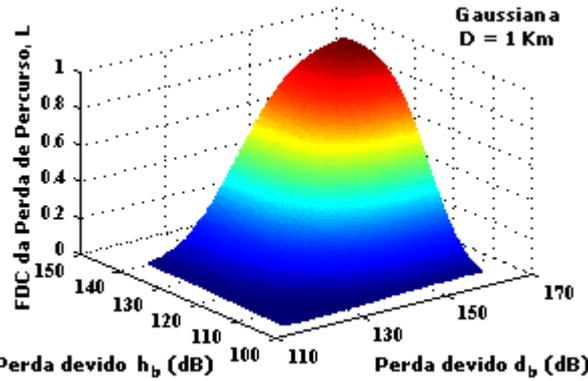


Fig. 17. FDC de L(dB), para  $h_b$  entre 6 – 16 m,  $d_b$  entre 7 – 15 m.

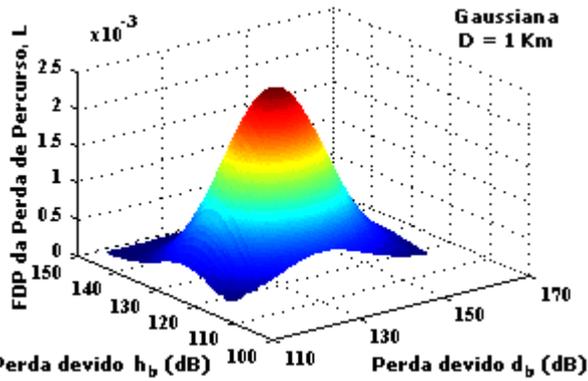


Fig. 18. FDP de L(dB), para  $h_b$  entre 15 – 25 m,  $d_b$  entre 7 – 15 m.

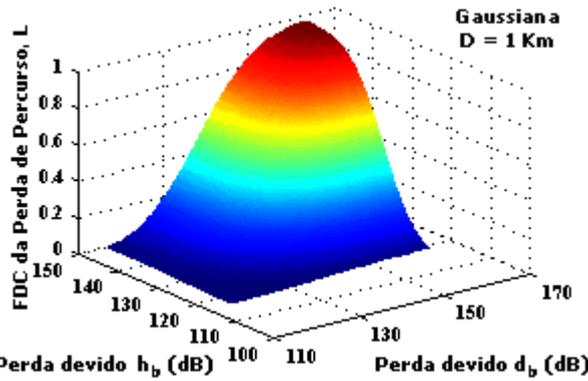


Fig. 19. FDC de L(dB), para  $h_b$  entre 15 – 25 m,  $d_b$  entre 7 – 15 m.

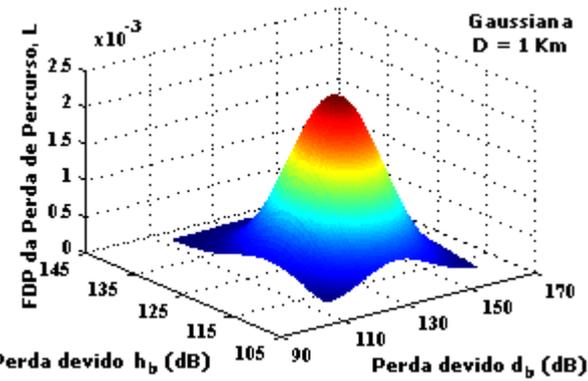


Fig. 20. FDP de L(dB), para  $h_b$  entre 10 – 20 m,  $d_b$  entre 10 – 20 m.

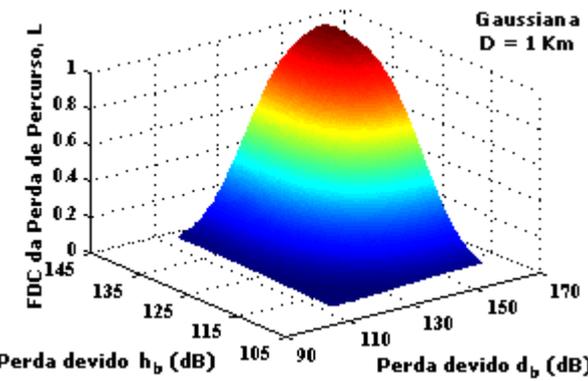


Fig. 21. FDC de L(dB), para  $h_b$  entre 10 – 20 m,  $d_b$  entre 10 – 20 m.

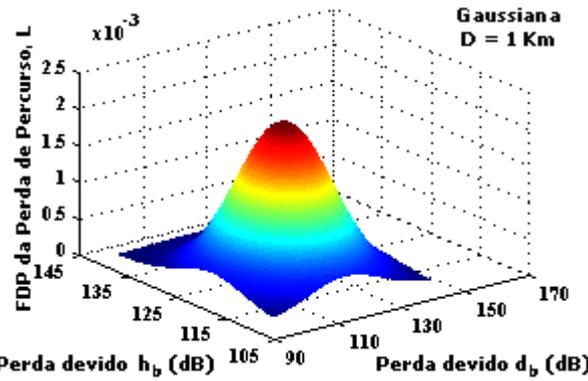


Fig. 22. FDP de L(dB), para  $h_b$  entre 10 – 20 m,  $d_b$  entre 80 – 120 m

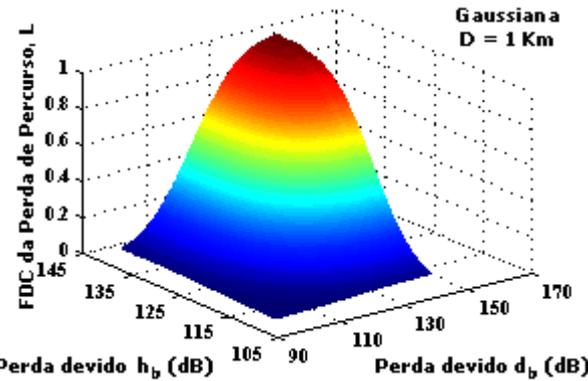
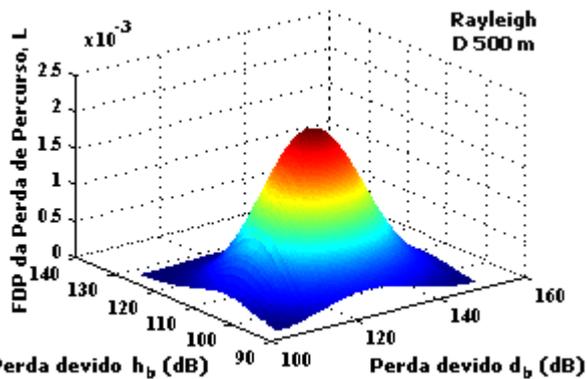
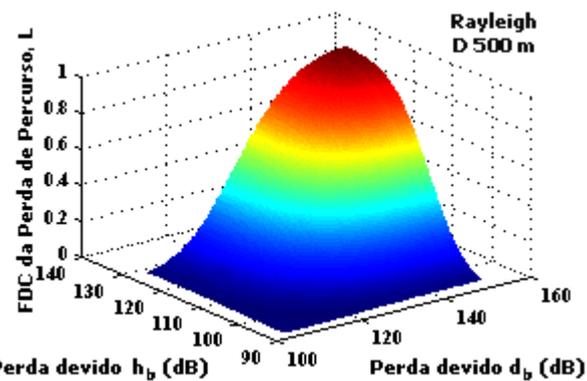
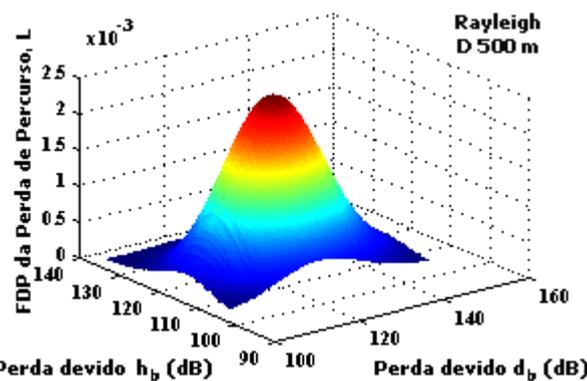
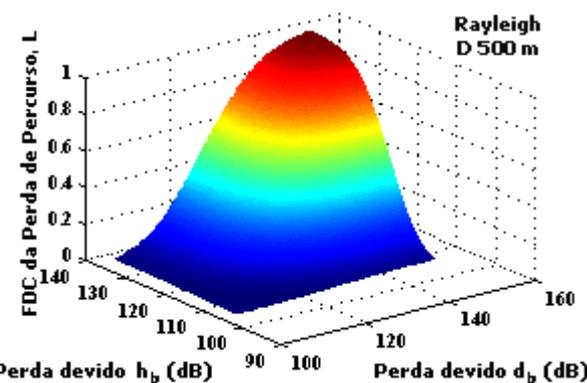


Fig. 23. FDC de L(dB), para  $h_b$  entre 10 – 20 m,  $d_b$  entre 80 – 120 m.

Fig. 24. FDP de L(dB), para  $h_b$  entre 6 – 16 m,  $d_b$  entre 7 – 15 m.Fig. 25. FDC de L(dB), para  $h_b$  entre 6 – 16 m,  $d_b$  entre 7 – 15 m.Fig. 26. FDP de L(dB), para  $h_b$  entre 15 – 25 m,  $d_b$  entre 7 – 15 m.Fig. 27. FDC de L(dB), para  $h_b$  entre 15 – 25 m,  $d_b$  entre 7 – 15 m.

## VI. CONCLUSÃO

O Modelo de Bertoni-Walfisch caracteriza ambientes urbanos e suburbanos onde os prédios estão a uma altura razoavelmente uniforme e são construídos em fileiras com uma separação pequena entre os prédios vizinhos.

Os resultados das simulações mostram que esses parâmetros ( $d_b$  e  $h_b$ ) são sumariamente importantes para o cálculo da perda de percurso em sistemas de comunicações móveis. É notório que a variação destes parâmetros no modelo de Bertoni-Walfisch ocasiona uma grande diferença no cálculo da perda de percurso para o caso bidimensional (com a variação simultânea destes parâmetros). Com isso, torna-se necessário considerar a variação destes parâmetros quando na utilização do modelo de Bertoni-Walfisch, sendo ainda relevante considerar o efeito da vegetação presente no ambiente.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. Walfisch and H.L.Bertoni, – “ A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments ” – IEEE Trans. On Antennas and Propagation, 88(36):1788-1796.
- [2] W. C. Y. Lee, – “ Mobile Communications Engineering ” – New York: McGraw-Hill, 1982, ch. 3, 4.
- [3] Parsons, J.D, – “ The Mobile Radio Propagation Channel ” – 2nd Ed. Wiley 2000.
- [4] Y. Okumura et al., – “ Field Strength and its variability in VHF and land-mobile radio service ” – Ver. Elec. Commun. Lab., vol. 16, pp. 825-873, 1968.
- [5] R. Carey, – “ Technical factors affecting the assignment of facilities in the domestic public land mobile radio service ” – FCC, Washington DC, Rep. R-6406, 1964.
- [6] J. Egli, – “ Radio propagation above 40 Mc over irregular terrain ” – Proc. IRE, 57(45):1383-1391.
- [7] Cavdar, I. Hakki, – “ A Statistical Approach to Bertoni-Walfisch Propagation for Mobile Radio Design in Urban Areas ” – IEEE Trans. Vehicular Tech., 2001:279-283.
- [8] Papoulis, A., – “ Probability, Random Variables and Stochastic Processes ” – McGraw-Hill, New York. 3<sup>rd</sup> Edition, 1991.