

## MODELO SEMI-DETERMINÍSTICO DE PREDIÇÃO DE COBERTURA NA FAIXA DE VHF PARA AMBIENTES DE PROPAGAÇÃO EM REGIÕES COM VEGETAÇÃO

João Renato Aguiar Soares<sup>1</sup> e Cássio Gonçalves do Rego<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM  
jraguiars@ifam.edu.br

<sup>2</sup>Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG  
cassio.grego@gmail.com

### RESUMO

O objetivo desta pesquisa é estudar o comportamento da amplitude do sinal radioelétrico na faixa de VHF sendo transmitido e recebido no interior de florestas com vegetações de densidades médias, tendo como cenário as vegetações típicas da Floresta Amazônica. A execução prática a metodologia utilizadas foram campanhas de medições por meio de um sistema de comunicação no interior da floresta, sendo o módulo transmissor – Tx mantido fixo enquanto o módulo receptor – Rx posicionado após uma árvore e deslocado para posições pré-definidas seguindo sempre o mesmo alinhamento do módulo Tx. Em cada ponto de medição o sinal monitorado foi registrado e as ações se repetiram até que fosse atingida a distância máxima prevista entre os módulos. Os dados obtidos foram implementados computacionalmente e estabeleceram-se os modelos de propagação semi-determinísticos.

**Palavras-Chave:** sinal radioelétrico, sistema de comunicação e modelo de propagação.

### ABSTRACT

This research has a goal to study the attenuation of the spread of a radio electric signal, operating on the VHF band, when transmitted and received within the forests with medium density of typical Amazon Forest vegetation. The methodology used to gather the data included measures of the signal by a communication system installed inside this forest, in which the transmitter module – Tx, was kept still and the receptor module – Rx, was moving away from the start point, as the measures being done on pre-marked points, until reaching the maximum distance between

<sup>1</sup> Doutorado em Engenharia Elétrica, Departamento de Indústria e Automação, Manaus, Amazonas.

<sup>2</sup> Doutorado em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, Minas Gerais.

the modules. The results were computationally implemented, generating semi-deterministic propagation models.

**Keywords:** radio electric signal, communication system and propagation model.

## INTRODUÇÃO

Esta pesquisa aborda o problema da propagação de sinal radioelétrico em ambiente de floresta que é parcial ou totalmente obstruída pela vegetação (DIAS et al., 2010; DAL BELLO et al., 1992). Considerando ser a Floresta Amazônica este ambiente, as dificuldades são acentuadas pelas condições do relevo, densidade da vegetação e outras adversidades.

O estudo deste tema é justificado pelo fato de que no Estado do Amazonas a grande maioria dos seus municípios está localizada à beira dos grandes rios ou de seus braços, formados por rios de menor volume que compõem a sua bacia hidrográfica, e muitos destes têm dezenas de comunidades povoadas por pescadores, colonos e outros trabalhadores rurais que dependem das sedes e estão praticamente isoladas em termos de comunicações.

O problema a ser enfrentado é: como encontrar uma solução capaz de permitir que sinais radioelétricos atravessem uma floresta permitindo que o sinal produzido, por exemplo, na sede do município chegue até a uma comunidade distante alguns quilômetros? E vice-versa.

A hipótese aqui defendida é a de que se um sinal radioelétrico operando na faixa de frequência de VHF, com o comprimento de onda tendo dimensão próxima a um metro, for propagado em uma região com vegetação de densidade média, em terreno plano, usando os elementos do sistema de radiação posicionados abaixo das copas das árvores, o principal obstáculo para a propagação do sinal, considerando a perda no espaço livre, são os troncos das árvores. Estabelecidas estas condições, acredita-se que o sinal de rádio pode contornar os caules das árvores e de acordo com a potência aplicada espalhar-se por longas distâncias.

Pesquisando-se sobre a vegetação da Floresta Amazônica, descobriu-se que:

A árvore da castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*), também conhecida como castanheira-do-Pará, é uma árvore alta e bela, nativa da Amazônia. Ela pode ser encontrada em florestas às margens de grandes rios, como o Amazonas, o Negro, o Orinoco e o Araguaia. É uma das espécies mais altas da Amazônia, normalmente

atingem entre 30 e 50 m de altura e de 1 a 5 m de diâmetro. Seu tronco é reto e os galhos se concentram na parte mais alta da árvore. As folhas, que ficam acima da copa das outras árvores, têm de 20 a 35 cm de comprimento (WWF- BRASIL).

Consultando-se vários artigos que abordam a propagação de sinais de rádio em regiões com vegetações não foi localizado nenhum que trate da atenuação da propagação do sinal no ambiente de castanhal, o que revela a importância deste trabalho, haja vista que modelos de propagação com esta aplicação ainda são uma lacuna na literatura.

Assim, o objetivo desta pesquisa é produzir modelos de propagação semi-determinísticos que considerem dados teóricos e dados obtidos em experimentos práticos, tendo como cenário a Floresta Amazônica, sendo estes modelos alternativas para a inclusão social das comunidades isoladas. Trata a predição de cobertura (LEE, 1993; CÁTEDRA et al., 1999) em ambiente com vegetação, utilizando sinais de rádio na faixa de frequência de VHF (*Very High Frequency*), cuja faixa é concedida pela Agência Nacional de Telecomunicações – Anatel, para os serviços de comunicações fixos e móveis (ANATEL).

Este estudo se insere numa particularização do modelo de Tamir (TAMIR, 1967) em que foi desconsiderada a predição de cobertura da propagação ponto-a-ponto em região com vegetação. É proposto aqui um modelo para a propagação do sinal elétrico via rádio em uma vegetação de densidade média, em terreno plano, usando os elementos do sistema de radiação posicionados abaixo da copa das árvores e operando em frequência na Faixa de VHF.

## MÉTODO

Os dados experimentais para a composição do modelo matemático foram obtidos por meio de campanhas de medições realizadas em uma área de vegetação de castanheiras no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Manaus Zona Leste - CMZL, conforme mostrado na Figura 1.



Figura 1: Foto da vista superior do CMZL e a indicação da extensão da área utilizada.  
Fonte: Google Earth 2.

Na Figura 2 é ilustrada a vista lateral do cenário utilizado no procedimento de medidas. Os módulos Tx e Rx têm como obstáculo uma árvore. O módulo Tx (composto pelo Gerador Tx+o cabo de Radiofrequência-RF+uma torre metálica com altura  $h_{A_{Tx}}$ +a antena  $A_{Tx}$ ) permaneceu fixo enquanto que o Rx (composto pelo Analisador Rx+o cabo de Radiofrequência-RF+uma torre metálica com altura  $h_{A_{Rx}}$ +a antena  $A_{Rx}$ ) foi deslocado da esquerda para a direita até a posição máxima de  $d_s=225$  m a partir de Tx.

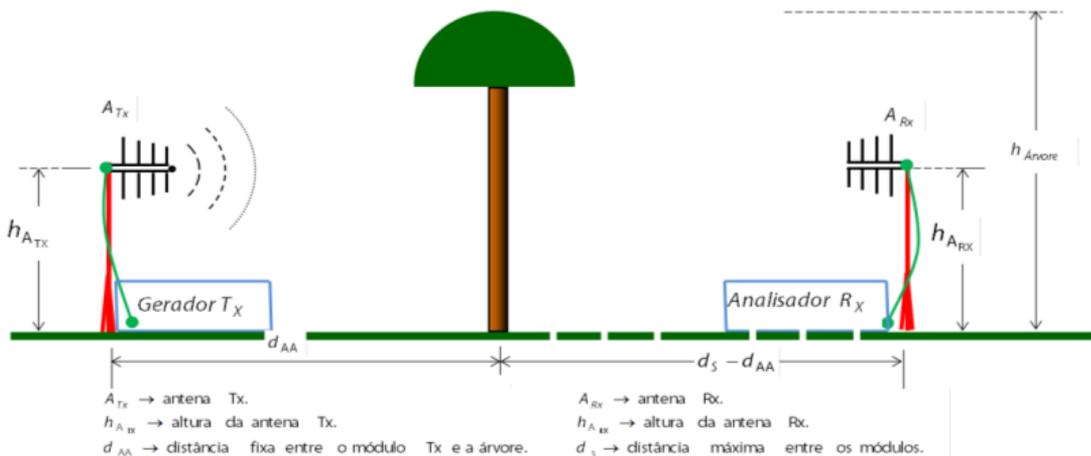


Figura 2: Ilustração da vista lateral do procedimento de medidas utilizado.

## Equipamentos e Configurações

O módulo Tx utilizou o gerador de radiofrequência Rádio Monocanal ACS-10 Stein Telecom para a frequência portadora  $f_1=169,870$  MHz e o Rádio Transceptor Monocanal VHF-FM ST&S para a frequência portadora  $f_2=244,599$  MHz. Ambos têm potência máxima de 30 dBm. O módulo Rx fez uso do analisador de espectro Agilent Technologies E4406A VSA Series Transmitter Tester 7 MHz – 4 GHz. Os módulos utilizaram antenas direcionais do tipo Log-periódica Aquário LVU-11 com onze elementos, impedância de  $75 \Omega$ , ganho de 5,9 dBi, instaladas no topo de torres metálicas com 1" de diâmetro, com as alturas  $h_{ATx}=h_{ARx}=6,0$  m.

O *Set up* dos equipamentos utilizados é ilustrado na Figura 3.

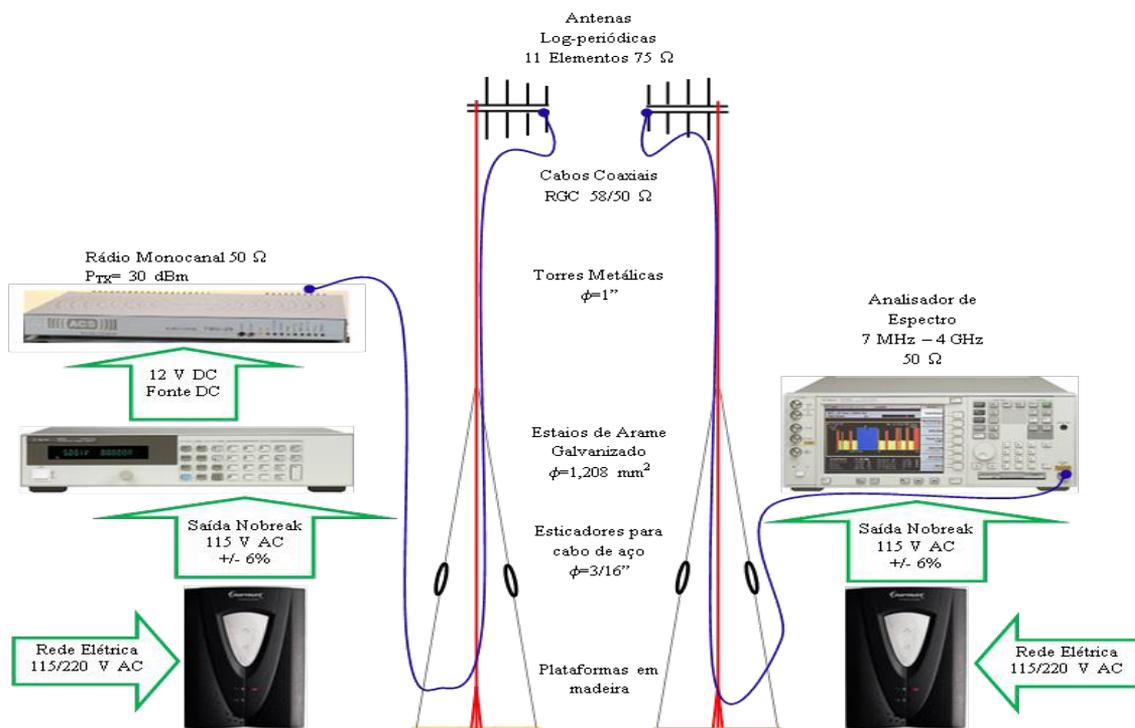


Figura 3: *Set up* dos equipamentos dos módulos transmissor - Tx e receptor - Rx.

## Procedimentos para as Medições

Para a obtenção dos dados da pesquisa (atenuação da intensidade dos sinais de rádio recebidos em função da distância do módulo Tx) foram utilizados como norteadores os diagramas da Figura 4. A distância de 25 m escolhida entre os pontos de medições justifica-se por ser um valor submúltiplo da distância máxima

disponível no local. Na Tabela 1 observa-se que a distância utilizada proporcionou resultados com valores suavemente gradativos.

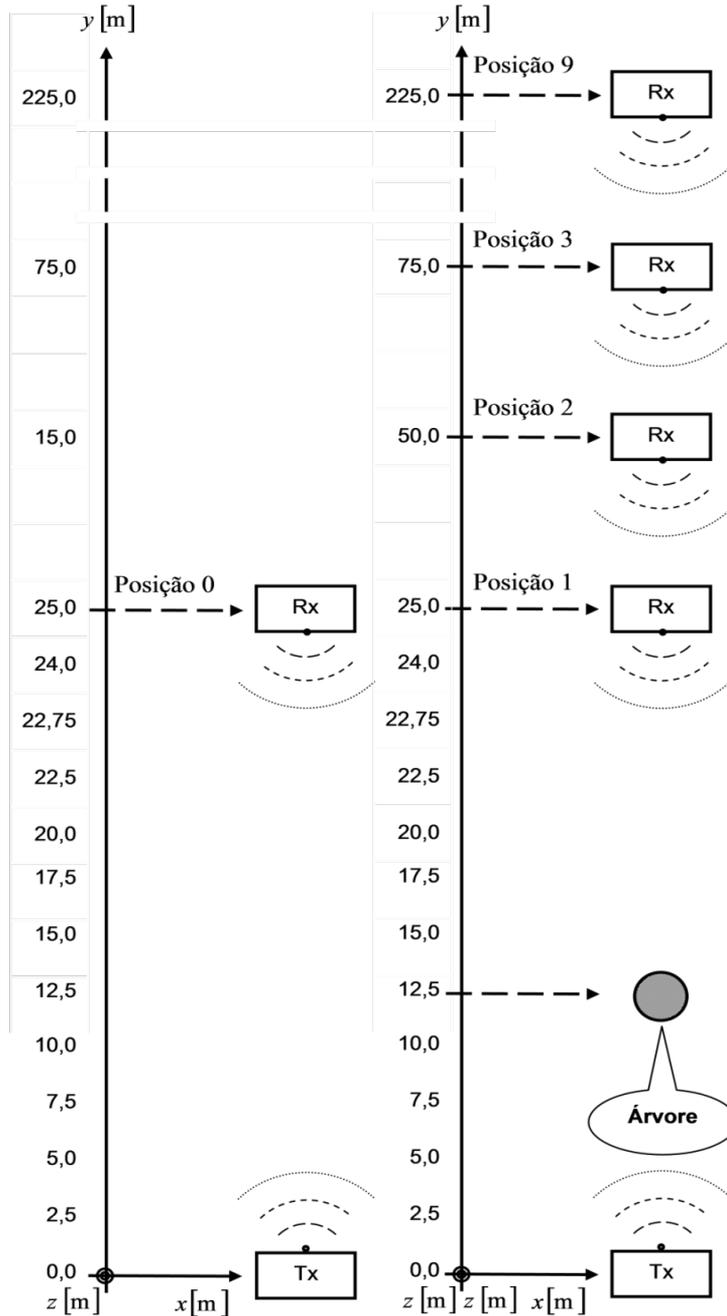


Figura 4: Diagramas dos procedimentos de medições. a) Medição no espaço livre. b) Medição tendo uma árvore como obstáculo.

- Primeira medida: foi feita com o módulo Tx fixado na posição de referência 0,0 e o módulo Rx na Posição 0, na distância  $d_0=25$  m, numa condição sem obstáculos que é denominada espaço livre, como ilustrado no diagrama da Figura 4a. Foram lidas e registradas cinco medidas da amplitude da onda portadora monitoradas na tela do Analisador de Espectro;
- Segunda medida: o módulo Tx foi instalado na posição de referência 0,0 a uma distância  $d_{AA}=12,5$  m (distância entre o módulo Tx e o eixo da árvore) e neste mesmo alinhamento o módulo Rx foi instalado a uma distância de  $d_s-d_{AA}=12,5$  m, como ilustrado no diagrama da Figura 2; na Posição 1, ou seja, a uma distância de 12,5 m após o eixo do caule de  $\varnothing_1=35,33$  cm de diâmetro da árvore correspondente a 25 m do módulo Tx, como ilustrado na 4b. Cinco medidas da amplitude da onda portadora monitoradas foram registradas;
- Terceira medida: deslocado o módulo Rx para a Posição 2 e mantido ambos os módulos no mesmo alinhamento da árvore. O módulo Rx foi posicionado a uma distância  $d_s-d_{AA}=37,5$  m correspondente a 50,0 m do módulo Tx, como ilustrado na Figura 4b. Cinco medidas da amplitude da onda portadora monitorada foram registradas;
- Demais medidas: foram repetidos os mesmos procedimentos anteriores em que o módulo Rx foi deslocado de 25 em 25 m até que chegar na Posição 9, ilustrado na Figura 4b, distante 225 m do módulo Tx;
- O percurso foi utilizado por quatro vezes sendo que uma vez foi na frequência  $f_1=169,870$  MHz com ambas as antenas Tx e de Rx na polarização horizontal – PH, a vez seguinte na mesma frequência, porém com as antenas na polarização vertical – PV, em seguida foi na frequência  $f_2=244,599$  MHz com ambas as antenas em PH e finalmente com esta mesma frequência com as antenas na PV.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Resultados Numéricos

Os valores médios das amplitudes das potências recebidas das ondas portadoras medidas nas frequências  $f_1=169,870$  MHz e  $f_2=244,599$  MHz estão na Tabela 1, abaixo.

Tabela 1: Valores Médios Obtidos das Potências Recebidas.

Posição	Distância $T_x-R_x$ (m)	PH	PV	PH	PV
		$f_1=169,870$ MHz	$f_1=169,870$ MHz	$f_2=244,599$ MHz	$f_2=244,599$ MHz
		Valor Médio (dBm)	Valor Médio (dBm)	Valor Médio (dBm)	Valor Médio (dBm)
0	$d_{0T_x-R_x}= 25$	-10,84	-19,28	-15,99	-18,68
1	$d_{T_x-R_x}= 25$	-11,74	-27,06	-23,98	-21,51
2	$d_{T_x-R_x}= 50$	-17,00	-31,32	-24,15	-21,56
3	$d_{T_x-R_x}= 75$	-20,79	-36,17	-25,95	-24,63
4	$d_{T_x-R_x}= 100$	-21,02	-40,61	-26,09	-26,52
5	$d_{T_x-R_x}= 125$	-22,34	-41,27	-27,27	-31,63
6	$d_{T_x-R_x}= 150$	-31,36	-48,07	-29,46	-35,72
7	$d_{T_x-R_x}= 175$	-32,31	-57,72	-31,69	-42,34
8	$d_{T_x-R_x}= 200$	-33,22	-59,74	-38,70	-47,67
9	$d_{T_x-R_x}= 225$	-40,63	-64,36	-40,17	-49,17

A Tabela 1 mostra que para as quatro condições medidas os resultados como esperados são valores que vão reduzindo de intensidade de forma gradativa ao longo da distância. Este comportamento do sinal influi diretamente no desempenho do modelo.

### Formulações Matemáticas do Modelo

A perda no espaço livre  $L_0$  em dB é calculada pela expressão (SAUNDERS, 2007):

$$L_0 = 32,44 + 20\log_{10}(d_{0[km]}) + 20\log_{10}(f_{0[MHz]}) \quad [1]$$

onde  $d_0$  é a distância do enlace entre Tx e Rx no espaço livre de obstáculos, medida em km e  $f_0$  é frequência de operação do sistema em MHz.

A perda no espaço livre entre o módulo Tx e a primeira árvore  $L_{AA}$  é calculada em dB pela expressão:

$$L_{AA} = 32,44 + 20\log_{10}(d_{AA[km]}) + 20\log_{10}(f_{0[MHz]}) \quad [2]$$

Onde  $d_{AA}$  é a distância entre o módulo Tx e a primeira árvore medida em km e  $f_0$  é frequência de operação do sistema em MHz.

Quando a distância entre os módulos Tx e Rx for menor do que a distância entre o módulo Tx e a primeira árvore, a perda no intervalo entre as árvores  $L_p$  é calculada em dB pela expressão:

$$L_p = 32,44 + 20\log_{10}(d_{S[km]}) + 20\log_{10}(f_{0[MHz]}) \quad [3]$$

Onde  $d_s$  é a distância entre os módulos Tx e Rx medida em km e  $f_0$  é frequência de operação do sistema em MHz.

Quando a distância entre os módulos Tx e Rx for maior do que a distância entre o módulo Tx e a primeira árvore, a perda  $L_p$  é calculada em dB pela expressão:

$$L_p = [A\log_{10}(d_{S[km]} - d_{AA[km]})] + B + L_{AA} \quad [4]$$

Onde A é uma constante, o termo  $(d_{S[km]} - d_{AA[km]})$  representa a distância entre a árvore e o módulo Rx medida em km, B é uma constante e  $L_{AA}$  é a perda no espaço livre entre o módulo Tx e a primeira árvore medida em dB.

A perda do sinal medido  $L_M$  em dB é expressa por:

$$L_M = (P_{Tx} + G_{Tx} + G_{Rx} - L_{TC}) - P_{Rx} \quad [5]$$

A predição de perda na floresta  $L_{PM}$  com o sistema operando apenas na frequência de 300 MHz é calculada em dB pela expressão:

$$L_{PM} = A\log_{10}(d_{S[km]}) + B \quad [6]$$

Onde A é uma constante,  $d_s$  é o comprimento da distância da floresta simulada medida em km e B é uma constante.

Utilizando [6] para o cálculo da predição de perda em dB na floresta  $L_{PM}$ , sendo a frequência  $f_1 = 169,870$  MHz com as antenas Tx e Rx na polarização vertical, os valores encontrados para as constantes  $A_{V1}$  e  $B_{V1}$  foram:

$$A_{V1} = 36,58 \quad \text{e} \quad B_{V1} = -51,85$$

Assim, [6] fica na forma:

$$L_{PM} = 36,58 \log_{10}(d_{[km]}) - 51,85 \quad [7]$$

Portanto, o valor do expoente de perda  $n$  é definido por:

$$n = \frac{36,58}{10} = 3,65 \quad [8]$$

Então, a previsão de perda do modelo  $L_{PM}$  para várias árvores como ilustrado na Figura 5 é calculada em dB pela expressão:

$$L_{PM} = \left[ \sum_{n=1}^M 35,58 \log_{10}(d_{S[km]} - d_{AA[km]}) + (0,5 \times 51,85) \right] + L_{AA} \quad [9]$$

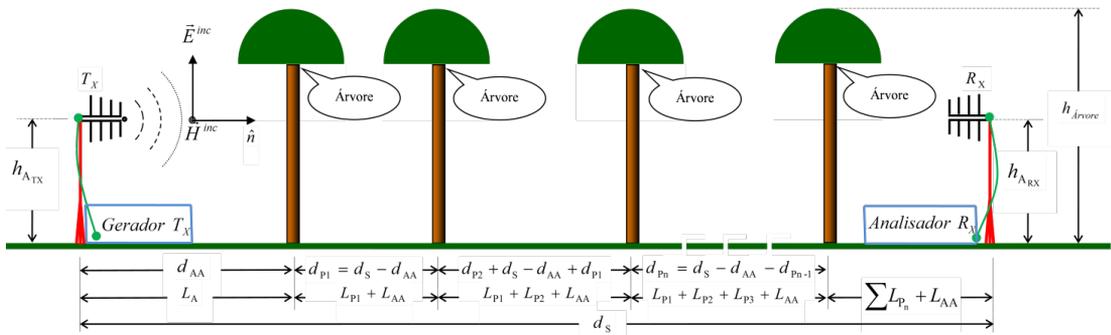


Figura 5: Ilustração da transmissão de sinal de rádio nas frequências  $f_1=169,870$  MHz e  $f_2=244,599$  MHz na faixa de VHF, utilizando antenas log-periódicas na polarização vertical, tendo como obstáculos várias árvores.

Onde  $M$  é o número total de árvores,  $d_s$  é o comprimento da distância entre os módulos Tx e Rx medida em km,  $d_{AA}$  é a distância entre o módulo Tx e a primeira árvore medida em km,  $n$  é o valor do expoente de perda,  $d_p$  é a distância entre as árvores medida em km e  $L_0$  é a perda no espaço livre em dB.

A potência do sinal recebido  $P_{R_x}$  é calculada em dB pela expressão:

$$P_{R_x} = P_{T_x} + G_{T_x}(\theta, \phi) + G_{R_x}(\theta, \phi) - L_{PM} - L_{TC} \quad [10]$$

Onde  $P_{Tx}$  é a potência transmitida em dBm,  $G_{Tx}$  é o ganho da antena do módulo Tx em dBi,  $G_{Rx}$  é o ganho da antena do módulo Rx em dBi,  $L_{PM}$  é a previsão de perda do modelo em dB e  $L_{TC}$  é a perda total nos cabos de RF em dB.

Das quatro campanhas de medições, cujos resultados constam na Tabela 1, este artigo apresenta o modelo matemático produzido apenas para a frequência portadora  $f_1=169,870$  MHz com as antenas Tx e Rx na polarização vertical. Foi nesta frequência que a metodologia aplicada apresentou melhor desempenho, ou seja, menor atenuação. Foram escolhidas as frequências portadoras  $f_1=169,870$  MHz e  $f_2=244,599$  MHz pelos fatos de estarem dentro da faixa de VHF e terem seus comprimentos de onda, principalmente  $f_2$ , próximos a um metro, como pretendido.

## Resultados Gráficos

Na Figura 6 tem-se os gráficos dos níveis médios das intensidades do sinal radioelétrico medido após as árvores como obstáculo, com as antenas Tx e Rx nas polarizações horizontal e vertical em função da distância em nove pontos diferentes distanciados em 25 m, de acordo com a localização das posições de 1 a 9 (correspondentes a 25 - 225 m), como ilustrado nas Figuras 2 e 4b. O sinal na  $f_1$  em PH apresenta melhor resultado por apresentar menor atenuação.

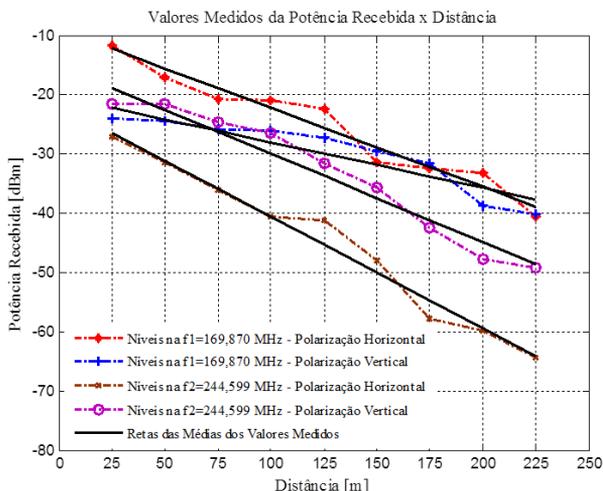


Figura 6: Gráficos dos níveis médios de potência dos sinais recebidos medidos na frequência portadora de  $f_1=169,870$  MHz e de  $f_2=244,599$  MHz além das retas das médias dos valores medidos.

Na Figura 7 tem-se os gráficos do desempenho do modelo desenvolvido no artigo. As perdas de potência simuladas pelo modelo apresentam desempenho

satisfatório com vários pontos muito próximos aos das perdas de potência medidas na região com vegetação.

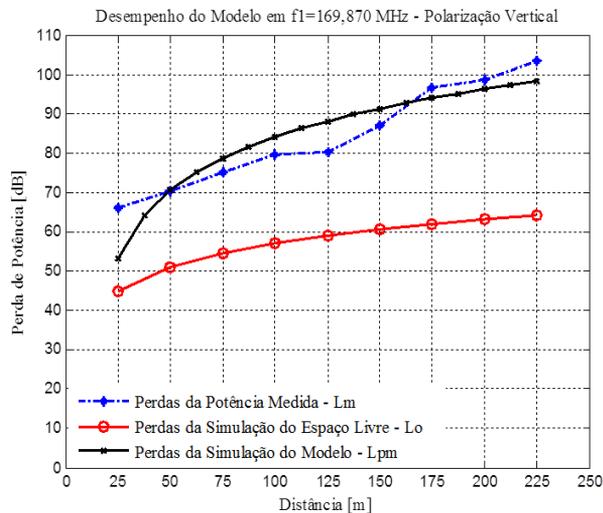


Figura 7: Gráficos do desempenho do modelo desenvolvido no artigo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados em formas de figuras demonstram os sucessos dos modelos desenvolvidos para a propagação do sinal radioelétrico por meio de uma vegetação de densidade média, em terreno plano, desde que os elementos do sistema de radiação estejam posicionados abaixo das copas das árvores e operem na faixa de frequência de VHF. Observou-se que os obstáculos de maior impacto para esta propagação do sinal, considerando-se também a perda no espaço livre, foram os troncos das árvores. Tendo o comprimento de onda do sinal radioelétrico de aproximadamente 1 m, os modelos provam que este sinal pode contornar os troncos das árvores e de acordo com a potência aplicada espalhar-se por longas distâncias.

Sabe-se que um percurso de 225 m no interior da Floresta Amazônica é uma distância muito curta. Sugere-se que sejam utilizando-se equipamentos adequados e por meio de condições satisfatórias de deslocamento da equipe de pesquisadores e dos equipamentos, que a distância entre os módulos Tx e Rx seja estendida para pelo menos dez vezes maior que a utilizada nesta pesquisa no interior de uma floresta de castanheiras.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, que nos concedeu ajuda financeira para custear esta pesquisa. Agradecemos também ao acolhimento e apoio do professor Gervásio P. dos Santos Cavalcante e de seus colaboradores do Laboratório de Computação e Telecomunicações da Universidade Federal do Pará - UFPA.

## REFERÊNCIAS

DIAS, M. H. C.; ALEM, R. A.; SANTOS, J. C. A. Análise Crítica do Modelo de Tamir para Predição de alcance de Rádio-Enlaces em Florestas, in 9<sup>th</sup> Int. Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS) 2010, Rio de Janeiro – RJ, Brasil, vol. 1, pp. 1-7, 13-15 Dez 2010.

DAL BELLO, J. C. R.; ASSIS, M. S. Comunicações táticas na região amazônica – 1ª Parte”, Revista Militar de Ciência e Tecnologia, vol IX, nº 3, pp. 12-20, 1992.

DAL BELLO, J. C. R.; ASSIS, M. S. Comunicações táticas na região amazônica – 2ª Parte”, Revista Militar de Ciência e Tecnologia, vol IX, nº 4, pp. 7-19, 1992.

World Wide Fund for Nature – WWF-Brasil. Castanheira do Brasil: grandiosa e ameaçada. Disponível em: [wwf.org.br/natureza\\_brasileira](http://wwf.org.br/natureza_brasileira). Acesso em 28 mai. 2016.  
LEE, W. C. Y. *Mobile communications design fundamentals*. 2th Edition. New York - U.S.A: John Wiley & Sons, 1993.

CÁTEDRA, M. F.; PÉRES-ARRAIAGA, J. *Wireless Communication*. Boston, Artech House, 1999.

ANATEL. Serviço de Radiocomunicação Fixo e Móvel. Disponível em: [sistemas.anatel.gov.br](http://sistemas.anatel.gov.br). Acesso em 28 mai. 2016.

TAMIR, T. *On Radio Wave Propagation in Forest Environments*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-15, no. 6, PP. 806-817, Nov, 1967.

GOOGLE EARTH 2. Disponível em <http://www.google.com/earth>. Acesso em 28 mai. 2016.

SAUNDERS, S. R.; ARAGÓN-ZAVALA, A. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems* – 2. ed. – USA: Wiley, 2007.