

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS MEDIDAS

Neste capítulo será feita uma breve descrição do programa STADIS, que foi especialmente desenvolvido para o processamento completo das medidas. Este programa computacional está apresentado detalhadamente no apêndice B. Em seguida, serão feitas análises do desvanecimento rápido, que é a parte principal deste trabalho, e da variação da média do campo recebido

5.1 PROGRAMA DESENVOLVIDO (STADIS)

O programa STADIS é um programa computacional que tem por objetivo a realização de análises estatísticas e determinísticas de dados de qualquer natureza, no que pese ter sido desenvolvido para a realização de estudos de caracterização da influência da vegetação nos Sistemas de Comunicações Móveis Celulares. O STADIS foi totalmente programado de forma “amigável ” em ambiente MATLAB, isto é, interage constantemente com o usuário e sua inicialização se dá com a digitação da palavra “sta” no MATLAB.

O STADIS é composto de 1 sub-rotina gerente (STA) e 6 sub-rotinas sub-gerentes (STA1CREA - STA2SEC - STA3LOSS - STA4DIST - STA5FOR e STA6TOOL) que administram o funcionamento de mais de 100 outras sub-rotinas auxiliares, conforme pode ser visualizado na

figura 5.1. O STADIS possui mais de 10 000 linhas de programação e está apresentado no apêndice B.

Os dados, inicialmente apresentados em matrizes $N \times 2$, onde N é o número de amostras realizadas, são transformados em matrizes $MTXF$ ($N \times 15$), para análises determinísticas, e em matrizes $MPCF$ ($N \times 15$), para análises estatísticas.

No que pese o programa STADIS ter sido programado para ser utilizado com 4 frequências, 2 polarizações, 7 alturas de transmissão e 15 pontos de recepção, para atender aos objetivos deste trabalho, o mesmo pode ser facilmente modificado para se tornar um programa geral.

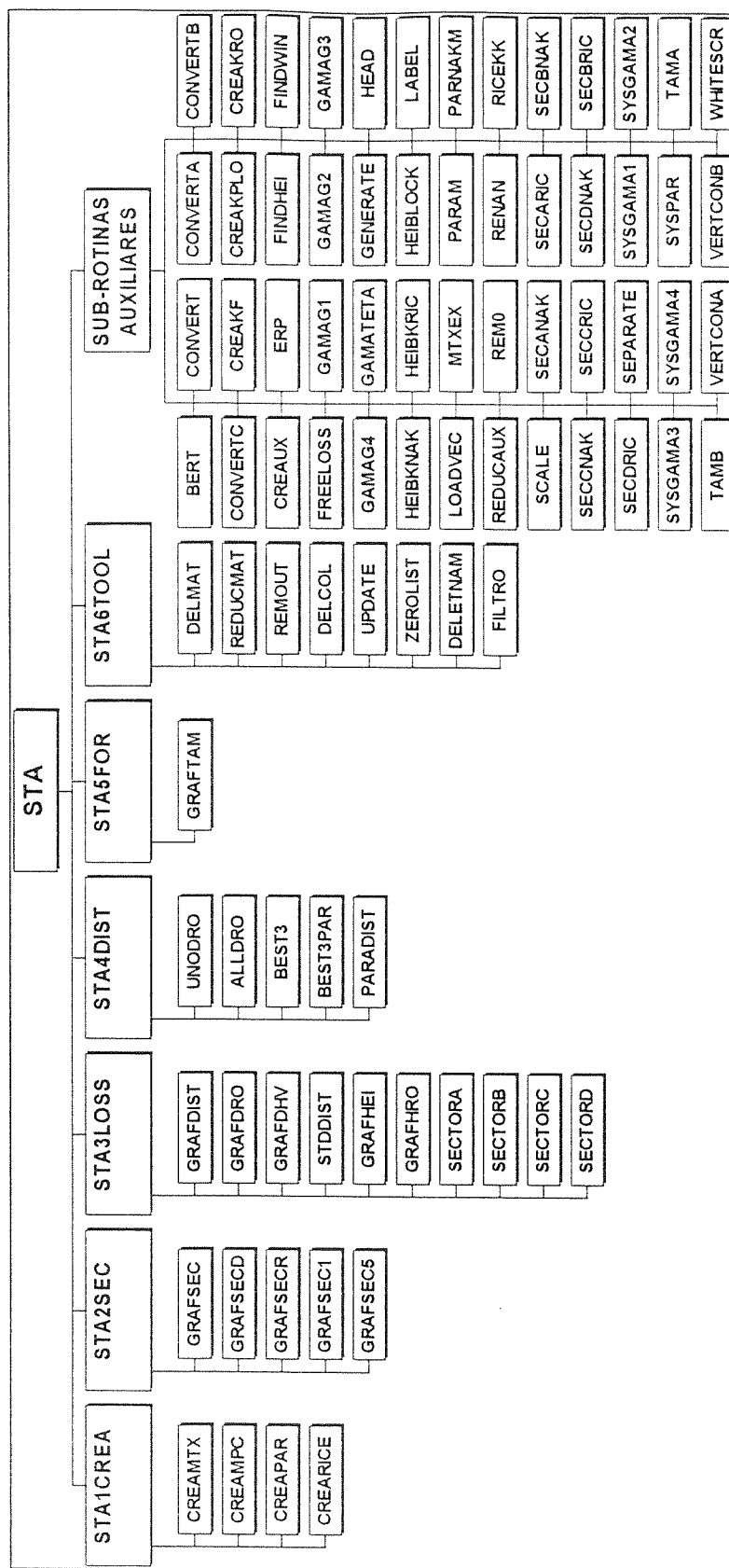


Fig. 5.1- Organograma do programa STADIS

5.2 ANÁLISE DO DESVANECIMENTO RÁPIDO

Para a realização da análise estatística (e também determinística) das medidas realizadas, após a completa preparação dos arquivos, conforme foi apresentado no capítulo 4, um grande banco de dados composto de 428 arquivos foi utilizado.

Uma amostra do sinal medido está apresentado na figura 4.8. O desvanecimento multipercurso (rápido) evidente nesta figura é provavelmente causado pelas variações temporais das fases relativas das componentes multipercurso, resultante das movimentações das folhas e dos ramos das árvores (provocadas pelos ventos), pelo tráfego local de veículos e pela movimentação de pessoas nas vizinhanças do receptor. A energia, chegando ao receptor por um grande número de percursos diferentes, provoca o desvanecimento rápido do sinal.

Pela análise dos resultados obtidos com as medições pode-se concluir que desvanecimentos rápidos até da ordem de 6dB podem ocorrer e sua dependência com a distância e altura da estação base será apresentada a seguir.

Conforme foi mostrado por inúmeros autores[1-8], quando o sinal recebido por diferentes percursos chega ao receptor com amplitudes semelhantes a tensão recebida segue a distribuição de Rayleigh e, neste caso, não há um raio dominante contribuindo para o sinal na recepção. De outra forma, quando a contribuição de um determinado raio é

significativamente maior que a contribuição dos demais raios, como ocorre, por exemplo, nos radioenlaces em visada direta, a distribuição da tensão recebida é melhor descrita pelas distribuições de Rice ou Nakagami. Neste trabalho, as distribuições construídas a partir das medições realizadas são comparadas com as distribuições de Rayleigh, Nakagami e Rice. Um exemplo de função distribuição de probabilidade obtida a partir da tensão medida está apresentada na figura 5.2.

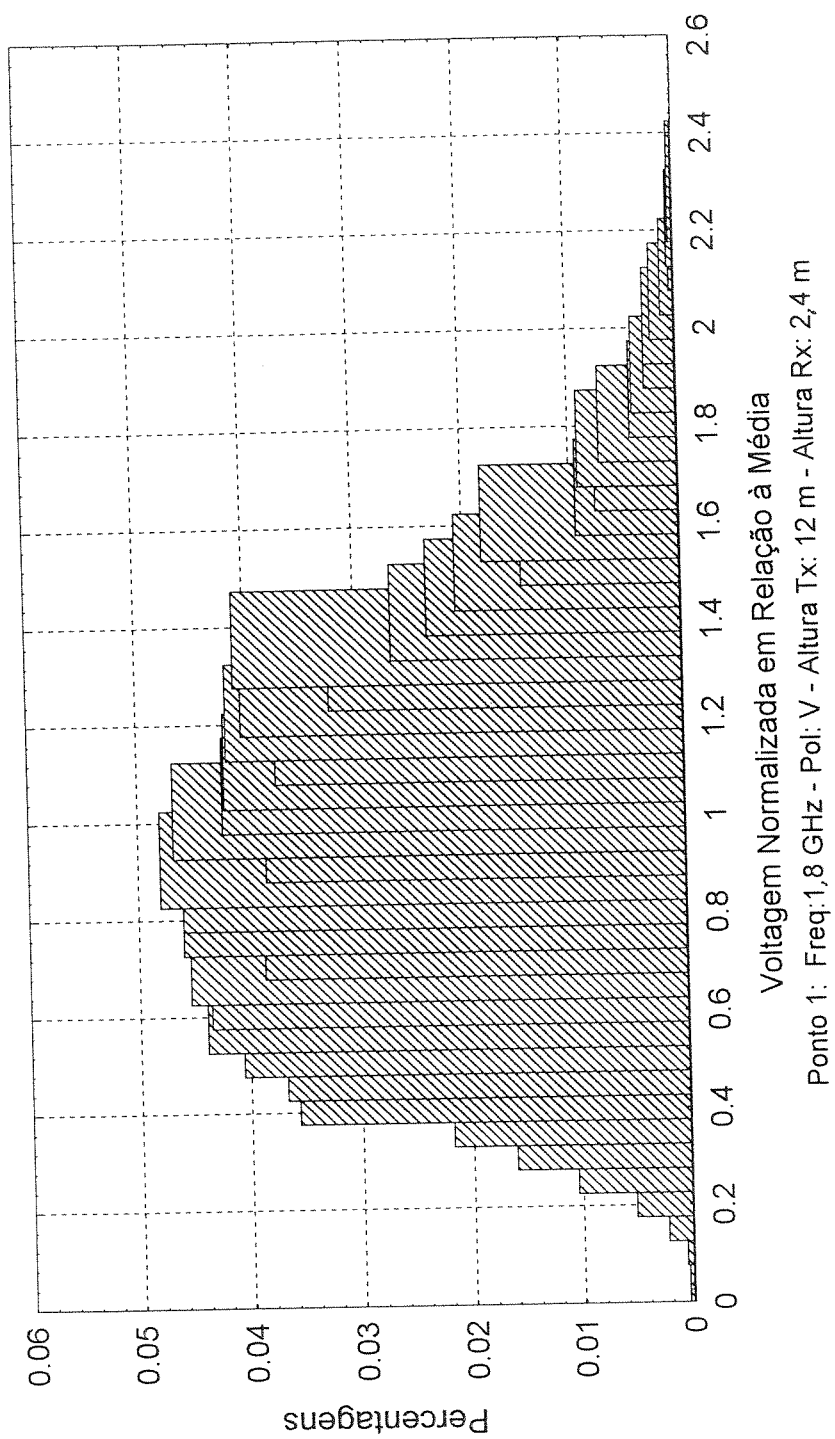


Fig 5.2 – Exemplo de função distribuição de probabilidade obtida

TESTE DE ESTACIONARIEDADE:

Talvez a forma mais simples de se avaliar a estacionariedade de dados aleatórios é se considerar a física do fenômeno que produz os dados[6]. Se os fatores físicos básicos que geram o fenômeno são invariantes no tempo, então a estacionariedade dos dados resultantes podem ser aceitos sem estudos mais detalhados ou aprofundados. Na prática, entretanto, os dados são freqüentemente obtidos em circunstâncias que não permitem a assunção da estacionariedade baseada em considerações físicas simples, devendo ser avaliada, nestes casos, a partir de estudos das amostras adquiridas. Em todo caso, existem certas premissas que podem ser feitas para se verificar a estacionariedade dos dados:

- Primeiro, deve ser assumido que as amostras adquiridas refletirão propriamente o caráter não-estacionário (ou não) do processo em questão;
- Segundo, deve ser assumido que a amostra adquirida (gravada) é muito grande quando comparada com a componente de frequência mais baixa presente nos dados, excluindo a média não-estacionária.

As medidas foram realizadas, no Campo de Santana, em 15 pontos fixos e as amostras foram obtidas em intervalos de tempo de aproximadamente 30 segundos. Como não há o efeito de sombreamento (as medidas foram realizadas em pontos fixos) e as amostras foram adquiridas em pequenos intervalos de tempo, a estacionariedade do processo está garantido. Além disso, utilizando-se o software STADIS, testou-se inúmeras amostras verificando-se sua a variação temporal de sua média em intervalos de 1, 2 e 5 segundos, tendo-se constatado a estacionariedade do processo.

O TESTE DO QUI-QUADRADO:

De forma a se verificar o grau de ajustamento entre a distribuição das tensões medidas e as distribuições teóricas foi escolhido o teste do qui-quadrado[8]. Neste teste, o grau relativo de ajustamento é definido pelo seguinte parâmetro:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(m_j - t_j)^2}{t_j} \quad (5.1)$$

onde:

m_j – é o valor da função distribuição de probabilidade deduzida a partir dos valores de tensão medidos correspondente à tensão $j \cdot \Delta v$;

ΔV – é o intervalo de discretização e

t_j – é o valor correspondente para uma distribuição teórica particular.

Quando os resultados teóricos e as medições se ajustam $\chi^2 = 0$ enquanto que grandes valores de χ^2 indicam que as distribuições teóricas e medidas divergem.

A PROVA DE KOLMOGOROV - SMIRNOV:

A prova de Kolmogorov-Smirnov de uma amostra é uma prova de aderência que compara as distribuições acumuladas teórica e observada (medida).

Seja $F_o(X)$ uma distribuição de frequência acumulada completamente especificada, isto é, para qualquer valor de X , $F_o(X)$ é a proporção de casos esperados com escores iguais ou menores do que X .

Seja $S_N(X)$ a distribuição de frequência acumulada de uma amostra aleatória de N observações. Quando X é qualquer escore possível, $S_N(X)=k/N$, onde k é o número de observações não superiores a X .

Considerando que a amostra tenha sido extraída da distribuição teórica especificada, espera-se que para cada valor de X , $S_N(X)$ esteja suficientemente próximo de $F_o(X)$, o que equivale a dizer que as diferenças entre $S_N(X)$ e $F_o(X)$ sejam pequenas e estejam dentro dos limites dos erros aleatórios. A prova de Kolmogorov-Smirnov focaliza a maior dessas diferenças, que é chamada de *desvio máximo* (D), que pode ser determinada a partir da seguinte expressão:

$$D = \text{máximo} | F_o(X) - S_N(X) | \quad (5.2)$$

O valor do desvio máximo pode se calculado pela seguinte expressão:

$$\text{Onde } D = 1,36/(N)^{1/2} \quad (5.3)$$

Via de regra, a prova de Kolmogorov-Smirnov é aplicada para um número pequeno N de observações.

Uma forma conveniente de se analisar o desvanecimento rápido é através da distribuição Riceana, devido à possível interpretação física do seu fator K (item 3.1.1), que é definido como sendo igual à relação entre a potência do sinal dominante e a potência disponível nas componentes randômicas que chegam ao receptor através de percursos múltiplos. Uma importante característica da distribuição Riceana, quando interpretada pelo seu fator K , é que se $K = 0$ a PDF tende para uma distribuição de Rayleigh e se $K \gg 1$ a PDF se torna uma distribuição Gaussiana. A função densidade de probabilidade (PDF) da distribuição Riceana foi apresentada no item 3.1.

A PDF da distribuição de Nakagami é uma expressão mais geral que a distribuição Riceana e a flexibilidade de seu parâmetro m permite, geralmente, seu ajustamento à distribuição obtida com as medições. Se $m=1$ obtêm-se a PDF de Rayleigh e se $m=1/2$ uma Gaussiana é obtida.

Para que fosse possível a análise do desvanecimento rápido todas as medidas foram processadas utilizando-se o programa STADIS. Determinando-se adequadamente os parâmetros das distribuições de Rice e Nakagami, um bom ajustamento a estas distribuições foi conseguido na maioria dos casos. Quando estas duas distribuições ajustam-se aos resultados experimentais, o valor do χ^2 obtido com o ajustamento é aproximadamente o mesmo e geralmente inferior a 10.

Realizando-se a prova de Kolmogorov – Smirnov com as distribuições ajustadas pelo método do Qui-quadrado, observou-se que a aderência é conseguida na maioria dos casos, às vezes através de pequenos

ajustes no valor do fator K da distribuição Riceana. De qualquer forma, como o fator K é utilizado, neste trabalho, para interpretações físicas da propagação multipercurso, pequenas variações de seu valor não são significantes para a compreensão física global do problema.

Exemplos de ajustamento da distribuição Riceana às medidas estão apresentados nas figuras 5.3-a e 5.3-b. Os resultados do fator K obtidos para as medições realizadas estão mostrados nas tabelas 5.1-a a 5.1-e.

Devido à importância da visualização do ajustamento obtido com a distribuição Riceana, histogramas tridimensionais foram construídos para todas as situações e um exemplo está apresentado na figura 5.4.

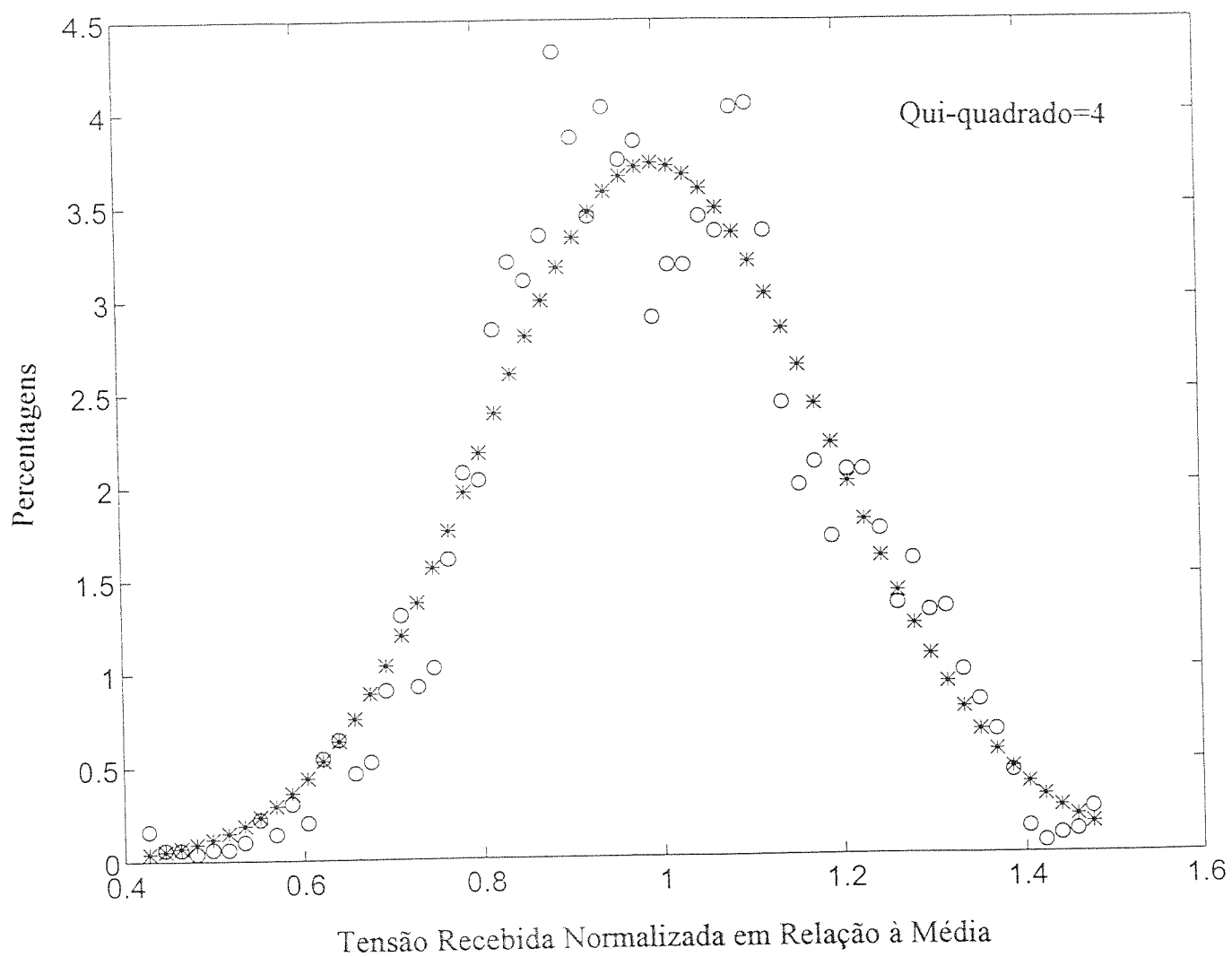


Fig. 5.3-a – Ajustamento da distribuição Riceana às medidas

Ponto: 4 (C2) - Freq: 1,8 GHz - Pol: V - Altura Tx: 32m

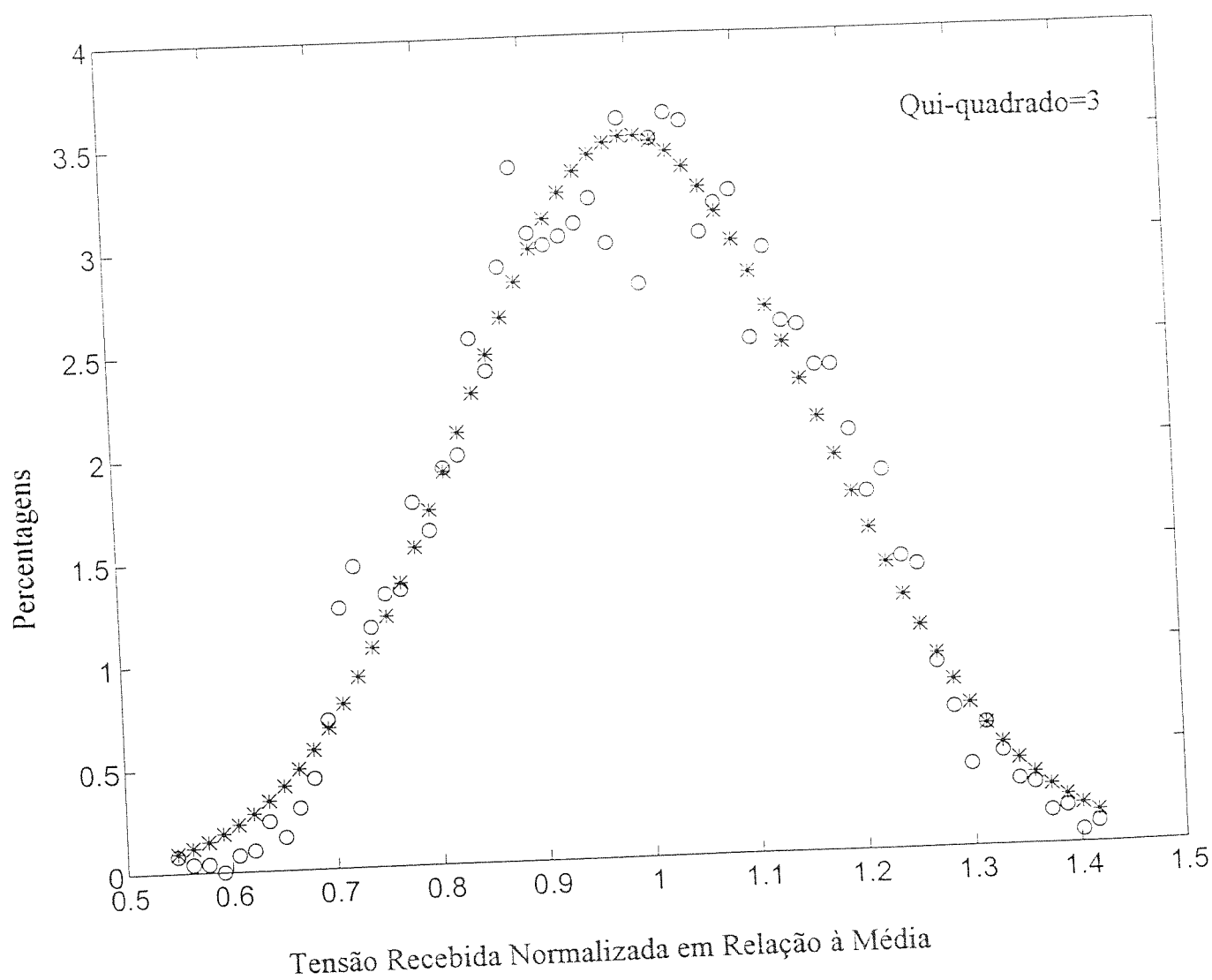


Fig. 5.3-b – Ajustamento da distribuição Riceana às medidas

Ponto: 7 (R2) - Freq: 1,5 GHz - Pol: V - Altura Tx: 84m

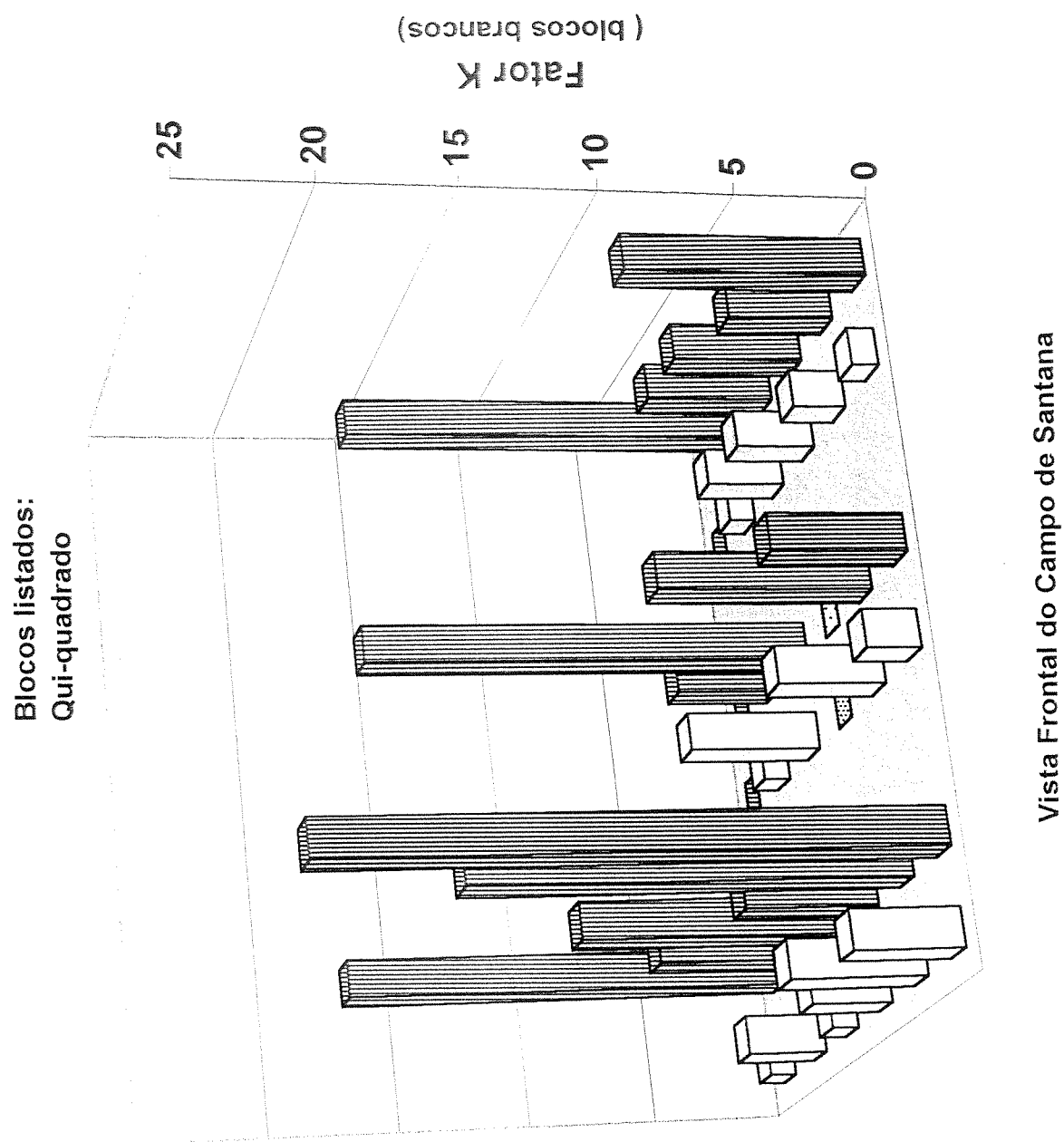


Fig. 5.4 – Variação do fator K de Rice com a distância para
freq=1,8GHz - Pol.:V - Altura Tx: 16 m - Altura Rx: 2,4 m

FATOR K

Frequência: 900 MHz Polarização: Horizontal

		ALTURAS							
SETOR	PONTOS	1	2	3	4	5	6	7	8
A	C1	4	*	36	4	*	35	*	51
	L1	11	*	45	88	100	*	*	100
	L2	97	*	87	*	100	39	*	*
	C2	6	*	*	*	*	100	*	23
	R1	17	*	1	8	59	19	*	41
B	L3	17	*	100	12	41	66	*	46
	R2	100	*	3	28	100	91	*	100
	L4	28	*	40	56	31	11	*	100
C	R3	17	*	19	15	6	28	*	*
	L5	44	*	76	43	32	2	*	*
	R4	32	*	34	5	16	35	*	100
	C4	19	*	20	37	38	15	*	6
D	R5	10	*	*	27	*	71	*	100
	L6	18	*	50	100	14	100	*	100
	C5	12	*	36	10	6	11	*	2

Tabela 5.1-a – Fator K para f=900 MHz e pol.: H

FATOR K

Frequência: 900 MHz Polarização: Vertical

		ALTURAS							
SETOR	PONTOS	1	2	3	4	5	6	7	8
A	C1	*	*	2	*	29	23	*	*
	L1	100	*	100	*	100	100	*	*
	L2	100	*	*	*	88	100	*	*
	C2	100	*	10	*	13	23	*	31
	R1	100	*	16	*	100	100	*	91
B	L3	22	*	45	*	100	100	*	95
	R2	6	*	3	*	15	100	*	31
	L4	99	*	100	*	3	100	*	*
	R3	11	*	17	*	15	29	*	5
C	L5	100	*	37	*	2	100	*	79
	R4	40	*	63	*	3	100	*	44
	C4	31	*	7	*	*	2	*	3
	R5	9	*	14	*	15	75	*	38
D	L6	63	*	5	*	12	100	*	54
	C5	27	*	56	*	1	55	*	2

Tabela 5.1-b – Fator K para f=900 MHz e pol.: V

FATOR K

Frequência: 1.2 GHz Polarização: Vertical

		ALTURAS							
SETOR	PONTOS	1	2	3	4	5	6	7	8
A	C1	1	19	*	*	16	27	4	41
	L1	9	23	*	*	24	50	40	36
	L2	6	23	*	*	12	100	16	28
	C2	8	10	*	*	100	2	30	66
	R1	9	8	*	*	20	100	25	11
B	L3	1	16	*	*	61	41	98	100
	R2	2	14	*	*	85	9	1	20
	L4	8	6	*	*	1	25	51	13
C	R3	1	13	*	*	9	14	100	6
	L5	7	9	*	*	39	8	86	77
	R4	7	1	*	*	9	100	100	*
	C4	11	13	*	*	71	*	100	100
D	R5	3	100	*	*	12	1	47	1
	L6	18	1	*	*	16	6	73	*
	C5	11	13	*	*	71	4	30	39

Tabela 5.1-c – Fator K para f=1,2 GHz e pol.: V

FATOR K

Frequência: 1.5 GHz Polarização: Vertical

		ALTURAS							
SETOR	PONTOS	1	2	3	4	5	6	7	8
A	C1	1	11	*	57	16	13	100	*
	L1	6	100	*	100	100	27	69	*
	L2	1	39	*	98	41	100	100	*
	C2	7	11	*	9	2	12	40	*
	R1	55	56	*	13	33	100	100	*
B	L3	10	100	*	100	27	29	45	*
	R2	4	24	*	75	8	17	11	*
	L4	31	26	*	13	1	3	100	*
	R3	1	24	*	7	2	67	100	*
C	L5	4	35	*	2	8	2	45	*
	R4	30	64	*	10	29	100	96	*
	C4	33	3	*	19	51	47	100	*
	R5	4	12	*	25	6	1	50	*
D	L6	22	3	*	5	16	2	100	*
	C5	4	5	*	61	10	14	9	*

Tabela 5.1-d – Fator K para f=1,5 GHz e pol.: V

FATOR K

Frequência: 1.8 GHz Polarização: Vertical

		ALTURAS							
SETOR	PONTOS	1	2	3	4	5	6	7	8
A	C1	7	7	*	100	60	100	27	12
	L1	4	100	*	100	27	100	25	41
	L2	2	60	*	100	100	73	31	21
	C2	13	23	*	6	15	16	41	1
	R1	3	7	*	52	100	100	100	100
B	L3	2	10	*	88	100	68	65	3
	R2	3	9	*	20	35	10	8	6
	L4	12	1	*	2	23	50	1	8
	R3	4	21	*	3	3	15	32	9
C	L5	3	11	*	9	1	8	1	8
	R4	6	13	*	2	5	10	7	4
	C4	26	62	*	8	100	100	20	80
	R5	7	7	*	10	20	48	50	6
D	L6	7	11	*	8	12	6	*	15
	C5	7	4	*	3	100	19	7	3

Tabela 5.1-e – Fator K para f=1,8 GHz e pol.: V

Alternativamente, os valores do fator K obtidos para os 15 pontos de recepção estão apresentados nas figuras 5.5-a a 5.5-c, para as várias alturas da estação base, polarização e frequências de 1,2 ; 1,5 e 1,8 GHz. Uma outra forma de apresentar estes resultados pode ser visualizado nas figuras 5.6-a a 5.6-e, onde os resultados são mostrados por camadas. Nas figuras 5.7-a a 5.7-d são apresentadas as curvas de fator K para pequenas alturas da estação base (média dos valores de fator K obtidos com as alturas 1,2 e 3), alturas intermediárias (média dos valores de fator K obtidos com as alturas 4 e 5) e grandes alturas (média dos valores de fator K obtidos com as alturas 6, 7, e 8).

O fator K permite uma interpretação física que é muito útil para se analisar os resultados obtidos: quando seu valor é grande, da ordem de poucas dezenas, indica a existência de um raio dominante. Quando seu valor é pequeno, da ordem de poucas unidades, indica que o raio dominante não é importante e praticamente não existe. Para a frequência de 900 MHz, apesar de não ficar clara a existência de um raio dominante em todas as situações, quase sempre o mesmo existe, com a distribuição tendendo para uma Gaussiana quando os valores do fator K são elevados. Nas partes totalmente cobertas pela vegetação observa-se uma nítida diminuição dos valores do fator K, mostrando a diminuição da influência do raio dominante que, entretanto, continua existindo. Nas frequências de 1,2; 1,5 e 1,8 GHz o fator K, conforme está mostrado nas figuras 5.5 a 5.7, assume pequenos valores quando a estação-base é baixa, muitas vezes próximo ou igual à unidade, particularmente nos pontos de medição localizados totalmente no interior da vegetação, o que indica que a distribuição Riceana tende para a de Rayleigh e não há um raio dominante. Para grandes alturas de transmissão, o fator K geralmente assume valores maiores que 10, dependendo da localização do ponto de recepção.

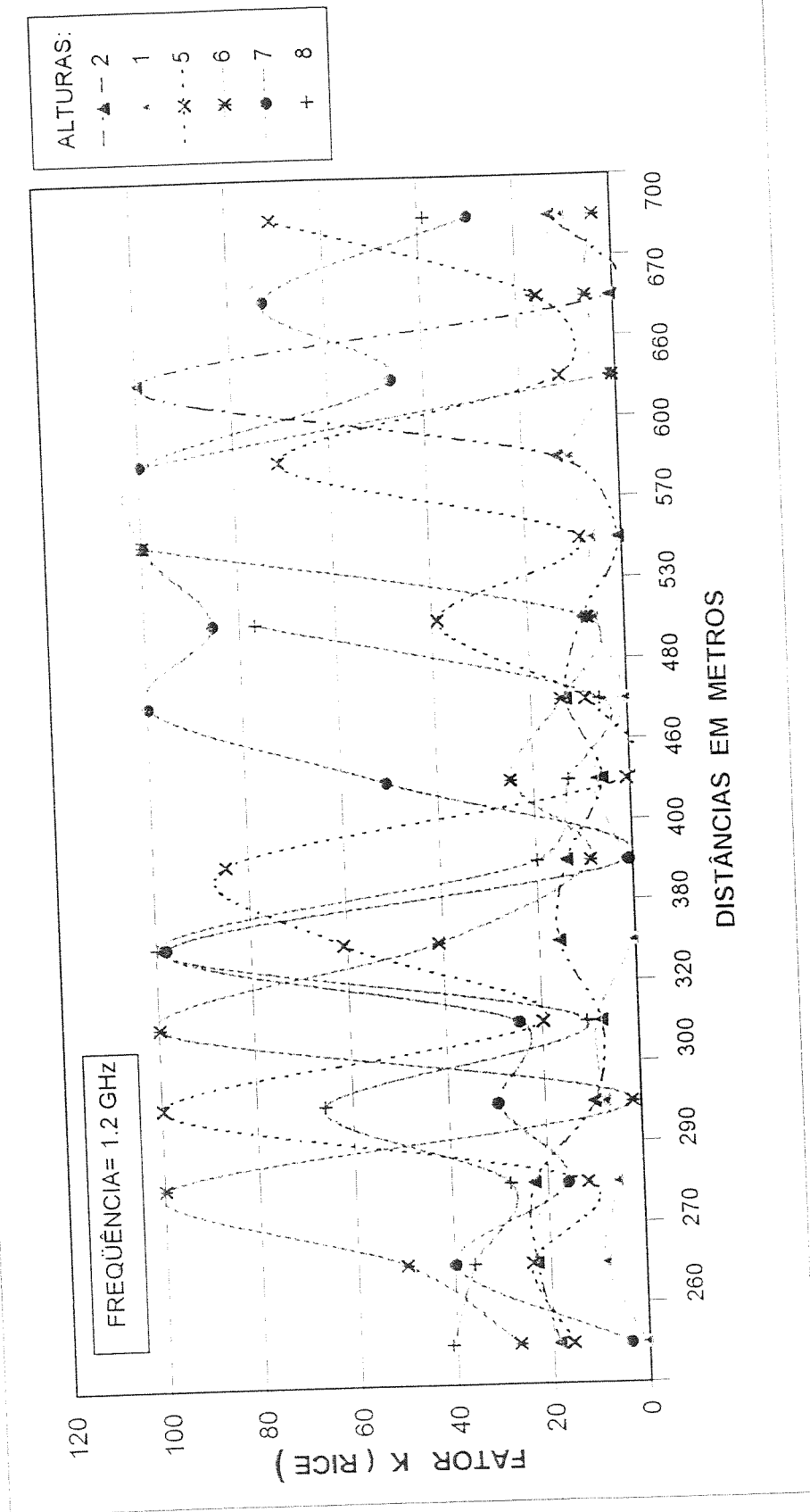


Fig. 5.5-a - Variação do fator K da distribuição de Rice em função da distância

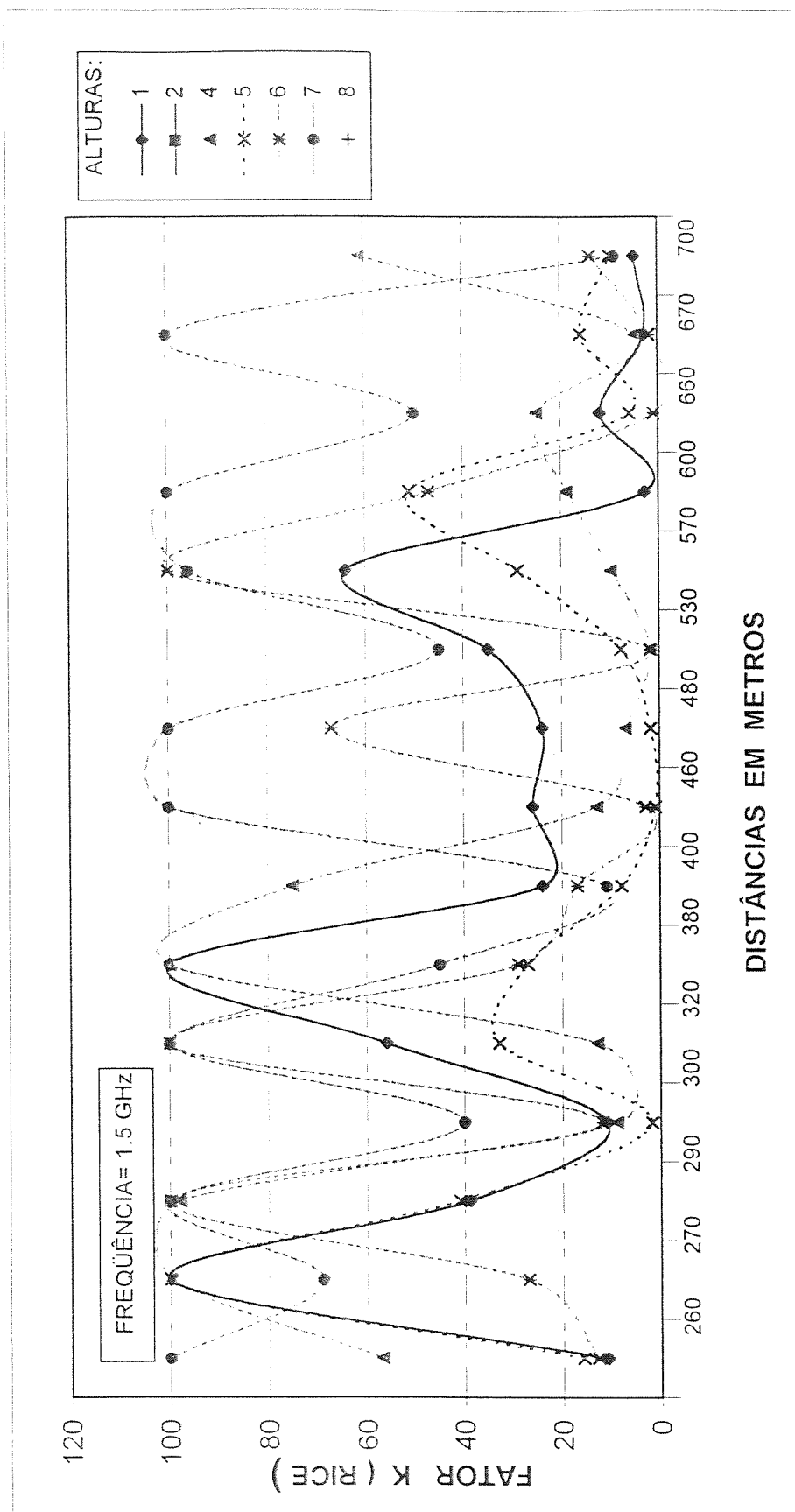


Fig. 5.5-b - Variação do fator K da distribuição de Rice em função da distância

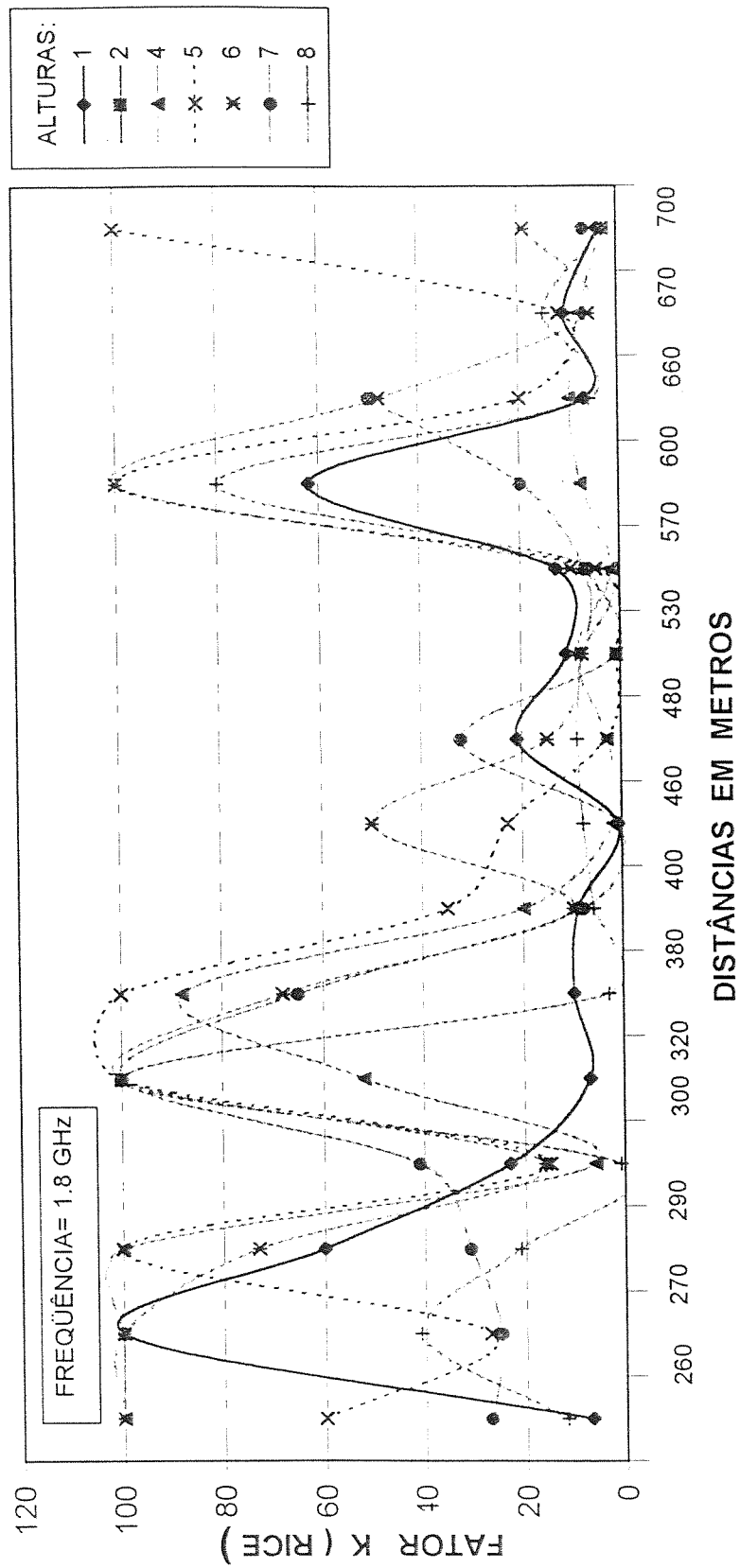


Fig. 5.5-c - Variação do fator K da distribuição de Rice em função da distância

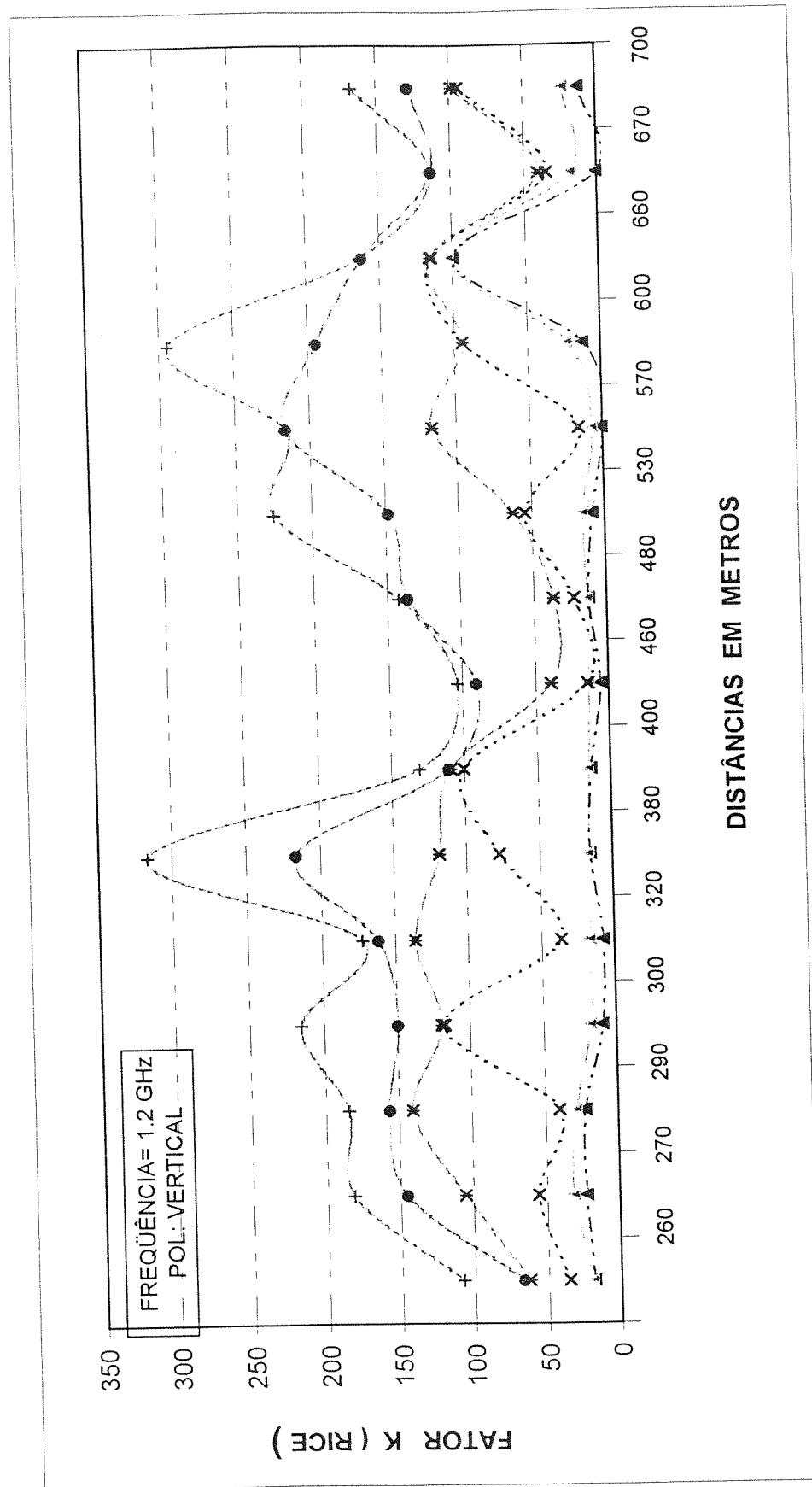


Fig. 5.6-a - Variação do fator K da distribuição de Rice em função da distância

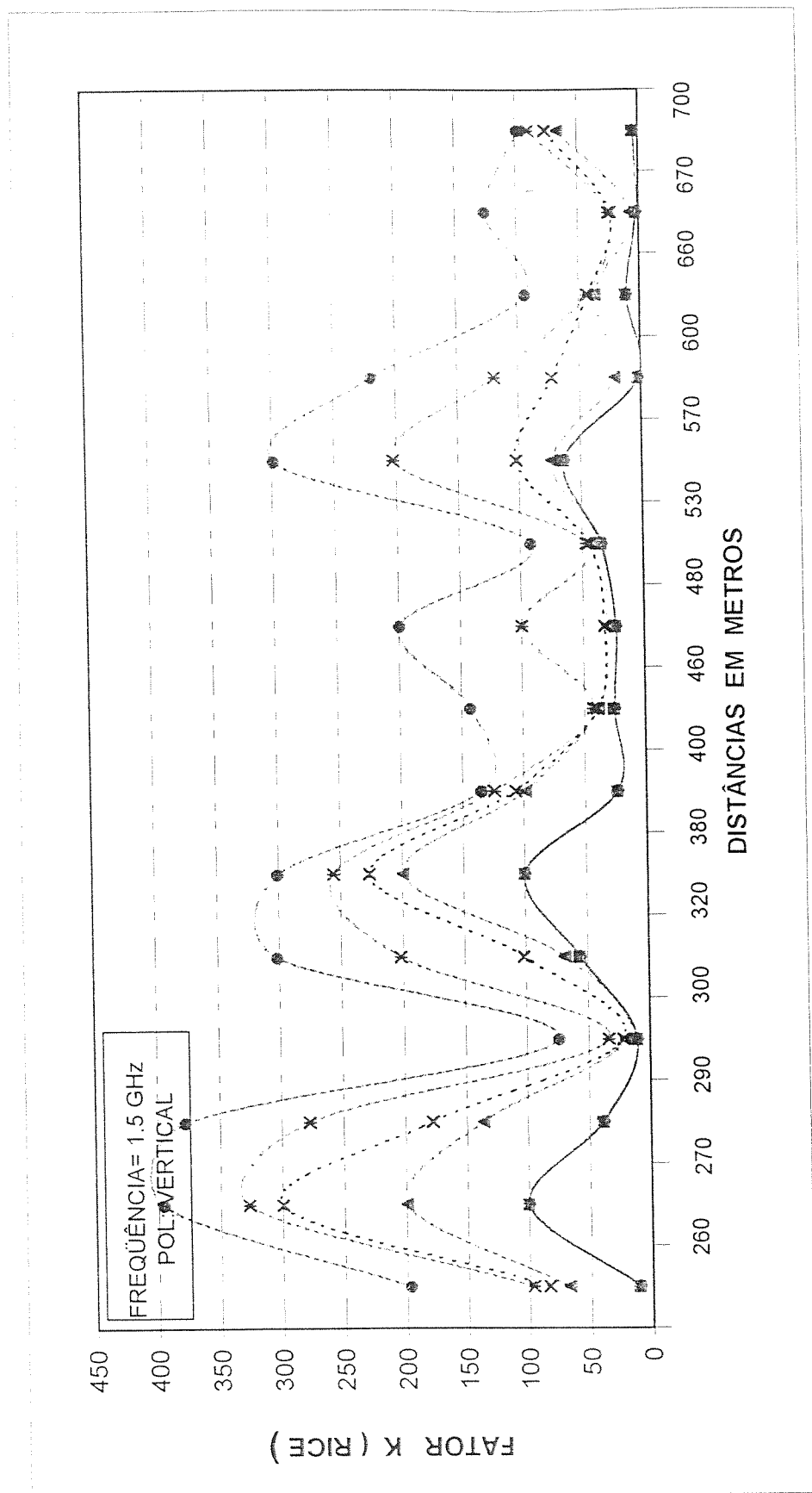


Fig. 5.6-b - Variação do fator K da distribuição de Rice em função da distância

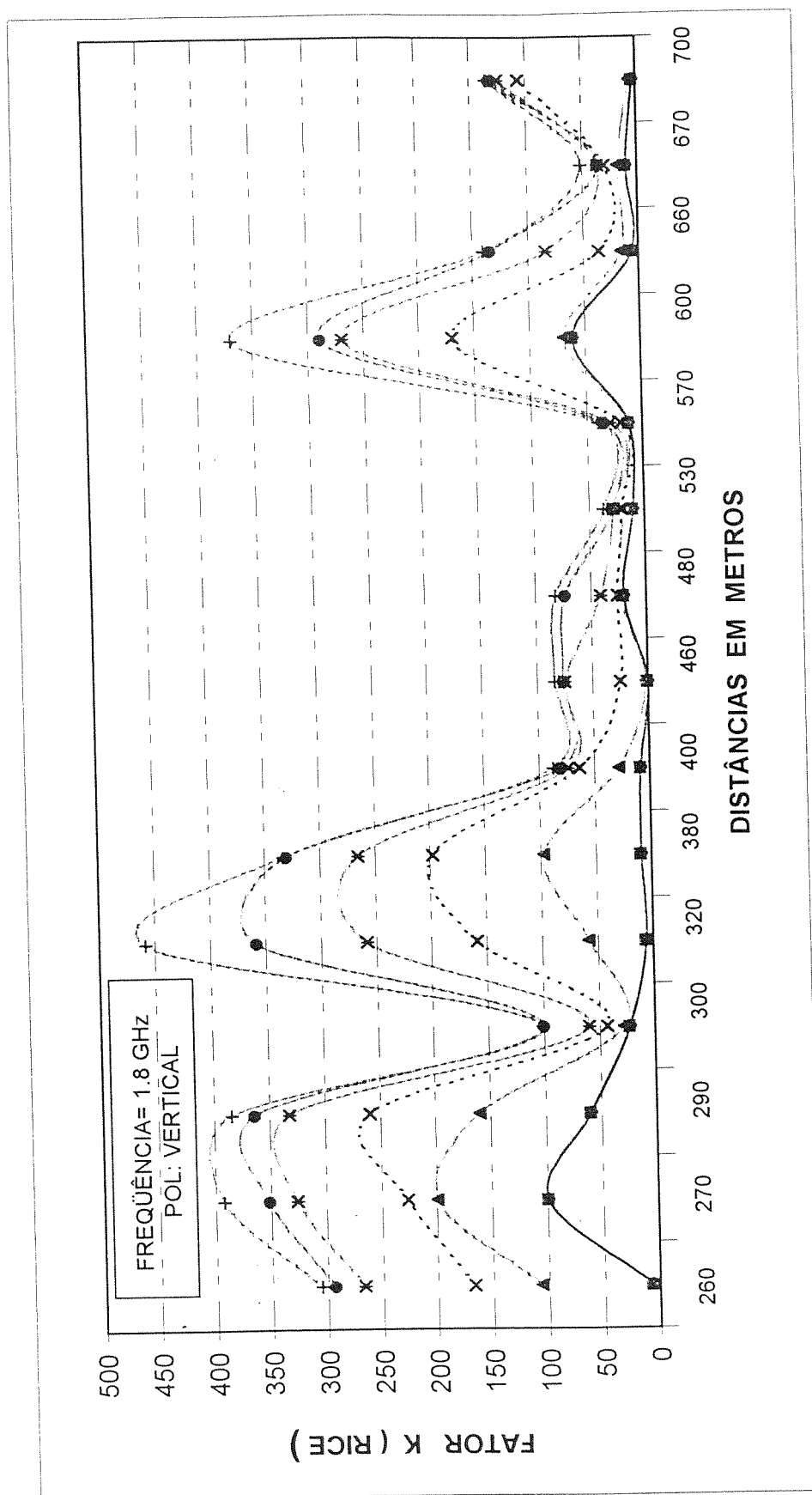


Fig. 5.6-c - Variação do fator K da distribuição de Rice em função da distância

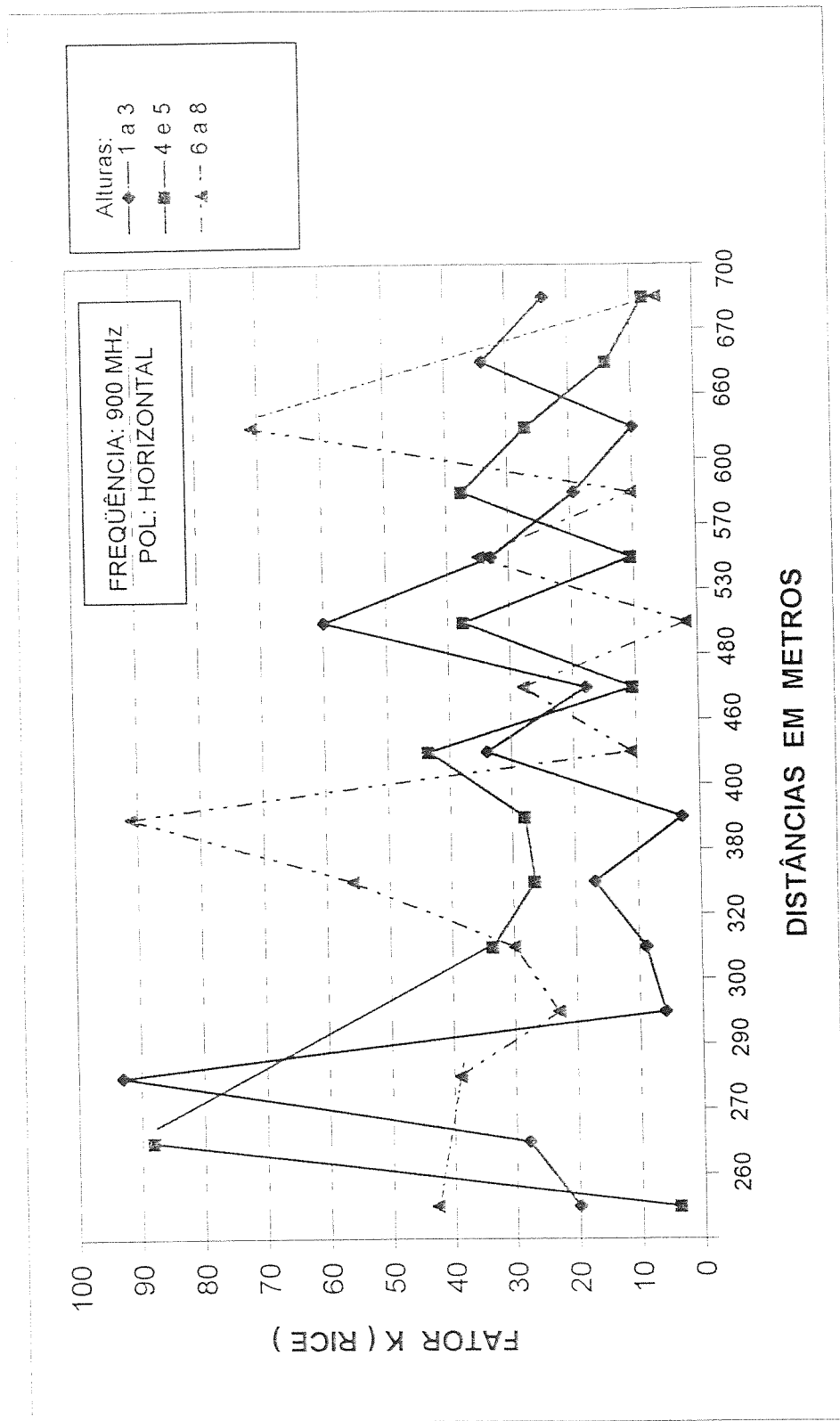


Fig. 5.7-a - Variação do fator K da distribuição de Rice em função da distância

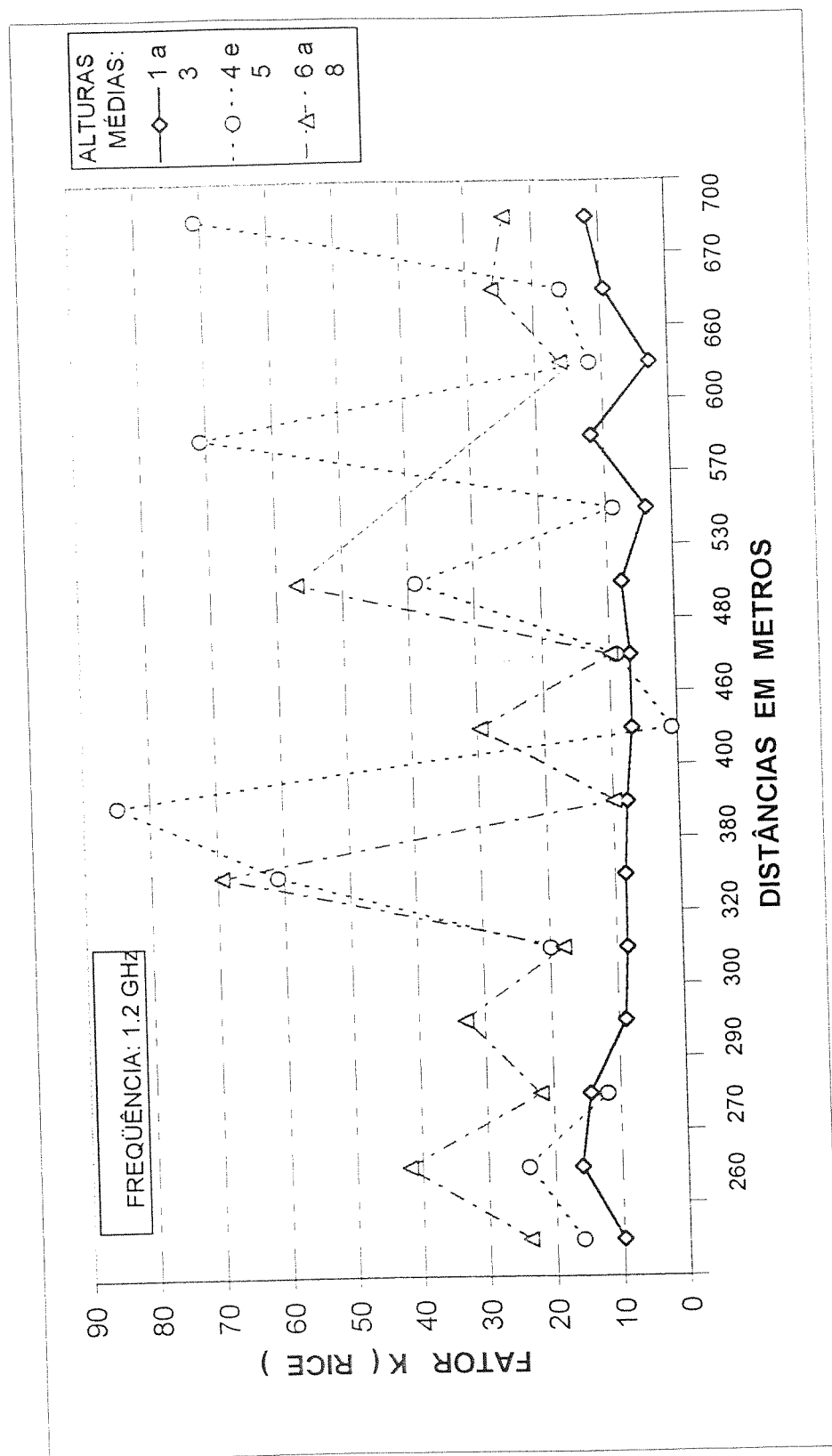


Fig. 5.7-b - Variação do fator K da distribuição de Rice em função da distância

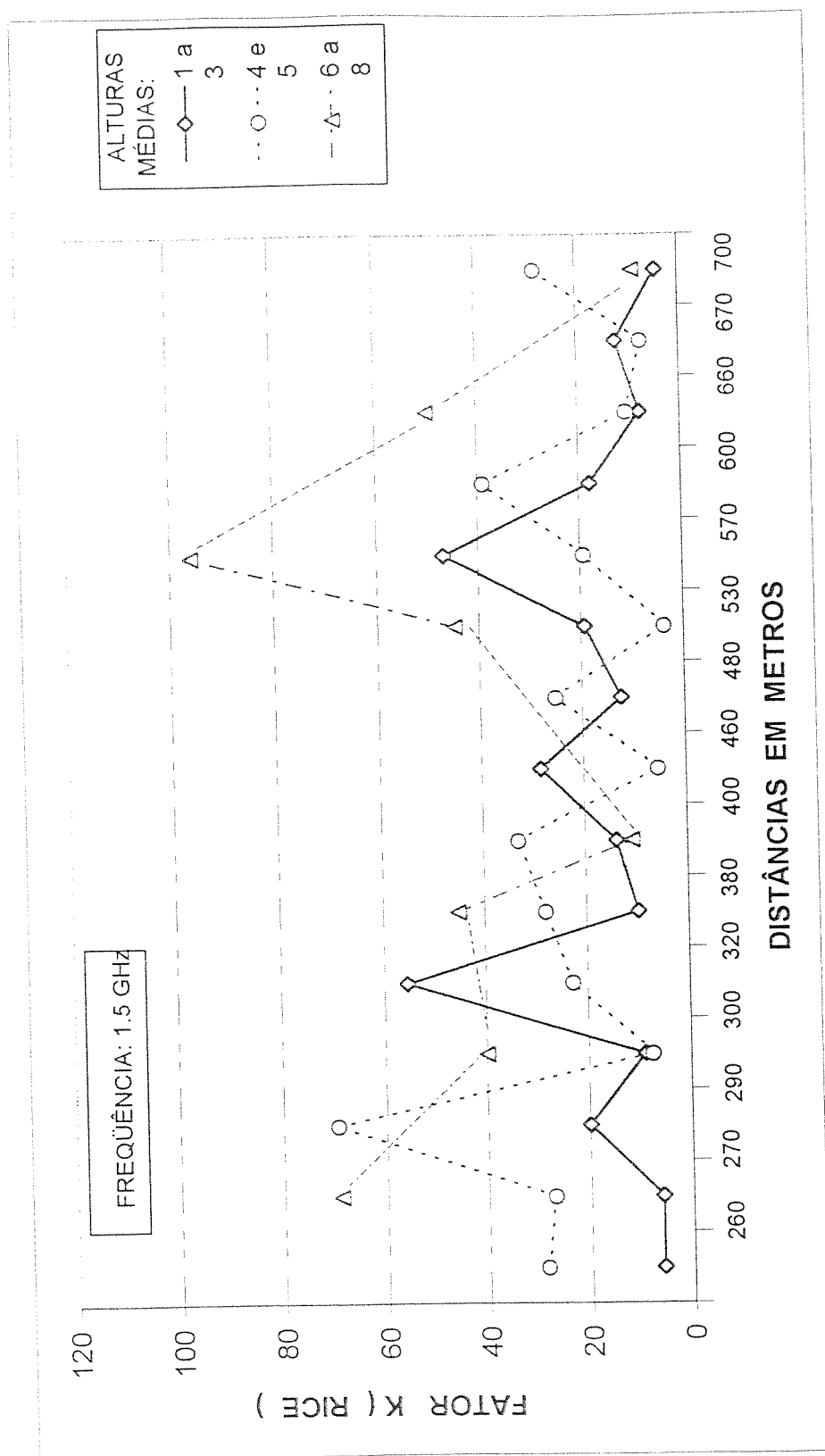


Fig. 5.7-c - Variação do fator K da distribuição de Rice em função da distância

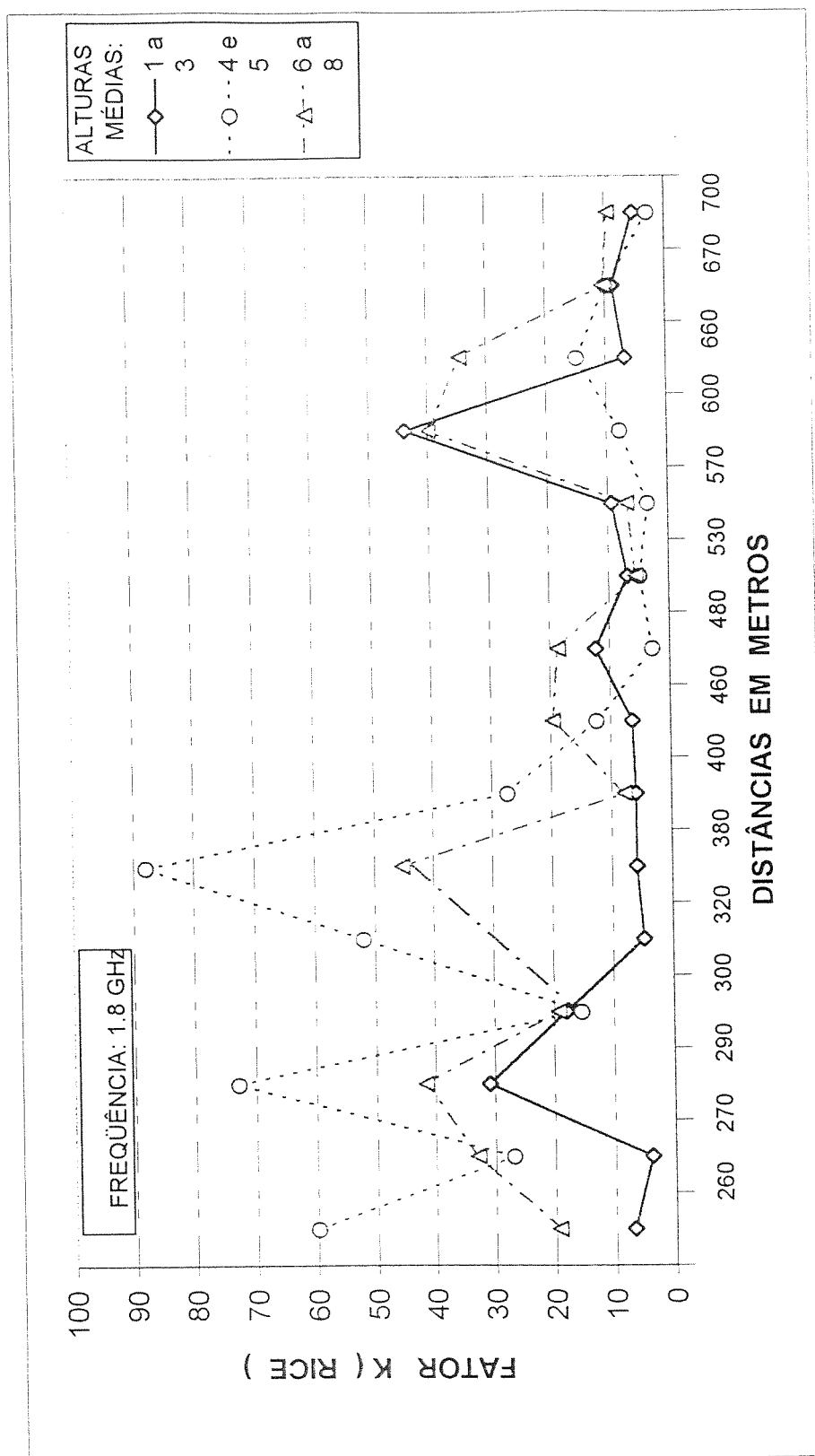


Fig. 5.7-d - Variação do fator K da distribuição de Rice em função da distância

Nos pontos onde as copas das árvores são espaçadas uma das outras e nas áreas descobertas, o fator K assume grandes valores, indicativo da existência de um raio dominante chegando ao receptor. Os valores de fator K obtidos para alturas intermediárias de estação base mostram grande variação, geralmente maiores do que os valores obtidos para alturas baixas e elevadas de estação base.

Uma visualização detalhada da variação do fator K com a altura da estação base pode ser feita através das figuras 5.8-a a 5.8-d, onde os 15 pontos de medição são grupados em 4 setores, de A a D.

Uma conclusão geral importante é que para estações base com grandes alturas há freqüentemente um raio dominante, particularmente nas áreas abertas. Isto se deve ao fato da vegetação, devido ao seu índice de refração complexo ser próximo da unidade, agir como um fraco “bloqueio” para a passagem da energia. Este raio dominante desaparece completamente quando se diminui a altura da antena da estação base.

A variação do parâmetro m da distribuição de Nakagami com a distância, para os diversos valores de freqüência, altura da antena da estação de base estão apresentados nas figuras 5.9-a a 5.9-c. Pela intrínseca relação da distribuição de Nakagami com a distribuição de Rice, conforme foi mostrado no item 3.1.1 e pela observação destas figuras, fica claro que são verdadeiras e válidas todas as análises quantitativas e qualitativas feitas acima para o fator K.

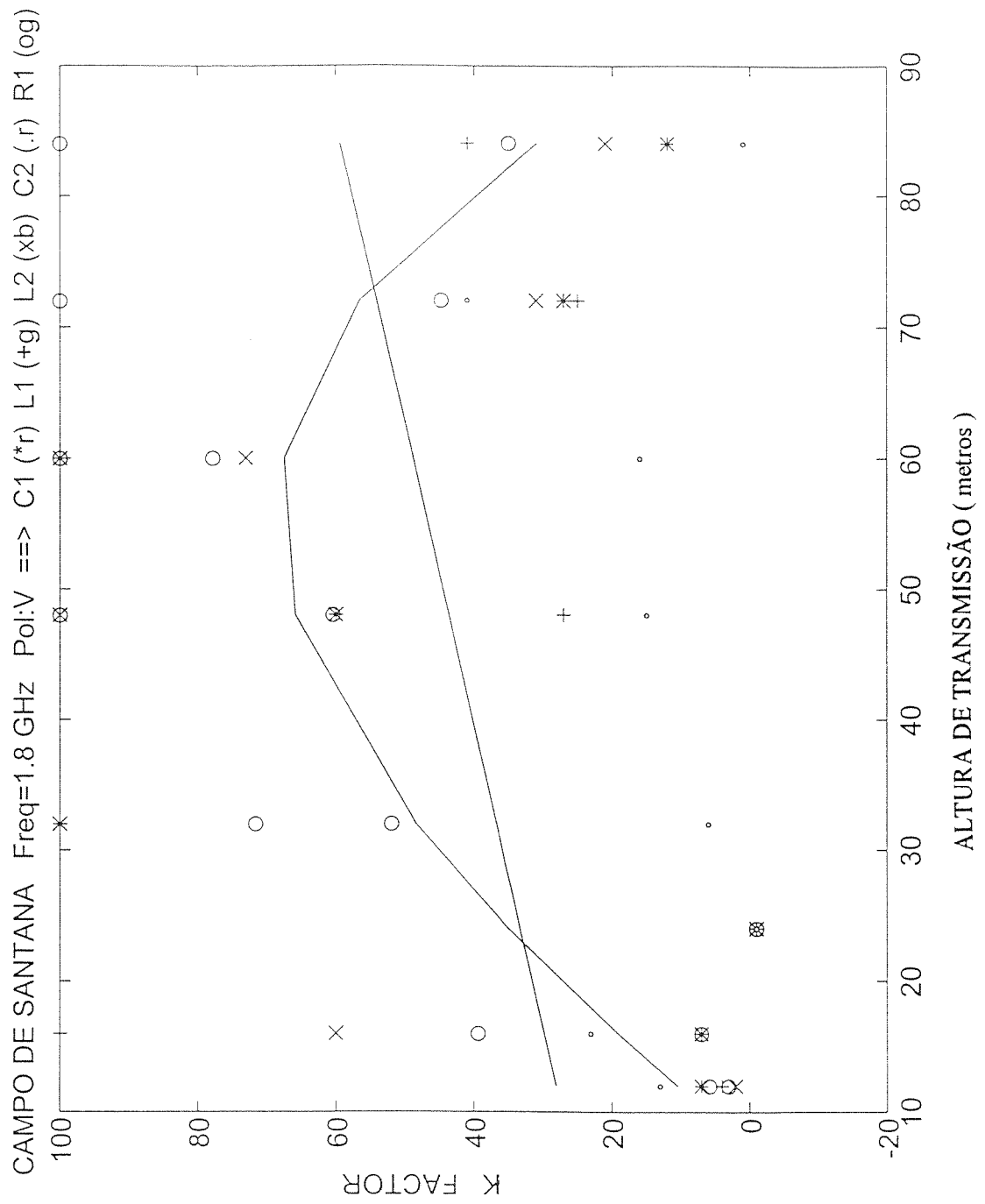


Fig. 5.8-a – Variação do fator K com a altura – Setor A

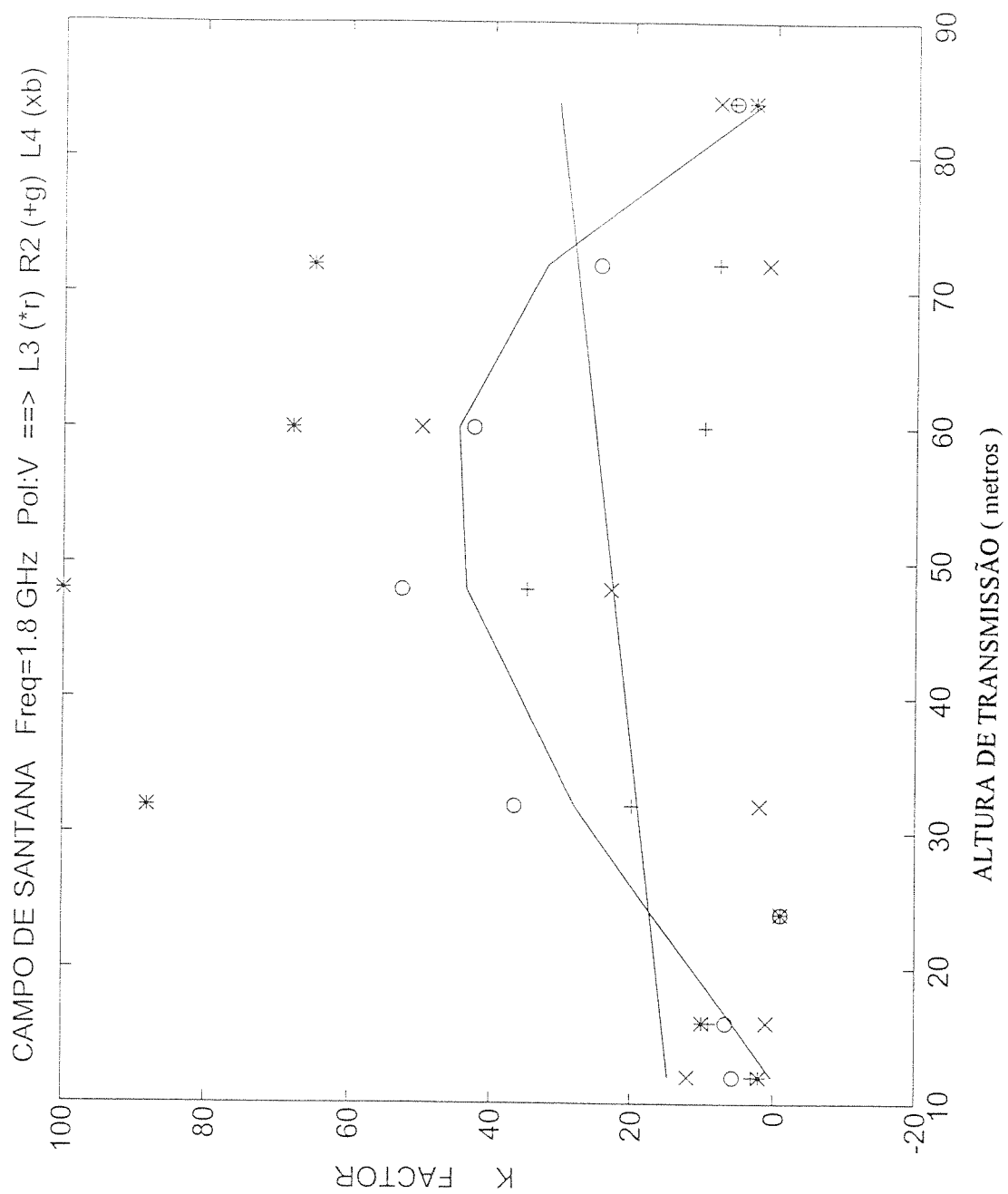


Fig. 5.8-b – Variação do fator K com a altura – Setor B

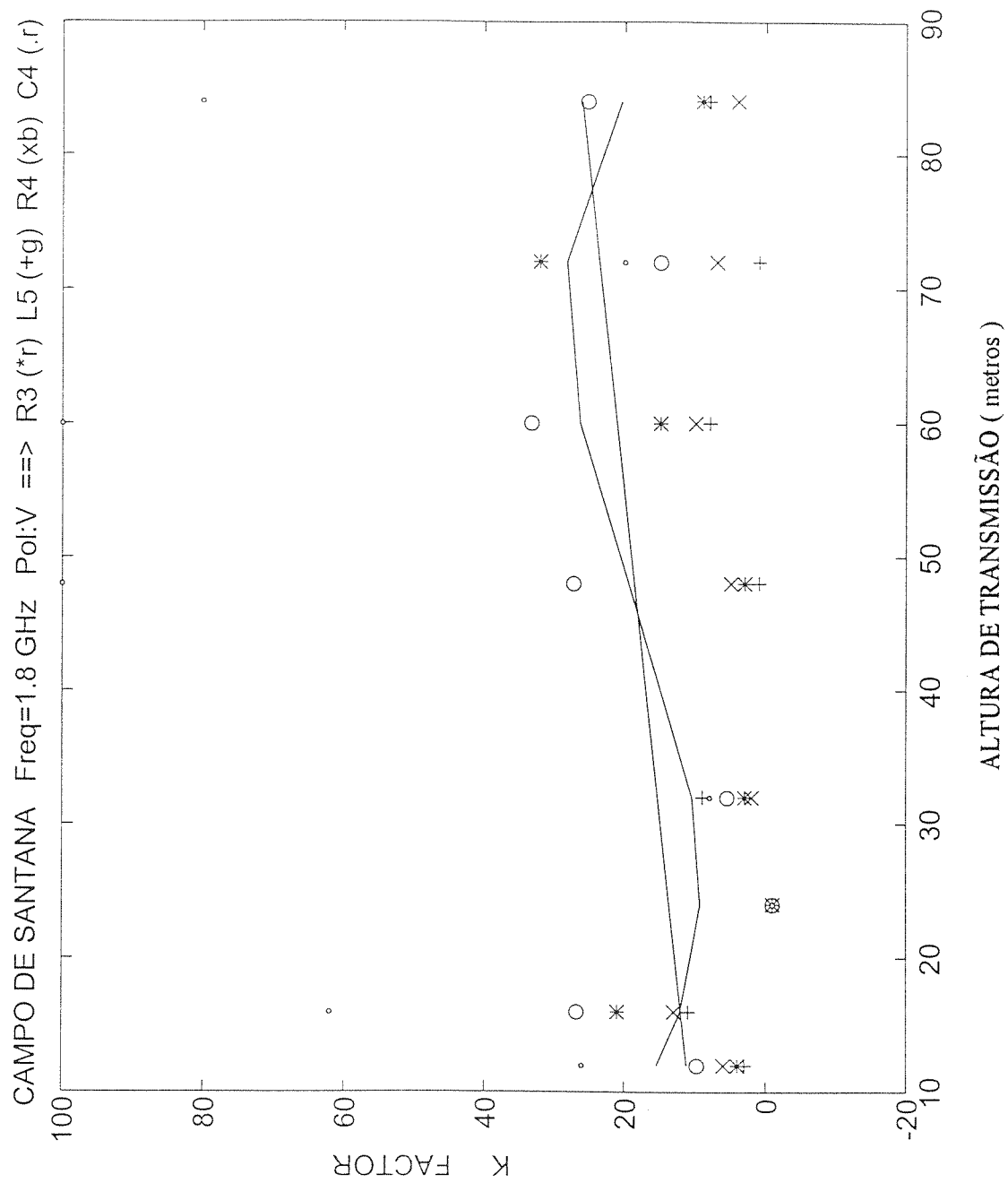


Fig. 5.8-c – Variação do fator K com a altura – Setor C

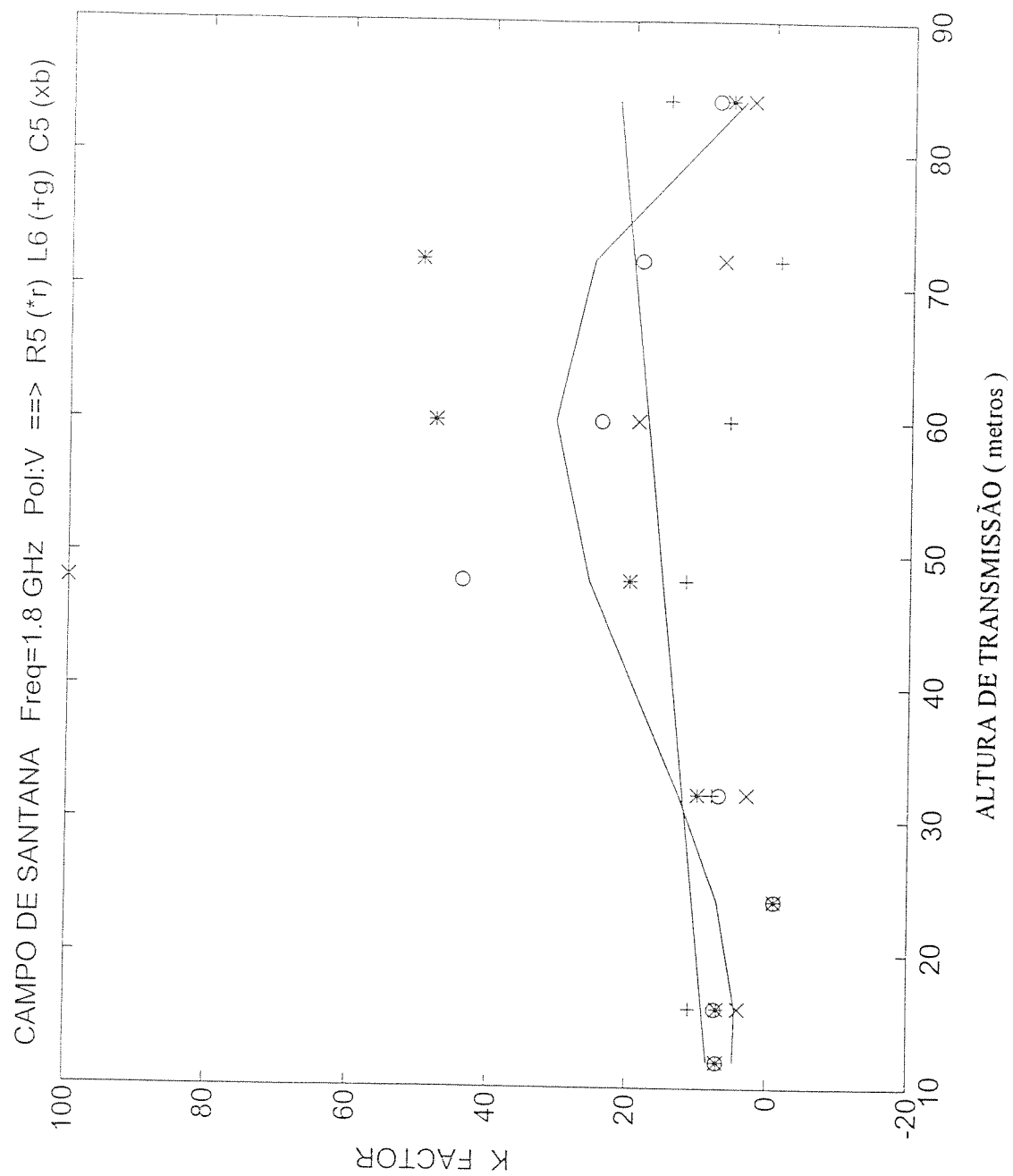


Fig. 5.8-d – Variação do fator K com a altura – Setor D

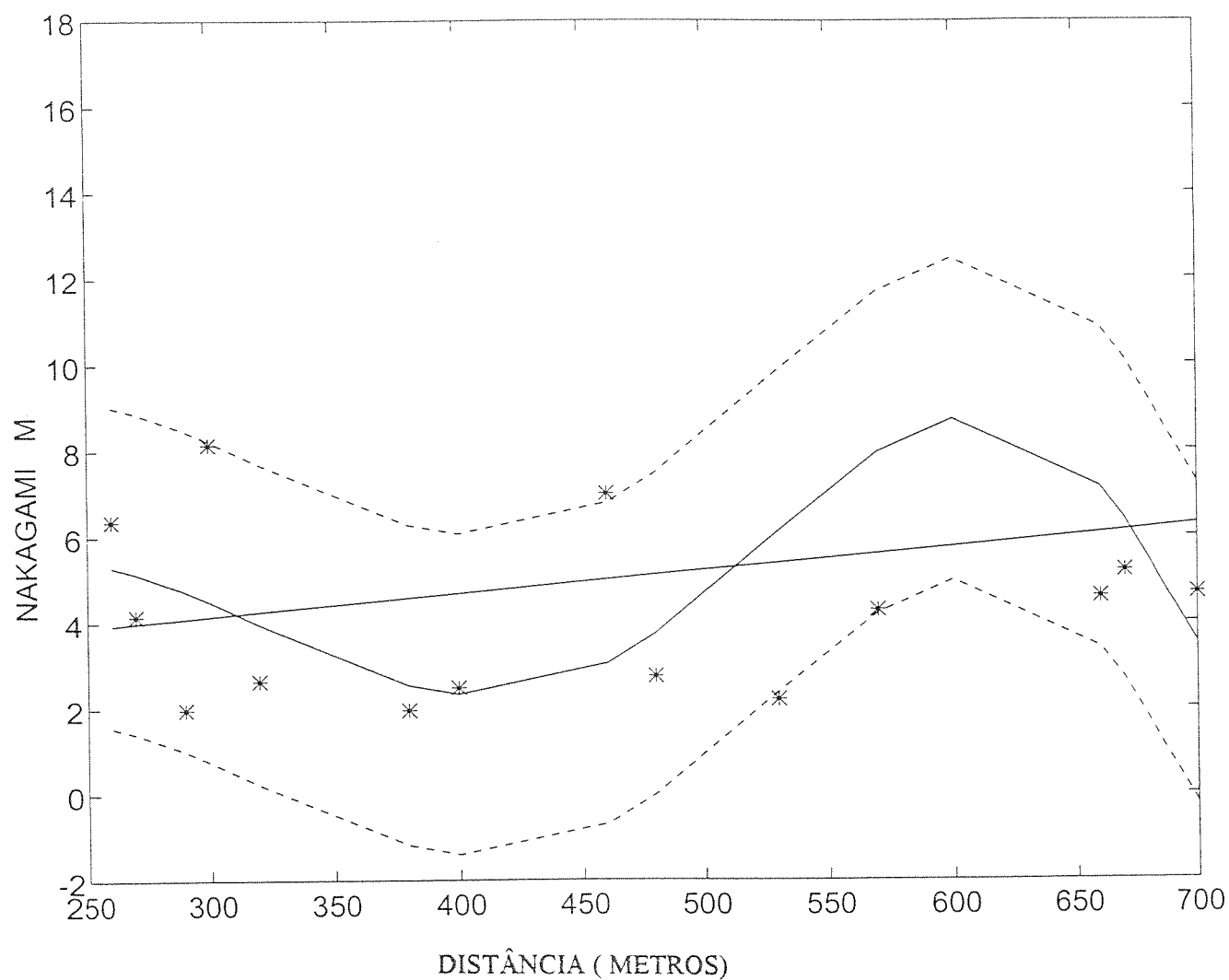


Fig. 5.9-a – Variação do parâmetro m de Nakagami com a distância

Freq: 1,8 GHz – Pol: V – Altura Tx: 12 m

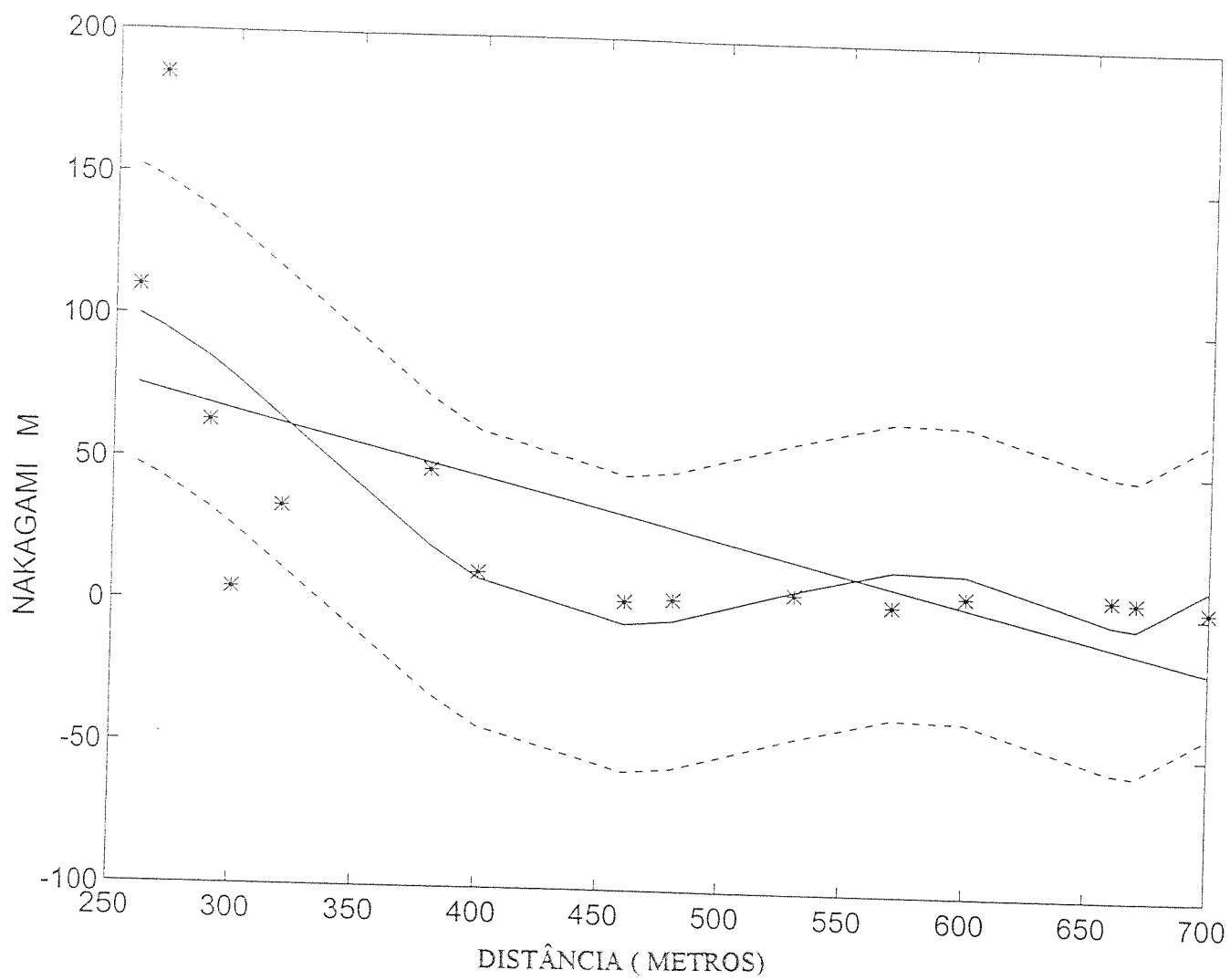


Fig. 5.9-b – Variação do parâmetro m de Nakagami com a distância

Freq: 1,8 GHz – Pol: V – Altura Tx: 32 m

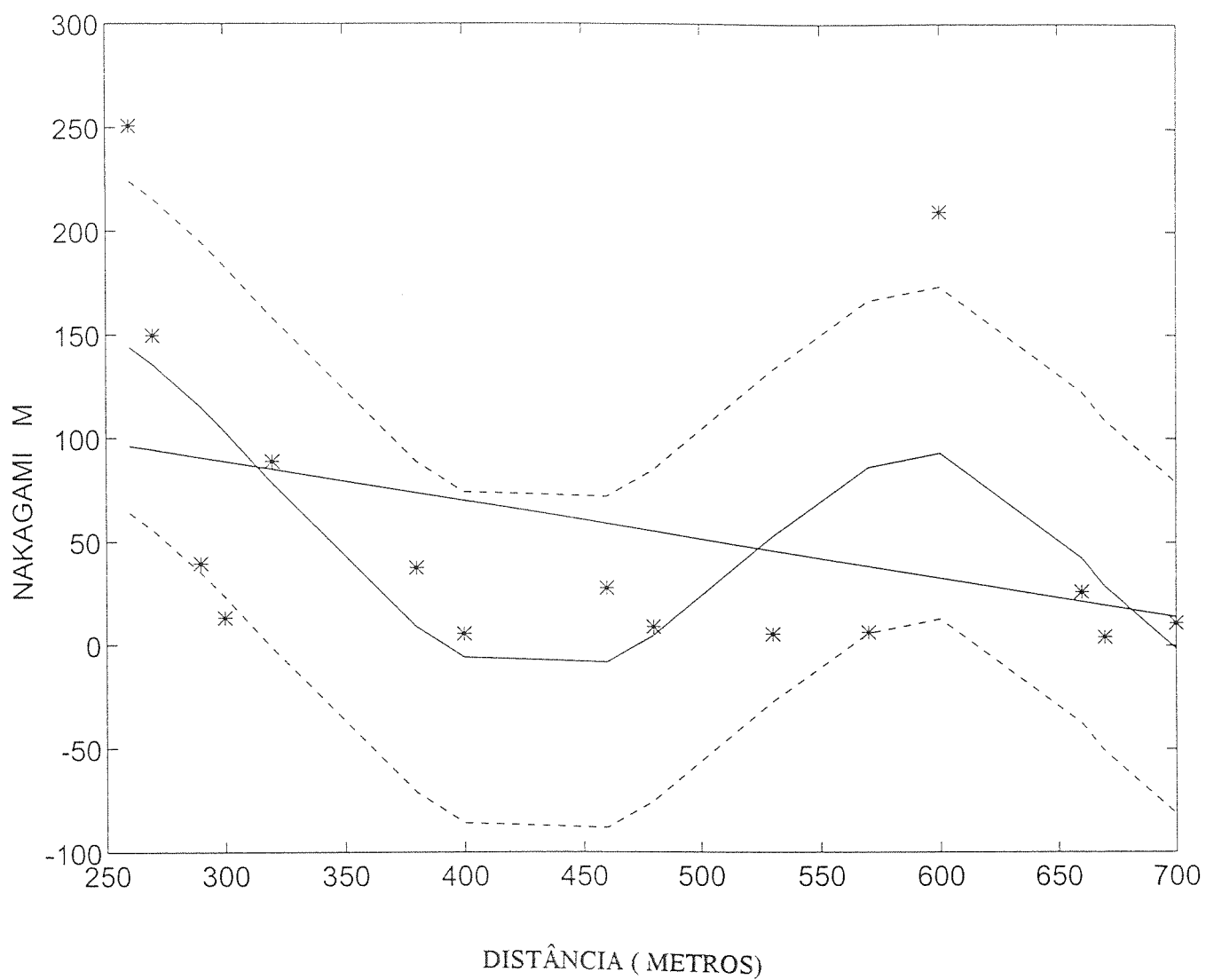


Fig. 5.9-c – Variação do parâmetro m de Nakagami com a distância

Freq: 1,8 GHz – Pol: V – Altura Tx: 60 m

5.3 - ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA MÉDIA DO CAMPO RECEBIDO

As conclusões apresentadas no item anterior refletem-se no desvio padrão (σ) da variação do campo recebido em dBm em torno de sua média.

Os valores de σ obtidos nos 15 pontos de medição para uma dada frequência e altura da estação base tem variação irregular com a distância, conforme pode ser observado nas figuras 5.10-a a 5.10-c. Em termos genéricos, o desvio padrão (σ) diminui com o aumento da altura da antena de transmissão, indicando a existência de raios dominantes para as grandes alturas de transmissão, o que está de acordo com as conclusões apresentadas no item 5.2. Pode ser observado, também, que σ apresenta uma pequena, mas irregular, diminuição com o aumento da frequência de operação.

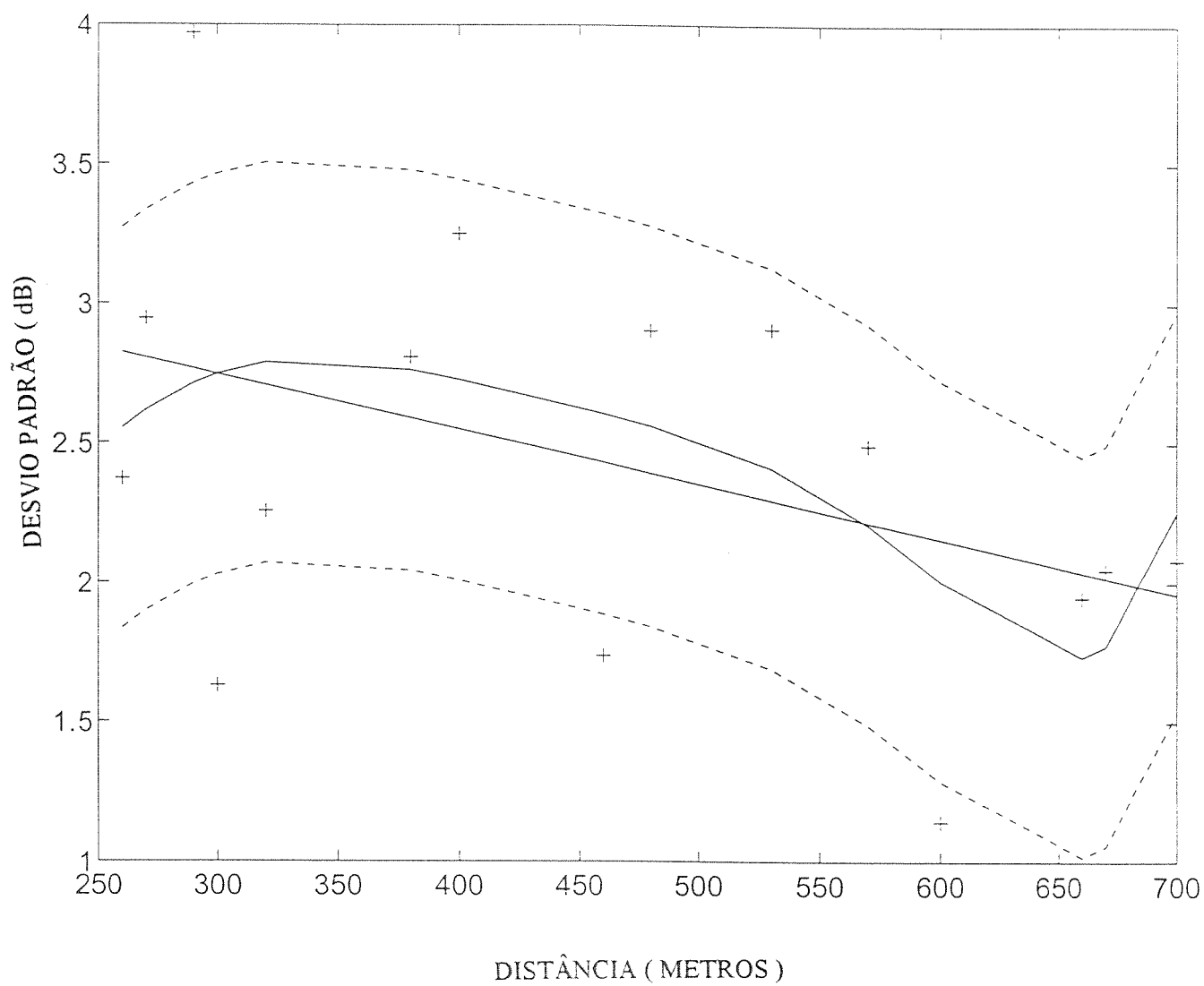


Fig. 5.10-a – Variação do desvio padrão do campo recebido com a distância

Freq: 1,8 GHz – Pol: V – Altura Tx: 12 m

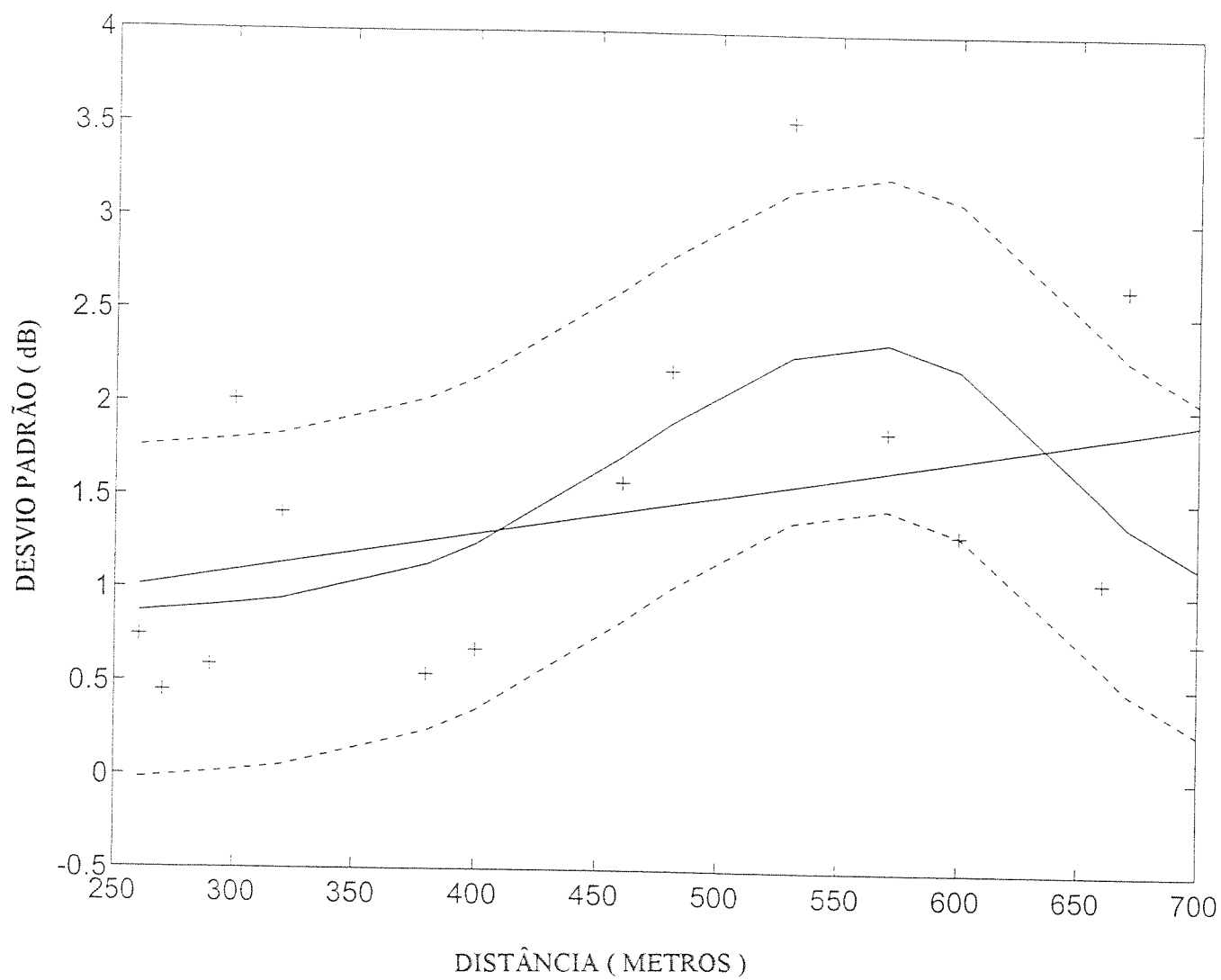


Fig. 5.10-b – Variação do desvio padrão do campo recebido com a distância

Freq: 1,8 GHz – Pol: V – Altura Tx: 32 m

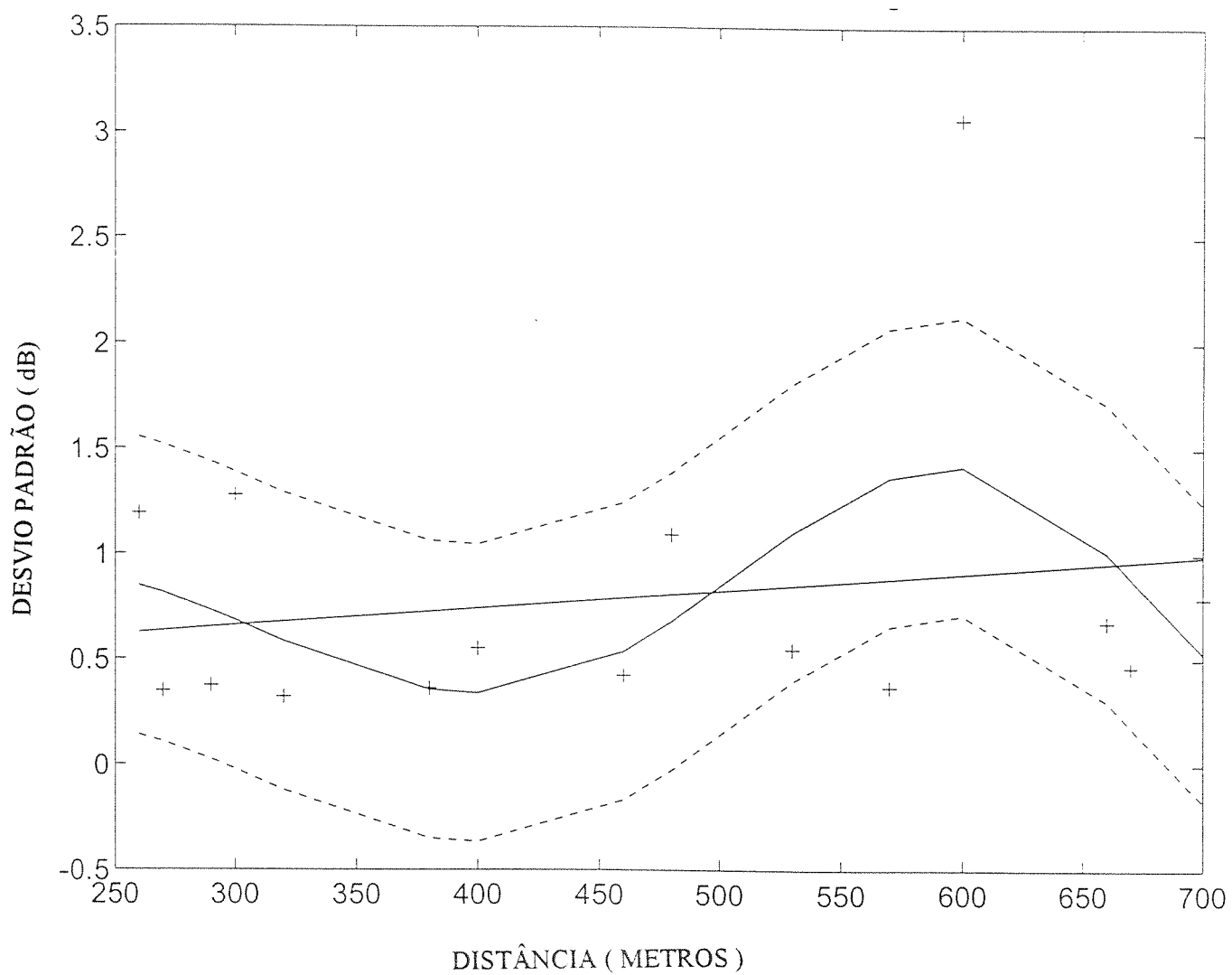


Fig. 5.10-c – Variação do desvio padrão do campo recebido com a distância

Freq: 1,8 GHz – Pol: V – Altura Tx: 60 m

REFERÊNCIAS

- [1] J. D. Parsons and J. G. Gardiner, Mobile Communication Systems. New York: Halsted Press, 1989
- [2] W.C.Y. Lee, Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal, IEEE Trans., VT-34, NO.1, 1985
- [3] IEEE “ Special Issue on Mobile Radio Propagation ,” IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 37, NO.1. February 1988
- [4] H. Suzuki, “A Statistical Model for Urban Radio Propagation,” IEEE Trans. on Communications, vol. COM-25, NO.7, July 1977
- [5] A. Papoulis, Probability, Random Variables and Stochastic Processes, McGraw Hill, 1965
- [6] J.S. Bendat e A.G. Piersol, Random Data – Analysis and Measurements Procedures, John Wiley & Sons, 1992
- [7] T.S. Rappaport, Wireless Communications, Prentice Hall, 1996
- [8] M.R. Spiegel, Estatística, Schaum McGraw-Hill, sect. 12
- [9] Estatística Não-Paramétrica, Capítulo 5 “A Prova de Kolmogorov-Smirnov de uma Amostra”

- [10] A. Mehrotra, Cellular Radio: Analog and Digital Systems. USA.: Artech House, 1994
- [11] G. L. Siqueira, E. A. Vásquez, R. A. Gomes, C. B. Sampaio and D A. Borghi “Comparison Between Propagation Measurements and Coverage Prediction Models For Small Urban Cells,” IEEE Global Telecommunications Conference Records, GLOBECOM London UK, 18th to 22nd , vol.2, pp. 1182-1186, 1996
- [12] G.L.Siqueira e E. J. A. Vazques, “Métodos para Cálculo de Cobertura em Sistemas Móveis Celulares: Análise Comparativa”, Relatório paOSR 05/93-RPT 2.1, CETUC PUC/Rio, 1993
- [13] E.J.A. Vasquez, “Estudo de Cobertura de Sistemas Móveis Celulares em Regiões Urbanas, Tese de Mestrado, CETUC/PUC-RJ, janeiro 1996