

---

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA  
INTENSIDADE DO CAMPO ELÉTRICO NA  
FAIXA DE 566 A 572 MHz NA CIDADE DE  
UBERLÂNDIA**

---

**Tiago Nunes Santos**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**Tiago Nunes Santos**

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA  
INTENSIDADE DO CAMPO ELÉTRICO NA  
FAIXA DE 566 A 572 MHz NA CIDADE DE  
UBERLÂNDIA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Processamento Digital de Sinais

Orientador: Gilberto Arantes Carrijo

Uberlândia

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

S237a  
2021 Santos, Tiago Nunes, 1987-  
Análise da variabilidade da intensidade do campo elétrico na faixa de 566 a 572 MHz na cidade de Uberlândia [recurso eletrônico] / Tiago Nunes Santos. - 2021.

Orientador: Gilberto Arantes Carrijo.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2021.6016>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. 2. Processamento de sinais. I. Carrijo, Gilberto Arantes, 1948-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

---

CDU: 621.3





### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, 281, PPGEELT				
Data:	Dezoito de fevereiro de dois mil e vinte e um	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	11613EEL010				
Nome do Discente:	Tiago Nunes Santos				
Título do Trabalho:	Análise da variabilidade da intensidade do campo elétrico na faixa de 566 a 572 MHz na cidade de Uberlândia.				
Área de concentração:	Processamento da informação				
Linha de pesquisa:	Processamento digital de sinais				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Alexandre Coutinho Mateus - FEELT/UFU; Lorenço Santos Vasconcelos- FEELT/UFU; Edgar Silva Júnior - UEFS; Benedito Alencar de Arruda - UFMT; Gilberto Arantes Carrijo - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Gilberto Arantes Carrijo, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Lorenzo Santos Vasconcelos, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/02/2021, às 11:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Coutinho Mateus, Membro de Comissão**, em 18/02/2021, às 12:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto Arantes Carrijo, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/02/2021, às 14:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Edgar Silva Júnior, Usuário Externo**, em 18/02/2021, às 15:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Benedito Alencar de Arruda, Usuário Externo**, em 20/02/2021, às 09:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2545552** e o código CRC **6627F8CE**.

---

*Este trabalho é dedicado aos meus pais Vinibaldo e Edma,  
por sempre estarem do meu lado me apoiando em tudo.*



---

# Agradecimentos

Primeiramente, devo agradecer a Deus que sempre me deu força, inteligência, competência e ânimo para conseguir completar todas as minhas jornadas.

Aos meus queridos afilhados, Andressa, Renan, Luis Felipe, Marco Antônio, Miguel e Rayner pela compressão quando as vezes que não pude estar junto com vocês.

Aos meus familiares, pelo exemplo, força e incentivo constantes para a conquista do meu objetivo e, especialmente, pela compreensão nos momentos de ausência;

Especialmente, ao professor Carrijo pela orientação, apoio e a amizade.

A UEFS em especial ao laboratório de Sistemas de Comunicação e o Professor Doutor Edgar Silva Júnior, por ter disponibilizado os equipamentos de medição necessários para a realização das coletas de campo que esteve sempre à disposição em me ajudar nas execuções das medições.

Aos amigos do laboratório, pela amizade, pelos conselhos ao longo desse caminho, pelo conhecimento trocado e por terem me ajudado durante o desenvolvimento deste trabalho.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.



---

## Resumo

O avanço da construção civil no Brasil, que vem ocorrendo há alguns anos, trouxe impactos na modificação dos perfis urbanísticos das cidades. Em decorrência dessa alteração, a quantidade de obstáculos entre a estação transmissora e o receptor aumentou gradativamente. Consequentemente, a maneira que a intensidade do campo elétrico se propaga na região urbana também é afetada. Diante disso, é necessário analisar a variabilidade da intensidade do campo elétrico na cidade de Uberlândia, a fim de identificar o comportamento das regiões.

Esta análise foi realizada a partir da coleta de amostras de campo elétrico em várias regiões. Um estudo minucioso de cada região foi feito por meio das amostras aferidas, utilizando análises estatísticas e comparações das amostras com os modelos de propagação espaço livre, hata, ITU-R P.1546 e RNA.

Assim, identificou-se uma correlação das regiões na cidade de Uberlândia. Os resultados alcançados indicaram que as regiões analisadas são estatisticamente distintas umas das outras. Além disso, constatou-se que o perfil urbanístico afetou drasticamente o comportamento do campo elétrico.

**Palavras-chave:** Propagação em UHF, Espaço Livre, Hata, ITU-R P.1546, RNA.





---

# Abstract

The advancement of civil construction in Brazil, which has been occurring for some years, has had an impact on the modification of urban profiles in cities. As a result of this change, the number of obstacles between the transmitting station and the receiver gradually increased. Consequently, the way that the intensity of the electric field spreads in the urban region is also affected. Therefore, it is necessary to analyze the variability of the intensity of the electric field in the city of Uberlândia, in order to identify the behavior of the regions.

This analysis was performed from the collection of electric field samples in several regions. A detailed study of each region was done using the measured samples, using statistical analysis and comparisons of the samples with the free space, hata, ITU-R P.1546 and RNA propagation models.

Thus, a correlation of the regions in the city of Uberlândia was identified. The results achieved indicated that the analyzed regions are statistically distinct from each other. In addition, it was found that the urban profile drastically affected the behavior of the electric field.

**Keywords:** UHF Propagation, Free space, Hata, ITU-R P.1546, RNA.



---

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Onda propagando-se na direção x . . . . .	37
Figura 2 – Representação da onda eletromagnética . . . . .	37
Figura 3 – Características de uma onda senoidal . . . . .	38
Figura 4 – Polarização da onda (a) linear (b) elíptica (c) circular . . . . .	39
Figura 5 – Espectro de frequência . . . . .	40
Figura 6 – Onda de superfície ou onda de solo (abaixo 2 MHz) . . . . .	42
Figura 7 – Ondas com reflexão ionosférica . . . . .	43
Figura 8 – Onda em visada direta (acima de 30 MHz) . . . . .	43
Figura 9 – Propagação por difração (obstáculo gume de faca) . . . . .	43
Figura 10 – Propagação por espalhamento . . . . .	44
Figura 11 – Curvas para atenuação adicional média para áreas urbanas . . . . .	47
Figura 12 – Curvas para correção em função da frequência para áreas de morfologia suburbana . . . . .	47
Figura 13 – Curva para encontrar o fator de ganho da antena . . . . .	48
Figura 14 – Curva para encontrar o fator de ganho de altura . . . . .	48
Figura 15 – Curva de intensidade de campo elétrico 100 MHz, caminho terrestre, 50 % de tempo . . . . .	51
Figura 16 – Curva de intensidade de campo elétrico 600 MHz, caminho marítimo, 50% de tempo . . . . .	52
Figura 17 – Curva de intensidade de campo elétrico 2 000 MHz, caminho marítimo, 50% de tempo . . . . .	53
Figura 18 – Ângulo de folga efetivo para $h_1 \leq 0$ . . . . .	57
Figura 19 – Fluxograma para correção da altura do receptor/antena móvel . . . . .	61
Figura 20 – Ângulo de afastamento do terreno (graus) . . . . .	64
Figura 21 – Sistema de transmissão . . . . .	77
Figura 22 – Diagrama de azimuth polarização vertical . . . . .	78
Figura 23 – Diagrama de elevação polarização vertical . . . . .	78
Figura 24 – Transmissor do canal 30 . . . . .	79

Figura 25 – Sistema de recepção . . . . .	80
Figura 26 – Percursos de aquisições dos dados . . . . .	81
Figura 27 – Regiões filtradas . . . . .	86
Figura 28 – Boxplot . . . . .	87
Figura 29 – Arquitetura da RNA . . . . .	96
Figura 30 – <i>Toolbox Neural Net Fitting</i> . . . . .	96
Figura 31 – Tela inicial do <i>toolbox Neural Net Fitting</i> . . . . .	97
Figura 32 – Configuração de entradas e saída da RNA . . . . .	97
Figura 33 – Configuração de ajustes de validação e testes da RNA . . . . .	98
Figura 34 – Definição de neurônios da RNA . . . . .	98
Figura 35 – Tela de treinamento da RNA . . . . .	99
Figura 36 – RNA em treinamento pelo o <i>toolbox Neural Net Fitting</i> . . . . .	99
Figura 37 – Tela inicial do <i>toolbox Neural Net Fitting</i> . . . . .	100
Figura 38 – Região Central . . . . .	103
Figura 39 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Central . . . . .	104
Figura 40 – Campo elétrico da região Central . . . . .	105
Figura 41 – Boxplot da região Central . . . . .	105
Figura 42 – Regressão linear polinomial do campo elétrico da região Central . . . . .	106
Figura 43 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Central . . . . .	107
Figura 44 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Central . . . . .	107
Figura 45 – Intensidade do campo elétrico em relação a altitude e distância da região Central . . . . .	108
Figura 46 – Intensidade do erro na região Central . . . . .	109
Figura 47 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Central . . . . .	110
Figura 48 – pdf do histograma de Edb e pdf da gaussiana da região Central . . . . .	111
Figura 49 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Central . . . . .	111
Figura 50 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Central . . . . .	112
Figura 51 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Central . . . . .	112
Figura 52 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Central . . . . .	113
Figura 53 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propa- gação na região Central . . . . .	114
Figura 54 – Região Roosevelt . . . . .	115

Figura 55 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Roosevelt . . . . .	115
Figura 56 – Campo elétrico da região Roosevelt . . . . .	116
Figura 57 – Boxplot da região Roosevelt . . . . .	117
Figura 58 – Regressão linear polinomial do campo elétrico da região Roosevelt . . .	117
Figura 59 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Roosevelt . . . . .	118
Figura 60 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Roosevelt . . . . .	119
Figura 61 – Intensidade do campo elétrico em relação altitude e distância da região Roosevelt . . . . .	119
Figura 62 – Intensidade do erro na região Roosevelt . . . . .	120
Figura 63 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Roosevelt . . . . .	121
Figura 64 – pdf do histograma de EdB e pdf da gaussiana da região Roosevelt . . .	122
Figura 65 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Roosevelt . . . . .	122
Figura 66 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Roosevelt . . . . .	123
Figura 67 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Roosevelt . . . . .	123
Figura 68 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Roosevelt . . . . .	124
Figura 69 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propa- gação na região Roosevelt . . . . .	125
Figura 70 – Região Brasil . . . . .	126
Figura 71 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Brasil . . . . .	126
Figura 72 – Campo elétrico da região Brasil . . . . .	127
Figura 73 – Boxplot da região Brasil . . . . .	127
Figura 74 – Regressão linear polinomial do campo elétrico da região Brasil . . . . .	128
Figura 75 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Brasil . . . . .	129
Figura 76 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Brasil . . . . .	129
Figura 77 – Intensidade do campo elétrico em relação a altitude e distância da região Brasil . . . . .	130
Figura 78 – Intensidade do erro na região Brasil . . . . .	131
Figura 79 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Brasil . . . . .	132
Figura 80 – pdf do histograma de EdB e pdf da gaussiana da região Brasil . . . . .	132

Figura 81 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Brasil . . . . .	133
Figura 82 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Brasil . . . . .	133
Figura 83 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Brasil . . . . .	134
Figura 84 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Brasil . . . . .	134
Figura 85 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Brasil . . . . .	135
Figura 86 – Região Lagoinha . . . . .	136
Figura 87 – Mancha da intensidade do campo elétrico da região Lagoinha . . . . .	136
Figura 88 – Campo elétrico da região Lagoinha . . . . .	137
Figura 89 – Boxplot da região Lagoinha . . . . .	137
Figura 90 – Regressão linear polinomial do campo elétrico na região Lagoinha . . . . .	138
Figura 91 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Lagoinha . . . . .	139
Figura 92 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Lagoinha . . . . .	139
Figura 93 – Intensidade do campo elétrico em relação a altitude e distância da região Lagoinha . . . . .	140
Figura 94 – Intensidade do erro na região Lagoinha . . . . .	141
Figura 95 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Lagoinha . . . . .	142
Figura 96 – pdf do histograma de Edb e pdf da gaussiana da região Lagoinha . . . . .	142
Figura 97 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Lagoinha . . . . .	143
Figura 98 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Lagoinha . . . . .	143
Figura 99 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Lagoinha . . . . .	144
Figura 100 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Lagoinha . . . . .	144
Figura 101 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Lagoinha . . . . .	145
Figura 102 – Região Santa Mônica . . . . .	146
Figura 103 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Santa Mônica . . . . .	147
Figura 104 – Campo elétrico da região Santa Mônica . . . . .	147
Figura 105 – Boxplot da região Santa Mônica . . . . .	148

Figura 106–Regressão linear polinomial do campo elétrico na região Santa Mônica .	149
Figura 107–cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Santa Mônica . . . . .	149
Figura 108–cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Santa Mônica . . . . .	150
Figura 109–Intensidade do campo elétrico em relação a altitude e distância da região Santa Mônica . . . . .	151
Figura 110–Intensidade do erro na região Santa Mônica . . . . .	152
Figura 111–cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Santa Mônica . . . . .	153
Figura 112–pdf do histograma de Edb e pdf da gaussiana da região Santa Mônica .	153
Figura 113–cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Santa Mônica . . . . .	154
Figura 114–pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Santa Mônica . . . . .	154
Figura 115–pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Santa Mônica . . . . .	155
Figura 116–cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Santa Mônica . . . . .	155
Figura 117–Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Santa Mônica . . . . .	156
Figura 118–Região Cidade Jardim . . . . .	157
Figura 119–Mancha da intensidade do campo elétrico na região Cidade Jardim . .	157
Figura 120–Campo elétrico da região Cidade Jardim . . . . .	158
Figura 121–Boxplot da região Cidade Jardim . . . . .	159
Figura 122–Regressão linear polinomial do campo elétrico da região Cidade Jardim	159
Figura 123–cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Cidade Jardim . . . . .	160
Figura 124–cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Cidade Jardim . . . . .	161
Figura 125–Intensidade do campo elétrico em relação a altitude e distância da região Cidade Jardim . . . . .	161
Figura 126–Intensidade do erro na região Cidade Jardim . . . . .	162
Figura 127–cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Cidade Jardim . . . . .	163
Figura 128–pdf do histograma de Edb e pdf da gaussiana da região Cidade Jardim	164
Figura 129–cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Cidade Jardim . . . . .	164

Figura 130–pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Cidade Jardim . . . . .	165
Figura 131–pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Cidade Jardim . . . . .	165
Figura 132–cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Cidade Jardim . . . . .	166
Figura 133–Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Cidade Jardim . . . . .	167
Figura 134–Região Daniel Fonseca . . . . .	168
Figura 135–Mancha da intensidade do campo elétrico na região Daniel Fonseca . .	168
Figura 136–Campo elétrico da região Daniel Fonseca . . . . .	169
Figura 137–Boxplot da região Daniel Fonseca . . . . .	169
Figura 138–Regressão linear polinomial do campo elétrico na região Daniel Fonseca	170
Figura 139–cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Daniel Fonseca . . . . .	171
Figura 140–cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Daniel Fonseca . . . . .	171
Figura 141–Intensidade do campo elétrico em relação altitude e distância da região Daniel Fonseca . . . . .	172
Figura 142–Intensidade do erro na região Daniel Fonseca . . . . .	173
Figura 143–cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Daniel Fonseca . . . . .	174
Figura 144–pdf do histograma de Edb e pdf da gaussiana da região Daniel Fonseca	174
Figura 145–cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Daniel Fonseca . . . . .	175
Figura 146–pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Daniel Fonseca . . . . .	175
Figura 147–pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Daniel Fonseca . . . . .	176
Figura 148–cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Daniel Fonseca . . . . .	176
Figura 149–Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Daniel Fonseca . . . . .	177
Figura 150–Região Rondon Pacheco . . . . .	178
Figura 151–Mancha da intensidade do campo elétrico na região Rondon Pacheco .	178
Figura 152–Campo elétrico da região Rondon Pacheco . . . . .	179
Figura 153–Boxplot região Rondon Pacheco . . . . .	180
Figura 154–Regressão linear polinomial do campo elétrico da região Rondon Pacheco	180



Figura 155–cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Rondon Pacheco . . . . .	181
Figura 156–cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Rondon Pacheco . . . . .	182
Figura 157–Intensidade do campo elétrico em relação altitude e distância na região Rondon Pacheco . . . . .	183
Figura 158–Intensidade do erro na região Rondon Pacheco . . . . .	184
Figura 159–cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Rondon Pacheco . . . . .	185
Figura 160–pdf do histograma de Edb e pdf da gaussiana da região Rondon Pacheco	185
Figura 161–cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Rondon Pacheco . . . . .	186
Figura 162–pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Rondon Pacheco . . . . .	186
Figura 163–pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Rondon Pacheco . . . . .	187
Figura 164–cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Rondon Pacheco . . . . .	187
Figura 165–Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Rondon Pacheco . . . . .	188
Figura 166–Região Cazeca . . . . .	189
Figura 167–Mancha da intensidade do campo elétrico na região Cazeca . . . . .	189
Figura 168–Campo elétrico da região Cazeca . . . . .	190
Figura 169–Boxplot da região Cazeca . . . . .	190
Figura 170–Regressão linear polinomial do campo elétrico na região Cazeca . . . .	191
Figura 171–cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Cazeca . . . . .	192
Figura 172–cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Cazeca . . . . .	192
Figura 173–Intensidade do campo elétrico em relação altitude e distância da região Cazeca . . . . .	193
Figura 174–Intensidade do erro na região Cazeca . . . . .	194
Figura 175–cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Cazeca . . . . .	195
Figura 176–pdf do histograma de Edb e pdf da gaussiana da região Cazeca . . . .	195
Figura 177–cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Cazeca . . . . .	196
Figura 178–pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Cazeca . . . . .	196

Figura 179 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Cazeca . . . . .	197
Figura 180 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Cazeca . . . . .	197
Figura 181 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na Região Cazeca . . . . .	198
Figura 182 – Região Martins . . . . .	199
Figura 183 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Martins . . . . .	199
Figura 184 – Campo elétrico da região Martins . . . . .	200
Figura 185 – Boxplot da região Martins . . . . .	200
Figura 186 – Regressão linear polinomial do campo elétrico na região Martins . . . . .	201
Figura 187 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Martins . . . . .	202
Figura 188 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Martins . . . . .	202
Figura 189 – Intensidade do campo elétrico em relação altitude e distância na região Martins . . . . .	203
Figura 190 – Intensidade do erro na região Martins . . . . .	204
Figura 191 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Martins . . . . .	205
Figura 192 – pdf do histograma de Edb e pdf da gaussiana da região Martins . . . . .	205
Figura 193 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Martins . . . . .	206
Figura 194 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Martins . . . . .	206
Figura 195 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Martins . . . . .	207
Figura 196 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Martins . . . . .	207
Figura 197 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na Região Martins . . . . .	208
Figura 198 – Região Gávea . . . . .	209
Figura 199 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Gávea . . . . .	209
Figura 200 – Campo elétrico região Gávea . . . . .	210
Figura 201 – Boxplot da região Gávea . . . . .	210
Figura 202 – Regressão linear polinomial do campo elétrico na região Gávea . . . . .	211
Figura 203 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Gávea . . . . .	212

Figura 204 –cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Gávea . . . . .	212
Figura 205 –Intensidade do campo elétrico em relação altitude e distância da região Gávea . . . . .	213
Figura 206 –Intensidade do erro na região Gávea . . . . .	214
Figura 207 –cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Gávea . . . . .	215
Figura 208 –pdf do histograma de Edb e pdf da gaussiana da região Gávea . . . . .	215
Figura 209 –cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Gávea . . . . .	216
Figura 210 –pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Gávea . . . . .	216
Figura 211 –pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Gávea . . . . .	217
Figura 212 –cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Gávea . . . . .	217
Figura 213 –Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na Região Gávea . . . . .	218
Figura 214 –Viaduto 1 . . . . .	220
Figura 215 –Viaduto 2 . . . . .	221
Figura 216 –Viaduto 3 . . . . .	222
Figura 217 –Viaduto 4 . . . . .	223
Figura 218 –Viaduto 5 . . . . .	224
Figura 219 –Viaduto 6 . . . . .	225
Figura 220 –Viaduto 7 . . . . .	226
Figura 221 –Comparação boxplot das regiões . . . . .	228



---

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Serviços de telecomunicações associados ao espectro de frequência . . .	40
Tabela 2 – Valores da distância usada nas tabelas de intensidades de campo (km)	59
Tabela 3 – Listas de parâmetros de entrada e seus limites . . . . .	70
Tabela 4 – Atenuação e potência da linha de transmissão HCA 158-50J . . . . .	79
Tabela 5 – Características do sistema de transmissão . . . . .	80
Tabela 6 – Banco de dados do analisador espectral das coletas das amostras nas regiões . . . . .	82
Tabela 7 – Quantidade de Pontos dos percursos . . . . .	82
Tabela 8 – Banco de dados das amostras das regiões . . . . .	83
Tabela 9 – Representação dos dados . . . . .	92
Tabela 10 – Polinômios de interpolação da região Central . . . . .	108
Tabela 11 – Análises estatísticas da região Central . . . . .	109
Tabela 12 – Análise estatística do erro da região Central . . . . .	110
Tabela 13 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Central . . .	114
Tabela 14 – Polinômios de interpolação da região Roosevelt . . . . .	120
Tabela 15 – Análises estatísticas da região Roosevelt . . . . .	120
Tabela 16 – Análise estatística do erro da região Roosevelt . . . . .	121
Tabela 17 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Roosevelt . .	125
Tabela 18 – Polinômios de interpolação da região Brasil . . . . .	130
Tabela 19 – Análises estatísticas da região Brasil . . . . .	131
Tabela 20 – Análise estatística do erro da região Brasil . . . . .	131
Tabela 21 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Brasil . . . .	135
Tabela 22 – Polinômios de interpolação da região Lagoinha . . . . .	140
Tabela 23 – Análises estatísticas da região Lagoinha . . . . .	141
Tabela 24 – Análise estatística do erro da região Lagoinha . . . . .	141
Tabela 25 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Lagoinha . .	145
Tabela 26 – Polinômios de interpolação da região Santa Mônica . . . . .	151
Tabela 27 – Análises estatísticas da região Santa Mônica . . . . .	151

Tabela 28 – Análise estatística do erro da região Santa Mônica . . . . .	152
Tabela 29 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Santa Mônica . . . . .	156
Tabela 30 – Polinômios de interpolação da região Cidade Jardim . . . . .	162
Tabela 31 – Análises estatísticas da região Cidade Jardim . . . . .	162
Tabela 32 – Análise estatística do erro da região Cidade Jardim . . . . .	163
Tabela 33 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Cidade Jardim . . . . .	167
Tabela 34 – Polinômios de interpolação da região Daniel Fonesca . . . . .	172
Tabela 35 – Análises estatísticas da região Daniel Fonesca . . . . .	173
Tabela 36 – Análise estatística do erro da região Daniel Fonseca . . . . .	173
Tabela 37 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Daniel Fonseca . . . . .	177
Tabela 38 – Polinômios de interpolação da região Rondon Pacheco . . . . .	183
Tabela 39 – Análises estatísticas da região Rondon Pacheco . . . . .	183
Tabela 40 – Análise estatística do erro da região Rondon Pacheco . . . . .	184
Tabela 41 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Rondon Pacheco . . . . .	188
Tabela 42 – Polinômios de interpolação da região Cazeca . . . . .	193
Tabela 43 – Análises estatísticas da região Cazeca . . . . .	194
Tabela 44 – Análise estatística do erro da região Cazeca . . . . .	194
Tabela 45 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Cazeca . . . . .	198
Tabela 46 – Polinômios de interpolação da região Martins . . . . .	203
Tabela 47 – Análises estatísticas da região Martins . . . . .	204
Tabela 48 – Análise estatística do erro da região Martins . . . . .	204
Tabela 49 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Martins . . . . .	208
Tabela 50 – Polinômios de interpolação da região Gávea . . . . .	213
Tabela 51 – Análises estatísticas da região Gávea . . . . .	214
Tabela 52 – Análise estatística do erro da região Gávea . . . . .	214
Tabela 53 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Gávea . . . . .	218
Tabela 54 – Localização dos Viadutos . . . . .	219
Tabela 55 – Desvanecimentos Viaduto 1 . . . . .	220
Tabela 56 – Desvanecimentos Viaduto 2 . . . . .	221
Tabela 57 – Desvanecimentos Viaduto 3 . . . . .	222
Tabela 58 – Desvanecimentos Viaduto 4 . . . . .	223
Tabela 59 – Desvanecimentos Viaduto 5 . . . . .	224
Tabela 60 – Desvanecimentos Viaduto 6 . . . . .	225
Tabela 61 – Desvanecimentos Viaduto 7 . . . . .	226
Tabela 62 – Desvanecimento dos sete viadutos . . . . .	227
Tabela 63 – Desvanecimentos dos Viadutos pela a distância . . . . .	227
Tabela 64 – Resultados dos parâmetros do boxplot das regiões de Uberlândia . . . . .	228
Tabela 65 – Erro RMS das regiões de Uberlândia . . . . .	230
Tabela 66 – Desvios padrões das regiões de Uberlândia . . . . .	230

---

## Lista de siglas

**ANATEL** Agência Nacional de Telecomunicações

**AM** Modulação de Amplitude

**CPqD** Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações

**ELF** *Extremely Low Frequency*

**EHF** *Extremely High Frequency*

**EMQ** Estimadores de Mínimos Quadrados

**FM** Modulação de frequência

**GPS** *Global Positioning System*

**HF** *High Frequency*

**Hci** centro de fase

**ITU** *International Telecommunication Union*

**LF** *Low Frequency*

**L** perda de propagação

**MC** Ministério das Comunicações do Brasil

**MF** *Medium Frequency*

**MCTIC** ministério da ciência, tecnologia, inovações e comunicações

**MRLM** modelo de regressão linear múltipla

**Rx** Receptor

**RNA** Rede neural artificial

**RFS** *Radio Frequency Systems*

**SHF** *Super High Frequency*

**TV** Televisores

**Tx** Transmissor

**UHF** *Ultra High Frequency*

**VLF** *Very Low Frequency*

**VHF** *Very High Frequency*



---

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação . . . . .</b>	<b>32</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do trabalho . . . . .</b>	<b>34</b>
<b>2</b>	<b>PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>2.2</b>	<b>Equações de Maxwell . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>2.3</b>	<b>Ondas eletromagnéticas . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>2.4</b>	<b>Espectro de frequência . . . . .</b>	<b>39</b>
<b>2.5</b>	<b>Meios de comunicações . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>2.6</b>	<b>Mecanismos de propagação . . . . .</b>	<b>41</b>
<b>2.7</b>	<b>Tipos de propagação . . . . .</b>	<b>42</b>
2.7.1	Ondas de superfície . . . . .	42
2.7.2	Ondas ionosféricas . . . . .	42
2.7.3	Ondas diretas ou de visada diretas . . . . .	43
2.7.4	Ondas difratadas . . . . .	43
2.7.5	Ondas espalhadas . . . . .	44
<b>2.8</b>	<b>Considerações finais deste capítulo . . . . .</b>	<b>44</b>
<b>3</b>	<b>MODELOS DE PROPAGAÇÃO . . . . .</b>	<b>45</b>
<b>3.1</b>	<b>Espaço livre . . . . .</b>	<b>45</b>
<b>3.2</b>	<b>HATA . . . . .</b>	<b>46</b>
<b>3.3</b>	<b>ITU-R P.1546-5 . . . . .</b>	<b>50</b>
3.3.1	Anexo 1 - Introdução . . . . .	51
3.3.2	Anexo 2 - Faixa de frequência de 30 MHz a 300 MHz . . . . .	51
3.3.3	Anexo 3 - Faixa de frequência de 300 MHz a 1 000 MHz . . . . .	52
3.3.4	Anexo 4 - Faixa de frequência de 1 000 MHz a 4 000 MHz . . . . .	52

3.3.5	Anexo 5 - Informações e métodos adicionais para implantar o método de previsão . . . . .	53
3.4	<b>Anexo 6 - Procedimentos para a aplicação da ITU-R P.1546 . .</b>	<b>69</b>
3.5	<b>Anexo 7 - Ajuste para diferentes regiões climáticas . . . . .</b>	<b>73</b>
3.6	<b>Anexo 8 - Comparação com o modelo de Okumura-Hata . . . .</b>	<b>74</b>
3.7	<b>Considerações finais deste capítulo . . . . .</b>	<b>75</b>
4	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>77</b>
4.1	Sistema de transmissão . . . . .	77
4.2	Sistema de recepção . . . . .	80
4.3	Procedimentos de medição . . . . .	81
4.4	Considerações finais deste capítulo . . . . .	83
5	<b>ANÁLISE DA VARIABILIDADE DA INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO . . . . .</b>	<b>85</b>
5.1	Setorização . . . . .	85
5.2	Comportamento da intensidade do campo elétrico . . . . .	86
5.3	Interpolação linear . . . . .	88
5.4	Interpolação do campo bidimensional . . . . .	91
5.5	Comparação dos modelos de propagação . . . . .	95
5.6	Correlação das regiões . . . . .	101
5.7	Considerações finais deste capítulo . . . . .	102
6	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>103</b>
6.1	<b>Região Central . . . . .</b>	<b>103</b>
6.1.1	Interpolação linear da região Central . . . . .	106
6.1.2	Interpolação bidimensional da região Central . . . . .	108
6.1.3	Comparação dos modelos de propagação da região Central . . . . .	113
6.2	<b>Região Roosevelt . . . . .</b>	<b>115</b>
6.2.1	Interpolação linear da região Roosevelt . . . . .	117
6.2.2	Interpolação bidimensional da região Roosevelt . . . . .	119
6.2.3	Comparação dos modelos de propagação da região Roosevelt . . . . .	124
6.3	<b>Região Brasil . . . . .</b>	<b>125</b>
6.3.1	Interpolação linear da região Brasil . . . . .	128
6.3.2	Interpolação bidimensional da região Brasil . . . . .	130
6.3.3	Comparação dos modelos de propagação da região Brasil . . . . .	135
6.4	<b>Região Lagoinha . . . . .</b>	<b>136</b>
6.4.1	Interpolação linear da região Lagoinha . . . . .	138
6.4.2	Interpolação bidimensional da região Lagoinha . . . . .	140
6.4.3	Comparação dos modelos de propagação na região Lagoinha . . . . .	145

<b>6.5</b>	<b>Região Santa Mônica</b>	<b>146</b>
6.5.1	Interpolação linear da região Santa Mônica	148
6.5.2	Interpolação bidimensional da região Santa Mônica	150
6.5.3	Comparação dos modelos de propagação na região do Santa Mônica	156
<b>6.6</b>	<b>Região Cidade Jardim</b>	<b>157</b>
6.6.1	Interpolação linear da região Cidade Jardim	159
6.6.2	Interpolação bidimensional da região Cidade Jardim	161
6.6.3	Comparação dos modelos de propagação da região Cidade Jardim	166
<b>6.7</b>	<b>Região Daniel Fonseca</b>	<b>167</b>
6.7.1	Interpolação linear da região Daniel Fonseca	170
6.7.2	Interpolação bidimensional da região Daniel Fonseca	172
6.7.3	Comparação dos modelos de propagação na região Daniel Fonseca	177
<b>6.8</b>	<b>Região Rondon Pacheco</b>	<b>178</b>
6.8.1	Interpolação linear da região Rondon Pacheco	180
6.8.2	Interpolação bidimensional da região Rondon Pacheco	182
6.8.3	Comparação dos modelos de propagação na região Rondon Pacheco	188
<b>6.9</b>	<b>Região Cazeca</b>	<b>189</b>
6.9.1	Interpolação linear da região Cazeca	191
6.9.2	Interpolação bidimensional da região Cazeca	193
6.9.3	Comparação dos modelos de propagação na região Cazeca	198
<b>6.10</b>	<b>Região Martins</b>	<b>199</b>
6.10.1	Interpolação linear da região Martins	201
6.10.2	Interpolação bidimensional da região Martins	203
6.10.3	Comparação dos modelos de propagação na região Martins	208
<b>6.11</b>	<b>Região Gávea</b>	<b>209</b>
6.11.1	Interpolação linear da região Gávea	211
6.11.2	Interpolação bidimensional da região Gávea	213
6.11.3	Comparação dos modelos de propagação da região Gávea	218
<b>6.12</b>	<b>Análise do desvanecimento do campo elétrico nos viadutos das Regiões</b>	<b>219</b>
6.12.1	Viaduto 1	219
6.12.2	Viaduto 2	220
6.12.3	Viaduto 3	221
6.12.4	Viaduto 4	222
6.12.5	Viaduto 5	223
6.12.6	Viaduto 6	224
6.12.7	Viaduto 7	225
6.12.8	Correlação dos viadutos	226
<b>6.13</b>	<b>Correlação das Regiões</b>	<b>227</b>

6.13.1	Boxplot das regiões . . . . .	227
6.13.2	Análises estatísticas das regiões . . . . .	229
6.14	Considerações finais deste capítulo . . . . .	231
7	CONCLUSÃO . . . . .	233
7.1	Principais contribuições . . . . .	234
7.2	Trabalhos futuros . . . . .	234
REFERÊNCIAS . . . . .		237

## ANEXOS 241

ANEXO A	– ALGORITMOS MATLAB . . . . .	243
A.1	Conversão de potência elétrica em dbm para campo elétrico em $\text{dB}\mu\text{Vm}$ . . . . .	243
A.2	Função da RNA . . . . .	244
A.3	Teste da normalidade . . . . .	250
A.4	Interpolação Linear . . . . .	250
A.5	Interpolação Bidimensional . . . . .	252
A.6	comparação . . . . .	254
A.7	Teste comparação . . . . .	258
A.8	Comparação modelos . . . . .	258

---

## Introdução

Para que hoje consigamos desfrutar de muitos sistemas de radiocomunicação que facilitam nossas vidas, como a radiodifusão sonora e de imagens, comunicações móveis e por satélite, telefonia móvel e redes de computadores, entre outras tecnologias (RIBEIRO, 2012), grandes descobertas foram realizadas, por meio de muitas pesquisas e inúmeros experimentos científicos isolados. Isso porque muitos cientistas acreditavam que a Eletricidade e o Eletromagnetismo não tinham relação entre si e, por isso, durante um período muito longo, caminhos opostos de investigação foram percorridos (ALENCAR; QUEIROZ, 2010).

Nota-se que, com o passar dos anos, a tecnologia sempre evoluiu a cada dia, principalmente em *hardwares* e *softwares*. Nos *hardwares*, esses avanços se deram por conta da evolução da eletrônica e dos circuitos integrados; já os *softwares*, são capazes de usar melhor os recursos disponíveis nos *hardwares*, como pode-se observar em aparelhos celulares, Televisores (TV), rádios, computadores, entre outros. Todos esses equipamentos comunicam-se através de ondas eletromagnéticas, por meio de um Transmissor (Tx) e de um Receptor (Rx).

Nesse processo de comunicação entre o transmissor e o receptor, geralmente encontramos alguns obstáculos, como prédios, casas, árvores, viadutos, chuva, neblina e etc., que acabam dificultando a transmissão do sinal eletromagnético. Nota-se que, com o crescimento do setor da construção civil no Brasil, nos últimos anos ampliou-se a quantidade de obstáculos e, como consequência, muitas regiões de sombra foram geradas entre o transmissor e o receptor, em vários pontos das cidades brasileiras.

A área da telecomunicação que se relaciona à transmissão e à recepção do sinal eletromagnético denomina-se de "propagação de ondas eletromagnéticas". Durante a propagação da onda, ocorre o efeito da perda de potência em todos os sistemas de telecomunicações, como televisão, rádio, telefonia móvel e satélite. Para conseguir minimizar essas perdas nos sistemas de telecomunicações, usam-se amplificadores, bobinas e antenas com maiores ganhos, deixando o sistema de transmissão muito oneroso, o que acaba por torná-lo inviável.

Uma forma de fazer com que os sistemas de transmissão não fiquem muito caros é com a utilização dos modelos de propagação matemáticos determinísticos e empíricos. Tais modelos simulam, por aproximação, o comportamento das ondas eletromagnéticas durante a propagação destas em um determinado meio. O primeiro modelo de propagação desenvolvido foi o modelo "espaço livre". Logo em seguida, surgiu o modelo em Terra Plana, denominado "modelo de propagação determinístico". Já como modelos empíricos, os mais comuns são Hata e Log-Distância, que são criados a partir de resultados de coletas de potência elétrica e campo elétrico. Com os vários modelos de propagação existentes, consegue-se prever o comportamento do sinal eletromagnético em determinados pontos.

E notório que, em propagação de ondas eletromagnética, não se consegue ver uma grande evolução diária como em *hardwares* e *softwares*. O que se observa que a partir das descobertas de como a onda se propaga e os fenômenos que se possa ocorrer durante o percurso do transmissor e do receptor são os mesmos, como difração, refração, reflexão, absorção, interferência, espalhamento, polarização e dispersão.

## 1.1 Motivação

O perfil urbanístico das cidades influencia diretamente o processo de propagação das ondas eletromagnéticas. Os desvanecimentos por multipercurso, refrações, difração, absorção e reflexões, que ocorrem ao longo da transmissão da onda eletromagnética, são causados por obstáculos como prédios, árvores, chuva, neblina, como dito anteriormente.

Durante o caminho percorrido pela onda, os desvanecimentos acontecem e, consequentemente, afetam a qualidade do sinal em todos os sistemas de telecomunicações sem fio, como TV, rádio, celular. Com isso, é importante que se faça a previsão de perda de percurso, para que seja levado em consideração nos projetos dos sistemas de telecomunicações. O cálculo da perda de propagação irá afetar o projeto do sistema, otimizando-o, em questões como a altura das antenas, a localização e a potência do rádio transmissor, entre outros.

A propagação das ondas de rádio em ambientes urbanos é fortemente influenciada pela natureza do ambiente e, em particular, pelo tamanho e a quantidade de obstáculos existentes no meio. Consequentemente, reflete diretamente na obstrução da visada direta do transmissor e receptor.

Como pode-se ver, os efeitos de desvanecimentos acontecem em todos os sistemas de telecomunicações terrestres. Com a transição do sistema de TV analógico para TV digital no sistema de radiodifusão no Brasil, é necessário o estudo da propagação de ondas do sistema de TV digital.

No dia 2 de dezembro de 2007, na cidade de São Paulo, deu-se o início da transmissão do sinal de TV digital no Brasil (ESPERANTE; AKAMINE; BEDICKS, 2016). Essa tecnologia veio substituir a analógica, com grandes diferenciais e desafios a serem enfren-

tados, como a melhoria da qualidade da imagem e do som, além da interatividade com o telespectador (SANTOS et al., 2016) (CASELLA; PEREIRA, 2016).

Desde então as emissoras de televisão brasileiras começaram a enfrentar desafios para a implantação do sistema digital: a manutenção da abrangência do sinal analógico, com a tecnologia digital; as dificuldades para garantir a qualidade do sinal em diferentes pontos da cidade, devido aos novos obstáculos criados pela a construção civil; ter uma boa recepção do sinal em ambientes fechados onde não se tem antena *Ultra High Frequency* (UHF) externa e uma recepção móvel com alta qualidade. Nesse contexto, as emissoras passaram por transformações evidentes, buscando sempre manter a qualidade do sinal e a cobertura da região urbana (SANTOS et al., 2016).

Como a determinação da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e do Ministério das Comunicações do Brasil (MC), publicado em 29 de julho de 2013, pelo o decreto federal 8.061, com o cronograma de desligamento do sinal de TV analógica no Brasil (CASELLA; PEREIRA, 2016) (MC, 2016) (MC, 2016) (MCTIC, 2016), as emissoras de TV aberta vêm preparando-se para o desligamento do sinal analógico.

Desse modo, as emissoras de TV têm de realizar levantamentos constantes sobre a propagação do sinal para encontrar soluções que minimizem tais problemas, como a implantação de repetidores de sinal (*gap-fillers*) e para que consigam manter a recepção do sinal aberto de TV digital em toda a abrangência do sinal analógico (SANTOS et al., 2016).

Uma ferramenta que auxilia o engenheiro projetista na elaboração do projeto técnico, a fim de minimizar custos, são os *softwares* de modelos de propagação, capazes de plotar manchas do sinal *Very High Frequency* (VHF) e UHF na região urbana. Outra análise que pode ser feita com os *softwares* de propagação é a comparação das manchas dos sinais UHF e VHF, com vários modelos de propagação existentes.

Os modelos de propagação existentes foram criados em grandes centros como Japão, Estados Unidos e Europa. O campo eletromagnético de um ponto para outro varia por diversos fatores, como: distância do transmissor, perfil do terreno, perda de sinal através de obstáculos, entre outros. Como esses modelos foram criados para cidades de grande porte e de perfis urbanísticos diferentes, faz-se necessária a verificação do comportamento do sinal digital em Uberlândia, com o intuito de identificar o modelo de propagação existente mais adequado ao real/preciso.

## 1.2 Objetivos

Como descrito no item anterior, a questão da cobertura do sinal eletromagnético representa um grande problema, devido aos obstáculos entre o transmissor e o receptor, e pelo fato de os modelos de propagação hoje utilizados foram idealizados para cidades de grande porte.

Assim sendo, o objetivo geral dessa tese é analisar a variabilidade do campo elétrico para a cidade de Uberlândia-MG. Na iminência de verificar a variabilidade do campo elétrico e necessário realizar alguns objetivos específicos.

Os objetivos específicos são:

- Realizar coletas de amostras de potência elétrica;
- Classificar as amostras em setorizações;
- Verificar o comportamento e variação da intensidade do campo elétrico através da estatística descritiva;
- Viabilizar a compreensão do comportamento do campo elétrico em cada região;
- Realizar a interpolação linear;
- Verificar se os erros do campo elétrico em  $dB\mu V/m$  e  $\mu V/m$  se ajustam as funções distribuição cumulativa normal e exponencial;
- Realizar a interpolação bidimensional;
- Verificar se o campo elétrico em  $dB\mu V/m$  e  $\mu V/m$  se ajustam a uma pdf Gaussiana e *Rayleigh*;
- Gerar uma Rede neural artificial (RNA);
- Comparar os modelos de propagação;
- Realizar correlação das regiões.

## 1.3 Organização do trabalho

A organização desse trabalho está dividida em sete capítulos. No primeiro capítulo, introdutório, foi apresentado uma contextualização, motivação e o objetivo dessa tese. Em sequência o segundo capítulo apresenta uma fundamentação teórica resumida de propagação de ondas eletromagnéticas. No capítulo três apresenta os modelos de propagação espaço livre, hata e ITU-R P.1546-5. O quatro capítulo, expõe a metodologia adotada para as coletas de amostras de campo elétrico. Já o capítulo cinco, será exposto a metodologia da análise da variabilidade da intensidade do campo elétrico. E o capítulo seis evidencia os resultados das regiões analisadas. E por fim, o capítulo 7 explana as conclusões desta tese.



---

# Propagação de Ondas Eletromagnéticas

## 2.1 Introdução

O início dos estudos sobre o eletromagnetismo deu-se com os gregos, por meio da observação da pedra Magnetita (pedra-imã), em que notaram que a pedra atraía espontaneamente o ferro (WILLIAMS, 1996). Em seguida, verificou-se que uma lasca dessa pedra, suspensa no ar, sempre virava-se para a mesma direção (WILLIAMS, 1996). A partir dessa descoberta, muitos cientistas, como William Gilbert (1600), Charles Augustin de Coulomb (1785), Hans Christian Oersted (1813), Michael Faraday (1821), James Clerk Maxwell (1862), Mahlon Loomis (1873), Nathan Stubblefield (1892), Alexander Popov (1895), Herich Hertz (1887), Sir Oliver Lodge (1888), Guglielmo Marconi (1897), entre outros, fizeram grandes descobertas (WILLIAMS, 1996) (ÍON, 2018), as quais contribuíram para o surgimento de vários meios de comunicação.

Desses cientistas, vale destacar a importância da descoberta do físico escocês James C. Maxwell, em 1864, o qual provou teoricamente a presença de ondas eletromagnéticas no vácuo (SILVA, 2014) (POZAR, 2011). Ele é considerado como o fundador da teoria eletromagnética (SADIKU, 2004).

Durante o período de 1885 a 1887, Oliver Heaviside formulou a teoria de Maxwell, introduzindo notação vetorial e fornecendo uma base para aplicações práticas de ondas guiadas e linhas de transmissão (POZAR, 2011).

Heinrich Hertz um professor alemão de física, no período de 1887 a 1891, realizou um conjunto de experimentos, validando a teoria de ondas eletromagnéticas de Maxwell (SILVA, 2014) (POZAR, 2011).

As descobertas desses grandes cientistas possibilitaram à toda sociedade desfrutar de muitos sistemas de radiocomunicação como ouvir músicas e notícias nos rádios, assistir a programas de TV, aquecer alimentos, acessar à internet, entre outros serviços que facilitam a vida de todos.

## 2.2 Equações de Maxwell

Maxwell agrupou os trabalhos de vários cientistas como Ampère, Faraday, Gauss e Coulomb e descreveu as quatro equações de ondas eletromagnéticas que representam a base da teoria eletromagnética (JR; BUCK, 2013) (PIAU et al., 2013) (VILANOVA et al., 2013) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016) (JACKSON, 1999). Essas equações são representadas pelas as equações 1, 2, 3 e 4, conforme demonstradas abaixo:

Lei de Ampere:

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1)$$

Lei de Faraday:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2)$$

Lei de Gauss:

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho \quad (3)$$

Lei de Gauss do Campo Magnético:

$$\nabla \cdot (\mu \vec{H}) = 0 \quad (4)$$

Onde:

$\nabla \times \vec{E}$ : rotacional do campo elétrico;

$\sigma$  é a condutividade do meio;

$\vec{H}$  é o campo magnético;

$\vec{E}$  é o campo elétrico;

$\epsilon$  é a permissividade do meio;

$\mu$  : permeabilidade do meio;

$\nabla \cdot \vec{E}$  é o divergente do campo elétrico.

O rotacional do campo elétrico é dado por:

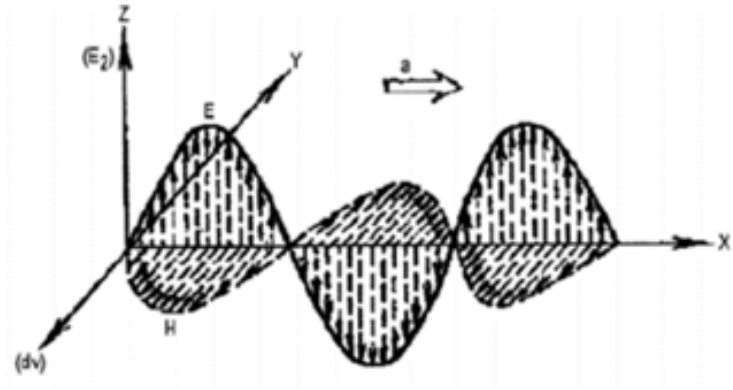
$$\nabla \times \vec{E} = \left( \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) \vec{i}_x + \left( \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \vec{i}_y + \left( \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \vec{i}_z \quad (5)$$

O divergente do campo elétrico é expresso por:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} \quad (6)$$

Em (JR; BUCK, 2013) (CARRIJO, 2007) demonstra para uma onda plana se deslocando apenas na direção x, como indicado na figura 1. Assim, as equações 1 e 2 tornam-se, respectivamente,

Figura 1 – Onda propagando-se na direção x



Fonte: (JR; BUCK, 2013) (CARRIJO, 2007)

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = \sigma E_z + \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (7)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial x} = \mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (8)$$

e para a onda eletromagnética propagando em um dielétrico se obtém

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} \quad (9)$$

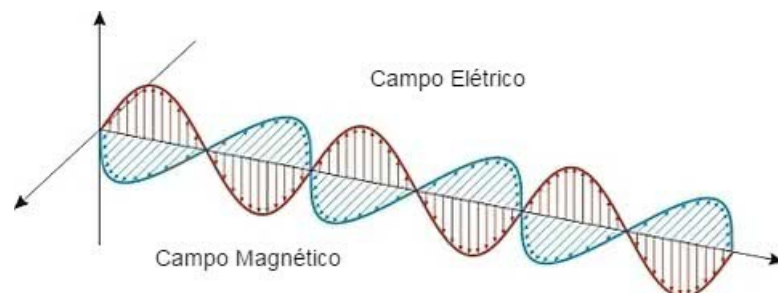
Para uma onda eletromagnética propagando em um condutor imperfeito obtém

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (10)$$

## 2.3 Ondas eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas são constituídas por campos elétricos e magnéticos. Esses dois campos são mostrados por ondas senoidais, conforme figura 2 (JR; BUCK, 2013) (CARRIJO, 2007) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Figura 2 – Representação da onda eletromagnética



Fonte: (MUNIZ, 2018)

A equação matemática que descreve a forma de uma onda eletromagnética senoidal em um dado instante de tempo é dada pela equação 11.

$$y(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

Onde:

$A$  representa a amplitude;

$f$  é a frequência da onda eletromagnética;

$\omega$  é a frequência angular da onda. A qual é expressa pela equação 12.

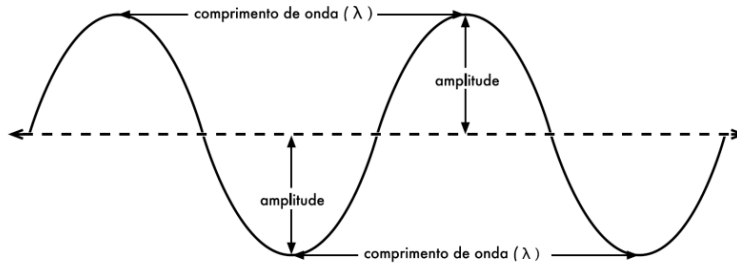
$$\omega = 2\pi f \quad (12)$$

$t$  é o tempo.

$\varphi$  é a fase da onda. Quando a fase estiver sendo representada por um valor negativo esse valor significa um atraso, logo o valor positivo caracteriza um adiantamento do sinal.

Pela equação da onda senoidal representada na equação 11 e pela figura 3 é possível identificar os parâmetros das ondas senoidais: frequência ( $f$ ), frequência angular ( $\omega$ ), período ( $T$ ), velocidade de propagação, comprimento de onda ( $\lambda$ ), amplitude ( $A$ ), fase e polarização (JR; BUCK, 2013) (CARRIJO, 2007) (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

Figura 3 – Características de uma onda senoidal



Fonte: Elaborada pelo autor.

A frequência é o número de ondas completas que passam por um ponto fixo dentro de um período de tempo. O período de uma onda é o intervalo de tempo necessário para que os vetores campo elétrico e magnético da onda voltem a se repetir. O período ( $T$ ) é expresso por:

$$T = \frac{1}{f} \quad (13)$$

A velocidade de propagação da onda depende do meio no qual ela se propaga e é determinada pela equação 14. Em que,  $\mu$  é a permeabilidade do meio e  $\varepsilon$  é a permissividade do meio.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (14)$$

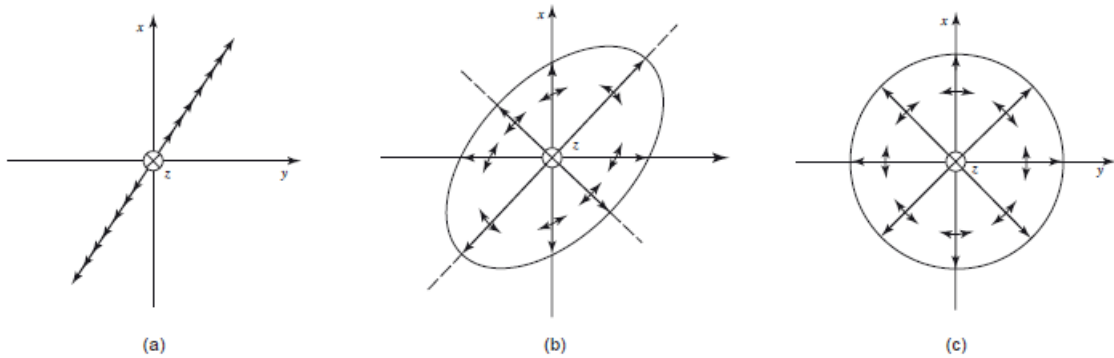
No vácuo, a permeabilidade e permissividade são  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$  e  $\epsilon_0 = 8,854 * 10^{-12}$ , respectivamente. Portanto, a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética, no vácuo, é de  $c=299.792,5$  Km/s, aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s (MIYOSHI; SANCHEZ, 2002).

O comprimento de onda ( $\lambda$ ) é a distância medida de um ponto em uma onda até a parte equivalente da onda seguinte, sendo determinado pela equação 15.

$$v = \frac{\lambda}{f} \quad (15)$$

Polarização é a maneira como os campos elétrico e magnético se orientam no espaço. A polarização das ondas eletromagnéticas são classificadas em linear, circular e elíptica (MIYOSHI; SANCHEZ, 2002) (PARSONS, 2000) (MEDEIROS, 2005). Os nomes das polarizações se referem à figura desenhada no plano perpendicular à direção de propagação. Na figura 4 são apresentadas as três categorias de polarização.

Figura 4 – Polarização da onda (a) linear (b) elíptica (c) circular



Fonte: (VASCONCELOS et al., 2017)

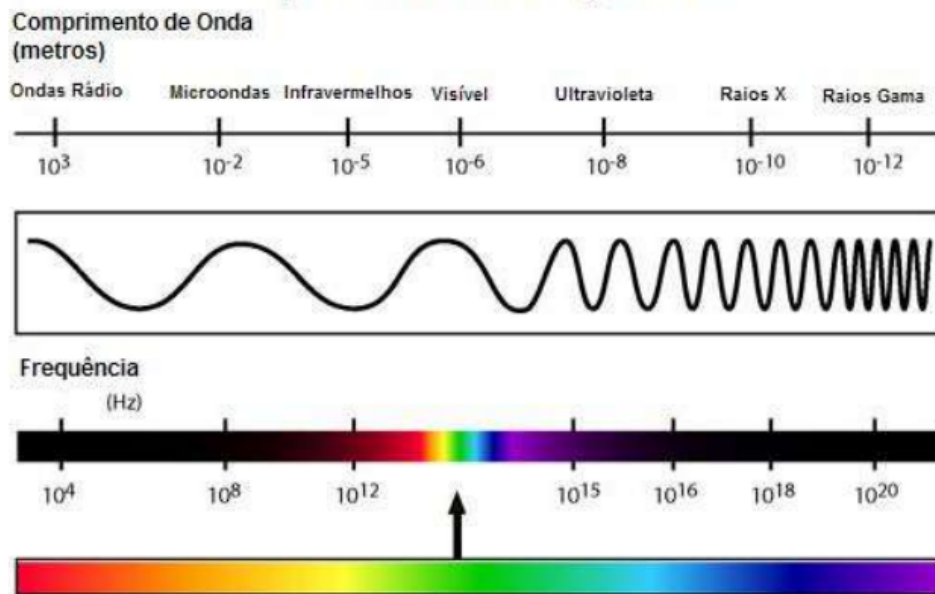
Se o vetor de campo elétrico em um ponto do espaço estiver sempre orientado ao longo da mesma linha reta a cada instante, a polarização da onda é linear (CARRIJO, 2007). A polarização circular caracteriza o vetor do campo elétrico em um determinado ponto no espaço, traçar um círculo como uma função de tempo (CARRIJO, 2007). Quando a figura traçada pelo vetor campo elétrico é uma elipse, a polarização é denominada elíptica.

## 2.4 Espectro de frequência

Com a frequência e o comprimento de onda estabeleceu-se o espectro de frequência das ondas eletromagnéticas (MIYOSHI; SANCHEZ, 2002) (PARSONS, 2000). Conforme a figura 5, o espectro de frequência é composto por sete tipos de ondas: Rádio, Micro-ondas,

Infravermelho, Luz visível, Ultravioleta, Raios X e Raios Gama (MIYOSHI; SANCHEZ, 2002) (PARSONS, 2000).

Figura 5 – Espectro de frequência



Fonte: (SILVA, 2014)

A *International Telecommunication Union* (ITU) União Internacional de Telecomunicações (ITU) em 1932, definiu o espectro de radiofrequência e a dividiu em nove faixas: *Extremely Low Frequency* (ELF), *Very Low Frequency* (VLF), *Low Frequency* (LF), *Medium Frequency* (MF), *High Frequency* (HF), VHF, UHF, *Super High Frequency* (SHF), *Extremely High Frequency* (EHF). A tabela 1 apresenta suas bandas, faixas de frequências e aplicações (MIYOSHI; SANCHEZ, 2002)(PARSONS, 2000).

Tabela 1 – Serviços de telecomunicações associados ao espectro de frequência

Banda	Faixa de frequência	Aplicação
ELF	< 3 kHz	Comunicação banda base
VLF	3 – 30 kHz	Prospecção e comunicação com submarino
LF	30 – 300 kHz	Navegação de longo alcance e comunicações marítimas
MF	300 kHz – 3 MHz	Rádio difusão Modulação de Amplitude (AM) e comunicações marítimas
HF	3 – 30 MHz	Radio amador, rádio difusão em ondas curtas, comunicações militares, comunicações com navios, telefone, comunicações comerciais de voz e dados
VHF	30 – 300 MHz	Televisão em VHF, rádio Modulação de frequência (FM), comunicações militares, comunicações espaçonaves, telemetria de satélite, comunicações com aeronaves, auxílios a radio-navegação, enlaces de telefonia
UHF	300 MHz – 3 GHz	Televisão UHF, telefonia, celular, <i>Wireless</i> , <i>Wimax</i> , auxílios a rádio navegação, radar, enlaces de micro-ondas e satélite
SHF	3 – 30 GHz	Comunicações via satélite, <i>Wimax</i> , <i>Wireless</i> e enlaces de micro-ondas
EHF	30 – 300 GHz	Radar, comunicações via satélite em fase experimental

## 2.5 Meios de comunicações

Existem diferentes meios de comunicação entre a transmissão e recepção em um sistema de comunicação. Os mais comuns são o espaço livre, troposfera, ionosfera, cabo coaxial, fibra óptica, par trançado e fita paralela. Esses meios são utilizados para trafegar a informação ao receptor (MEDEIROS, 2005). Será abordada nesta tese a comunicação no espaço, cujo meio utilizado é a atmosfera. Há no espaço três situações de propagação: no espaço livre, na troposfera e na ionosfera (CARRIJO, 2007).

A propagação no espaço livre só é possível quando o transmissor e o receptor estão livres de qualquer obstrução no caminho direto entre eles (FRIIS, 1946).

A troposfera é a camada adjacente à superfície terrestre e se estende até uma altitude de aproximadamente 11 Km. É composta por gases como oxigênio, nitrogênio e dióxido de carbono. O efeito causado na propagação de ondas de rádio é o da refração, o qual age na trajetória das ondas provocando o aumento da velocidade de propagação devido à elevação da altitude (MIYOSHI; SANCHEZ, 2002).

A ionosfera é a camada mais alta da atmosfera, se estendendo à altitude de 50 Km até 350 Km. É uma camada ionizada devido ao seu constante ataque por partículas provenientes do Sol e de raios cósmicos. A composição da ionosfera varia com a hora, com a estação do ano e até mesmo com o nível de atividade solar. Durante o dia a incidência solar é maior, o que provoca o aumento da densidade eletrônica da ionosfera. Consequentemente, durante à noite a densidade eletrônica da ionosfera é menor. Estas flutuações acontecem também devido à atividade solar, isto é, quanto maior for atividade solar maior será a densidade eletrônica (CARRIJO, 2007) (MIYOSHI; SANCHEZ, 2002).

## 2.6 Mecanismos de propagação

Os três mecanismos de propagação de ondas eletromagnética que influenciam a propagação da onda são reflexão, difração e dispersão (RAPPAPORT, 2009).

A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética em propagação colide com um objeto que possui dimensões muito grandes em comparação com o comprimento da onda que se propaga. Reflexões ocorrem na superfície da terra e nos prédios e paredes (RAPPAPORT, 2009).

A difração ocorre quando o caminho de rádio entre o transmissor e o receptor é obstruído por uma superfície que possui irregularidades afiadas (arestas) (RAPPAPORT, 2009).

A dispersão ocorre quando o meio pelo qual a onda trafega consiste de objetos com dimensões que são pequenas em comparação com o comprimento de onda, e onde o número de obstáculos por volume unitário é grande. As ondas dispersas são produzidas por superfícies ásperas, pequenos objetos, ou por outras irregularidades no canal. Na prática,

folhagens, sinais de trânsito e postes de iluminação induzem à dispersão (RAPPAPORT, 2009).

## 2.7 Tipos de propagação

As ondas de rádio que se propagam na atmosfera podem ser classificadas de acordo com a frequência, alcance, atenuação, mas também podem ser classificadas de acordo com a influência dos meios e obstáculos que estão ao longo da sua trajetória como ondas de superfície, ionosféricas, diretas, difratadas e espalhadas (MIYOSHI; SANCHEZ, 2002).

### 2.7.1 Ondas de superfície

As ondas de superfície aparecem em frequências mais baixas e se caracterizam por acompanhar a superfície da terra atingindo longas distâncias (CARRIJO, 2007). A figura 6 ilustra como as ondas de superfície se propagam.

Figura 6 – Onda de superfície ou onda de solo (abaixo 2 MHz)



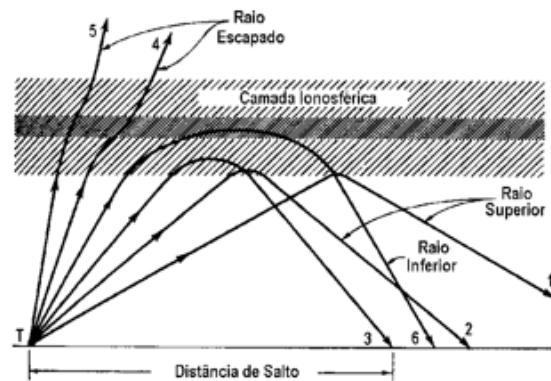
Fonte: (CARRIJO, 2007)

### 2.7.2 Ondas ionosféricas

Para frequências inferiores à 30 MHz, as ondas de propagação serão refletidas e absorvidas pelas camadas D, E e F da ionosfera. Já para as ondas superiores a 30 MHz, as ondas se propagam pela ionosfera (CARRIJO, 2007). A figura 7 ilustra como as ondas ionosféricas se propagam.



Figura 7 – Ondas com reflexão ionosférica

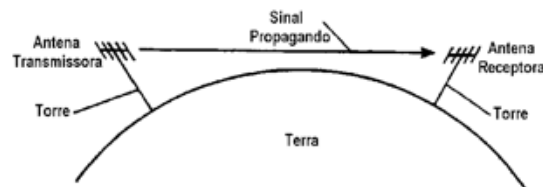


Fonte: (CARRIJO, 2007)

### 2.7.3 Ondas diretas ou de visada diretas

As ondas diretas se propagam em visada direta (CARRIJO, 2007), como mostra a figura 8.

Figura 8 – Onda em visada direta (acima de 30 MHz)

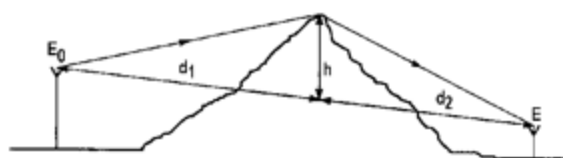


Fonte: (CARRIJO, 2007)

### 2.7.4 Ondas difratadas

As ondas difratadas são aquelas que atingem antenas que não estão na visada direta e são explicadas pela teoria da difração de Fresnel (CARRIJO, 2007). A figura 9 corresponde à propagação por difração.

Figura 9 – Propagação por difração (obstáculo gume de faca)

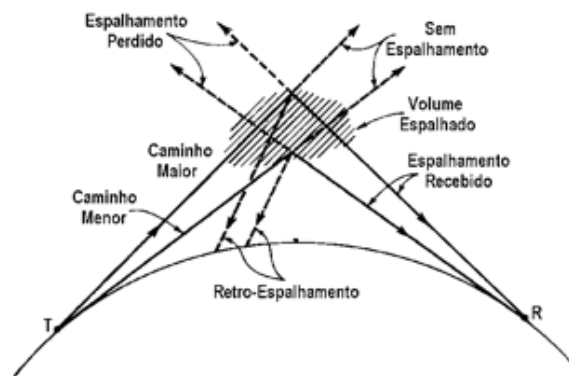


Fonte: (CARRIJO, 2007)

### 2.7.5 Ondas espalhadas

Na propagação por espalhamento as ondas eletromagnéticas atingem longas distâncias, efeito este que é explicado pelo espalhamento do sinal na ionosfera ou troposfera (CARRIJO, 2007). Na figura 10 pode-se observar a propagação por espalhamento.

Figura 10 – Propagação por espalhamento



Fonte: (CARRIJO, 2007)

## 2.8 Considerações finais deste capítulo

Neste capítulo foram abordados as principais características de propagação de ondas, apresentando uma introdução do surgimento de ondas eletromagnéticas. Na seção 2.2 foram apresentadas as equações de Maxwell. Em seguida, na seção 2.3 foram expostas a definição de ondas eletromagnéticas e os principais parâmetros da onda. Na seção 2.4 foi apresentado o espectro de frequência. Em sequência na seção 2.5 foi exposto os meios de comunicações. Na seção 2.6 foram abordados os mecanismos de propagação. Por fim, na seção 2.7 apresentou-se os tipos de propagação.

## Modelos de propagação

Os modelos de propagação de ondas eletromagnéticas são classificados em três modelos: teóricos, empíricos e híbridos (CAVALCANTE, 2010).

Os modelos teóricos carecem da utilização de bases de dados topográficos. Os modelos empíricos são embasados em medidas, direcionando os fatores que afetam a propagação de onda. E os modelos híbridos abrangem os modelos empíricos e teóricos. (CAVALCANTE, 2010).

### 3.1 Espaço livre

Em Maio de 1946, Harold Trap Friis criou a lei de Friis (FRIIS, 1946). Essa lei também conhecida como modelo do espaço livre. O qual considera apenas o caso em que o transmissor e o receptor estão localizados no espaço livre, portanto livres de qualquer obstrução no caminho direto entre eles. Como a maioria dos modelos de predição em larga escala, o modelo do espaço livre prediz o nível do sinal recebido como função da distância de separação entre transmissor e receptor elevada e uma certa potência. Considerando-se uma antena transmissora localizada no espaço livre, com ganho  $G_T$  na direção da antena receptora e potência transmitida  $P_T$ , a densidade de potência a uma distância  $d$  é dada pela equação 16 (FRIIS, 1946).

$$W = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \quad (16)$$

A potência na antena receptora, com ganho  $G_R$  e área efetiva  $A$  é dada pelas equações 17 e 18.

$$A = \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad (17)$$

$$P_R = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad (18)$$

Agrupando-se as equações 17 e 18, encontra-se à equação 19 que representa o espaço livre.

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left[ \frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \quad (19)$$

Sendo a perda de propagação (L) a relação entre a potência transmitida e a potência recebida, podemos escrever a perda no espaço livre como representado na equação 20.

$$L[dB] = 32,44 - 10\log G_T - 10\log G_R + 20\log f_{MHz} + 20\log d_{Km} \quad (20)$$

## 3.2 HATA

Para a previsão de sinal em áreas urbanas o modelo mais utilizado é o de Okumura, o qual se aplica na faixa UHF de 150 a 1920 MHz, em distâncias de 1 km a 100 km. Ele é utilizado apenas para alturas de estação base de 30 m a 1000 m (RAPPAPORT, 2009).

Na cidade de Tóquio no Japão em 1968, Okumura aferiu várias medições da intensidade do sinal UHF, resultando em um conjunto de resultados empíricos em ambientes urbanos, o qual transformou esses resultados em uma série de tabelas e gráficos de curvas nas bandas de 150 MHz e 1920 MHz. Esses gráficos e tabelas simulam a intensidade do sinal recebido variando conforme a distância, como pode ser visto nas figuras 11, 12, 13 e 14. Os dados encontrados nos gráficos e tabelas do modelo de Okumura são valores medianos da intensidade do campo em dB. A forma que Okumura definiu o método foi na introdução de correções, obtidas graficamente sobre o valor da atenuação do espaço livre. Na expressão matemática em que pode ser expressa, o modelo pode ser visto pela a equação 21.

$$L(dB) = L_{bf} + A(f, d) - G_{area}(f, morf) - G_T(h_{Te}, d) - G_R(h_R, d) \quad (21)$$

Para  $1 \leq d \leq 100$  Km e  $100 < f < 3000$  MHz

Onde:

$L(dB)$  é o valor mediano da perda no caminho de propagação;

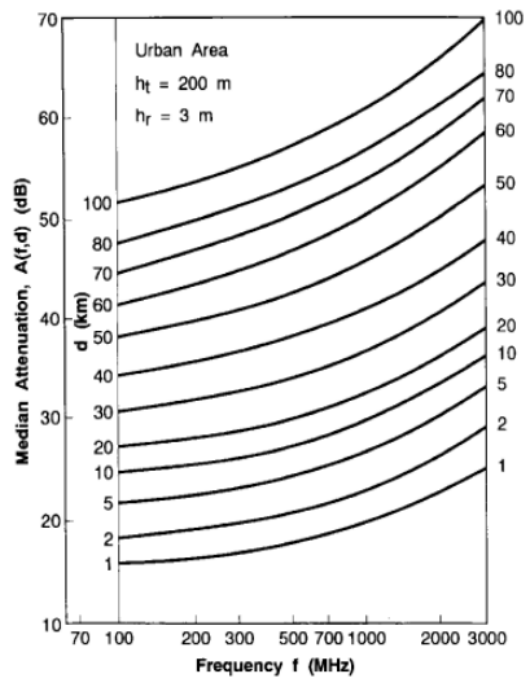
$L_{bf}$  é a perda de propagação no espaço livre;

$A(f, d)$  Atenuação adicional média para áreas urbanas, com alturas efetiva da antena transmissora de 200 m e a receptora de 3m;

$G_{area}(f, morf)$  é uma correção em função da frequência para áreas morfologia sub-urbana;

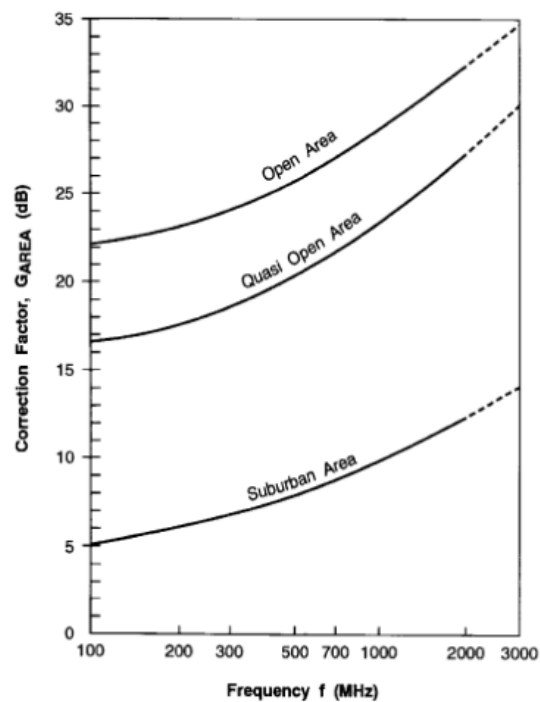
$G_T(h_{Te}, d)$  e  $G_R(h_R, d)$  fatores de correções para antenas de transmissão e recepção com alturas diferentes das de referência do modelo.

Figura 11 – Curvas para atenuação adicional média para áreas urbanas



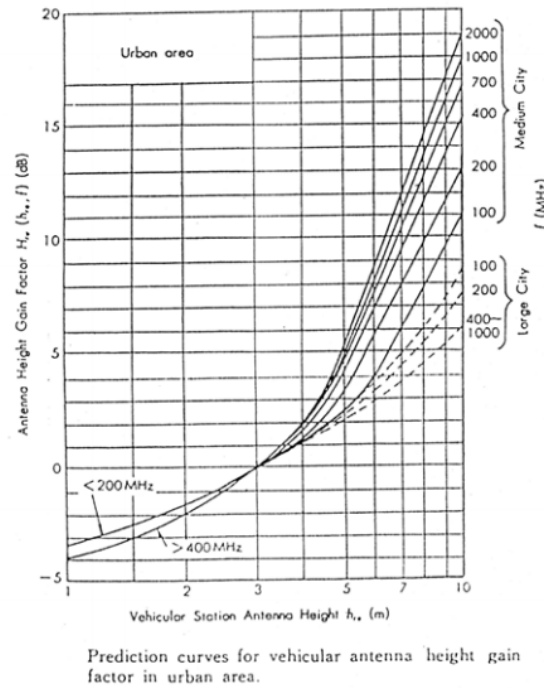
Fonte:(JR; BUCK, 2013)

Figura 12 – Curvas para correção em função da frequência para áreas de morfologia suburbana



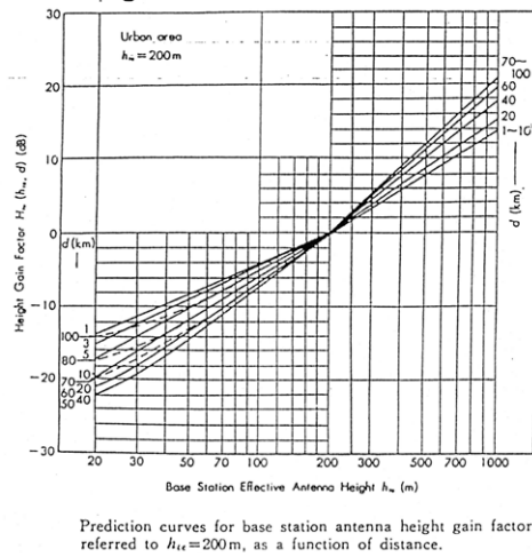
Fonte:(JR; BUCK, 2013)

Figura 13 – Curva para encontrar o fator de ganho da antena



Fonte: (JR; BUCK, 2013)

Figura 14 – Curva para encontrar o fator de ganho de altura



Fonte: (JR; BUCK, 2013)

Segundo (RAPPAPORT, 2009), os desvios padrão comuns entre os valores previsto e medido da perda no caminho estão em torno de 10 dB a 14 dB. Por ser muito complexo devido aos gráficos e tabelas, o modelo de Okumura não é muito usado no dia a dia (RAPPAPORT, 2009).

Em 1980, Hata aprimorou o modelo de Okumura através de ferramentas computacionais traduzindo os gráficos e tabelas de Okumura em expressões matemáticas. O modelo de Hata, foi criado para áreas urbanas em cidades grandes, pequenas e médias, como também para áreas suburbanas (RAPPAPORT, 2009).

A forma estabelecida que Hata encontrou para apresentar a perda de propagação em área urbana foi definida pela equação 22. Como o modelo de Hata pode ser utilizado para outras áreas, definiu-se equações de correção para áreas suburbanas e rurais (RAPPAPORT, 2009).

$$L(dB) = A + B \log(d) \quad (22)$$

$$A = 69,55 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_b) - a(h_M) \quad (23)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \log(h_b) \quad (24)$$

$$a(h_M) = [1,1 \log(f) - 0,7] h_M - [1,56 \log(f) - 0,8] \quad (25)$$

Onde:

$f$  é a frequência em MHz;

$h_b$  altura da antena transmissora;

$h_M$  altura da antena receptora;

$a(h_M)$  representa o fator de correção dos ambientes;

$L$  atenuação em dB;

$f$  frequência em MHz ( $150 \leq f \leq 1500$  MHz);

$d$  distância em km ( $1 \text{ km} \leq d \leq 20 \text{ km}$ );

$ht$  altura do transmissor em metros ( $30 \text{ m} \leq ht \leq 200 \text{ m}$ );

$a(hr)$  fator de correção em dB;

$hr$  altura do receptor em metros ( $1 \text{ m} \leq hr \leq 10 \text{ m}$ ).

O fator de correção para cidades pequenas é dado por:

$$a(h_r) = (1,1 \log f - 0,7) h_r - (1,56 \log f - 0,8) \quad (26)$$

O fator de correção para cidades grandes é dado por:

Para  $f \leq 300$  MHz, o fator é dado por:

$$a(h_r) = 8,29(\log(1,54 h_r))^2 - 1,1 \quad (27)$$

Para  $f \geq 300$  MHz o fator é dado por:

$$a(h_r) = 3,2(\log(11,75 h_r))^2 - 4,97 \quad (28)$$

Já para suburbanas e rurais é necessário modificar-se a equação 22 para área urbana para obter a perda de propagação conforme as equações 29 e 30.

$$L_{suburbana} = L_{urbana} - 2[\log \frac{f}{29}]^2 - 5,4 \quad (29)$$

$$L_{rural} = L_{urbana} - 4,78(\log f)^2 + 18,33\log f - 40,94 \quad (30)$$

### 3.3 ITU-R P.1546-5

A recomendação ITU-R P.1546 da União Internacional de Telecomunicações (UTI/ITU) é o modelo de propagação que o ministério da ciência, tecnologia, inovações e comunicações (MCTIC) e a ANATEL utilizam como referência na confecção dos projetos de TV digital.

O método foi muito utilizado na confecção do plano básico de TV digital no Brasil, como o próprio relatório publicado pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD) em 2003.

Esta recomendação é utilizada para predições ponto-área para os serviços terrestres na faixa de 30 MHz a 4000 MHz. A ITU-R P.1546 é usada para circuitos de rádio troposféricos sobre terra, mar ou caminhos mistos de até 1000 km e para alturas de até 3000 m para a antena transmissora.

O método é baseado na interpolação/extrapolação a partir das curvas de intensidade de campo adquiridas empiricamente como funções de distância, altura da antena, frequência e tempo percentual. O procedimento de cálculo também inclui correções para os resultados obtidos a partir dos resultados da interpolação/extrapolação para explicar desobstrução do terreno e obstruções entorno da transmissão e da recepção.

A recomendação é composta por 8 anexos compostos de procedimentos para serem usados para a previsão de ponto-área da intensidade de campo para a transmissão na faixa de frequência de 30 a 3000 MHz e para distâncias de até 1000 km.

Os anexos dessa recomendação estão divididos da seguinte maneira:

Anexo 1 - Introdução

Anexo 2 - Faixa de frequência de 30 MHz a 300 MHz

Anexo 3 - Faixa de frequência de 300 MHz a 1000 MHz

Anexo 4 - Faixa de frequência de 1000 MHz a 4000 MHz

Anexo 5 - Informações e métodos adicionais para a implementação do método de previsão

Anexo 6 - Procedimento para a aplicação da recomendação ITU-R P.1546-6

Anexo 7 - Ajuste para diferentes regiões climáticas

Anexo 8 - Comparação com o método Okumura-Hata

Na sequência serão apresentados os anexos da recomendação ITU-R P.1546.



### 3.3.1 Anexo 1 - Introdução

O anexo 1 apresenta uma explicação dos principais termos técnicos utilizados nos anexos seguintes.

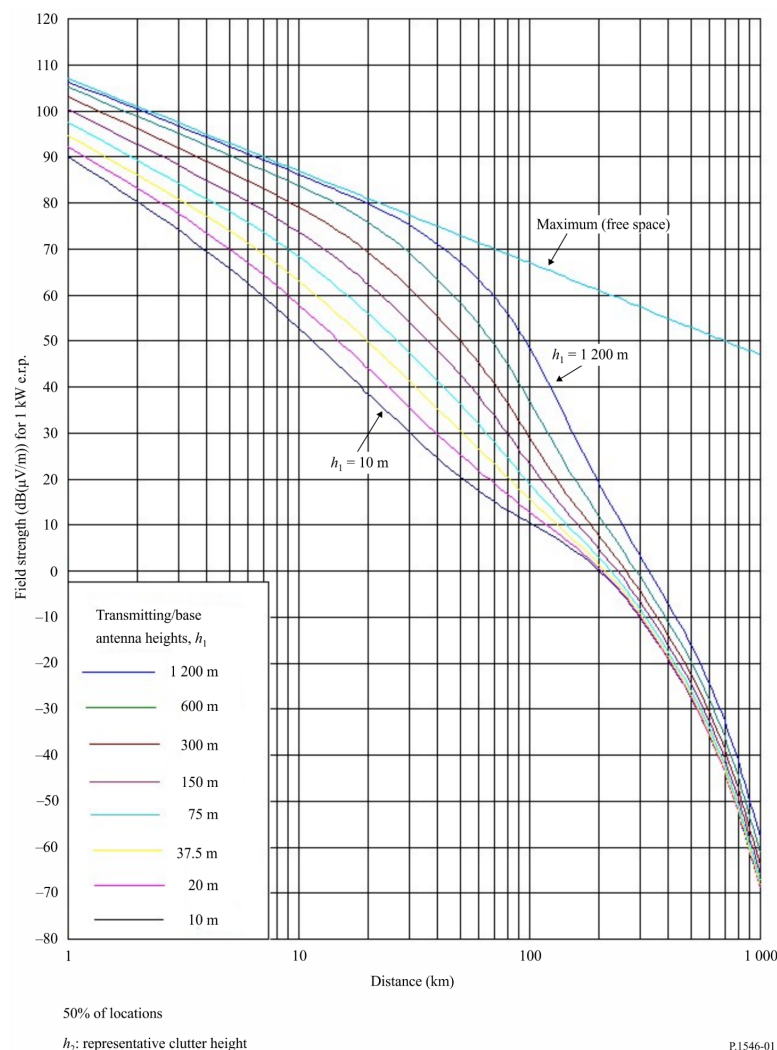
### 3.3.2 Anexo 2 - Faixa de frequência de 30 MHz a 300 MHz

Nesse anexo 2 da recomendação são apresentadas as curvas de intensidade de campo elétrico versus a distância, para uma frequência de 100 MHz.

As curvas apresentadas nesse anexo representam os valores da intensidade de campo excedidos em 50% dos locais em 50%, 10% e 1% do tempo para caminhos terrestres e marítimos.

A figura 15 apresenta uma curva de intensidade de campo elétrico versus distância para uma frequência de 100 MHz para um local terrestre e 50% de tempo.

Figura 15 – Curva de intensidade de campo elétrico 100 MHz, caminho terrestre, 50 % de tempo



Fonte: (ITU-R, 2009)

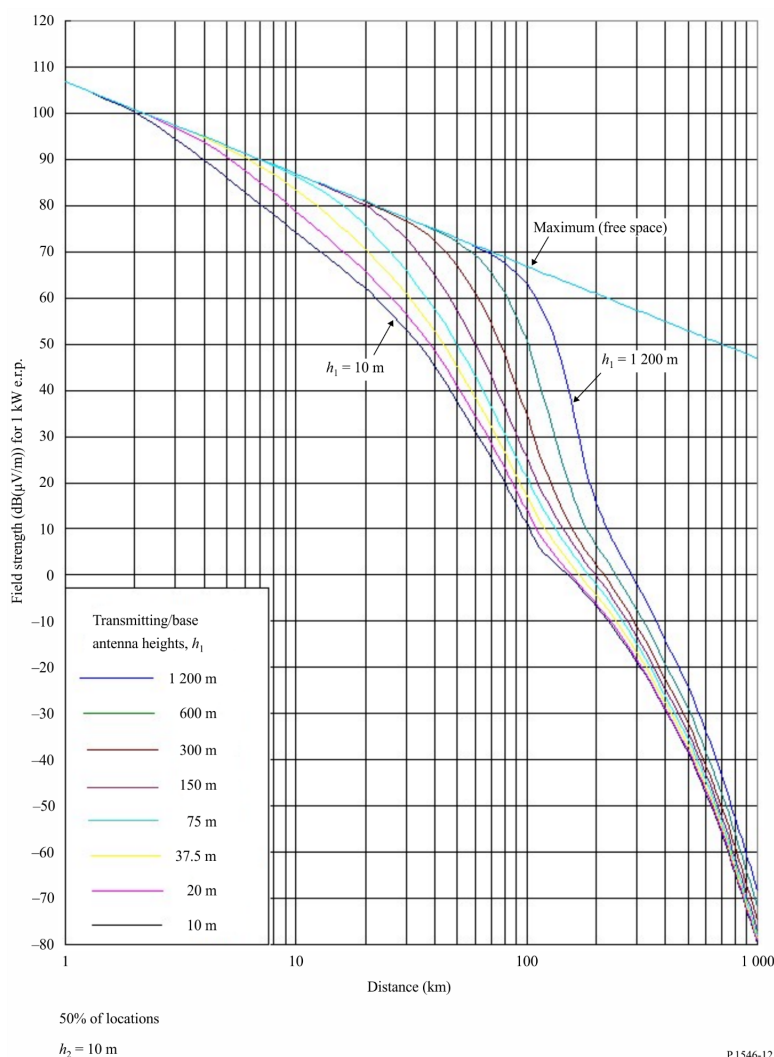
### 3.3.3 Anexo 3 - Faixa de frequência de 300 MHz a 1 000 MHz

O anexo 3 da recomendação apresenta as curvas de intensidade de campo versus a distância para uma frequência de 600 MHz.

As curvas mostradas nesse anexo representam os valores de intensidade de campo excedidos em 50% dos locais durante 50%, 10% e 1% do tempo para caminhos terrestres e marítimos.

A figura 16 representa uma curva de intensidade de campo elétrico versus distância para uma frequência de 600 MHz para um caminho marítimo e 50% de tempo.

Figura 16 – Curva de intensidade de campo elétrico 600 MHz, caminho marítimo, 50% de tempo



Fonte: (ITU-R, 2009)

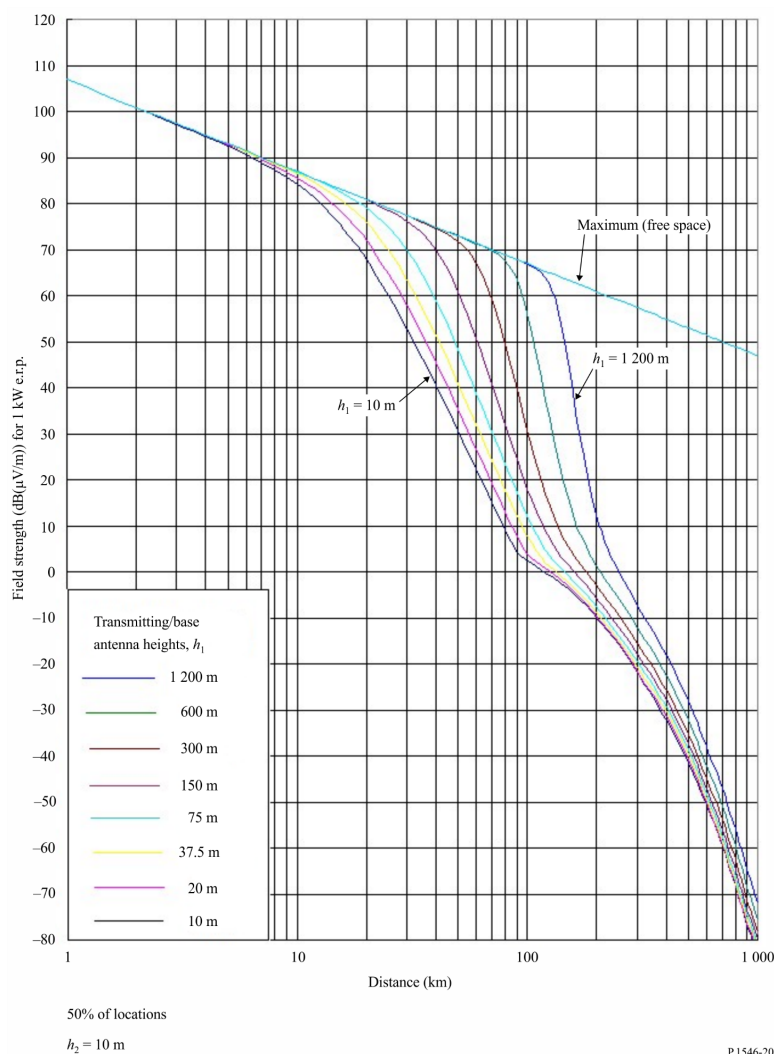
### 3.3.4 Anexo 4 - Faixa de frequência de 1 000 MHz a 4 000 MHz

As curvas de intensidade de campo versus distância mostradas no anexo 4 são para uma frequência de 2 000 MHz.

Os gráficos das curvas desse anexo representam os valores de intensidade de campo elétrico excedidos em 50% dos locais durante 50%, 10% e 1% do tempo para caminhos terrestres e marítimos.

A figura 17 apresenta uma curva de intensidade de campo elétrico versus distância para uma frequência de 2000 MHz para um caminho marítimo e 50% de tempo.

Figura 17 – Curva de intensidade de campo elétrico 2 000 MHz, caminho marítimo, 50% de tempo



Fonte: (ITU-R, 2009)

### 3.3.5 Anexo 5 - Informações e métodos adicionais para implantar o método de previsão

O anexo 5 da ITU-R P.1546-6, apresenta as informações e os métodos distintos para os cálculos, embora não necessariamente na ordem de cálculo. O passo a passo do método geral é apresentado no Anexo 6 da recomendação.

As seções 2 a 7 do presente anexo descrevem como as intensidades de campo são extraídas das curvas com interpolação para a distância,  $h_1$ , frequência e porcentagem de tempo.

Na seção 8 descreve como as intensidade de campo são combinadas para um caminho misto de terra-mar.

As seções 9 a 14 descrevem as correções a serem adicionadas às previsões de intensidade de campo para uma melhor precisão.

A seção 15 descreve o método para percursos menores que 1 Km.

E nas seções 16 a 18 fornecem informações auxiliares.

### 3.3.5.1 Valor máximo de intensidade de campo

A intensidade do campo não deve exceder um valor máximo,  $E_{max}$  dado por:

Para percursos terrestre:

$$E_{max} = E_{fs} \quad (31)$$

Para percursos marinhos:

$$E_{max} = E_{fs} + E_{se} \quad (32)$$

Em que  $E_{fs}$  é a intensidade de campo de espaço livre para 1 kW e.r.p. dado pela a equação 33.

$$E_{fs} = 106.9 - 20\log(d) \quad (33)$$

E  $E_{se}$  é uma melhoria para as curvas de mar, dado pela a equação 34:

$$E_{se} = 2.38 \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-d}{8.94}\right) \right\} \frac{50}{t} \quad (34)$$

Em que:

$d$ : distância (km);

$t$ : tempo percentual.

### 3.3.5.2 Aplicação da altura da antena de transmissão, $h_1$

O valor de  $h_1$  controla qual curva ou curvas serão selecionadas para obter os valores de intensidade de campo, e a interpolação ou extrapolação que pode ser necessária.

### 3.3.5.3 Aplicação da altura da antena transmissora ( $h_1$ ) no intervalo de 10 m a 3000 m

Se o valor de  $h_1$  coincidir com uma das oito alturas para as quais as curvas são fornecidas, 10, 20, 37,5, 75, 150, 300, 600 ou 1 200 m, a intensidade de campo desejada

pode ser obtida diretamente das curvas traçadas ou das tabelas correspondentes. Caso contrário, a intensidade de campo desejada deve ser interpolada ou extrapolada a partir das intensidades de campo obtidas a partir de duas curvas utilizando a equação 35.

$$E = E_{inf} + \frac{(E_{sup} - E_{inf}) \log \frac{h_1}{h_{inf}}}{\log \frac{h_{sup}}{h_{inf}}} \quad (35)$$

Em que:

$h_{inf}$ : 600 m se  $h_1 > 1200$  m, caso contrário, a altura nominal efetiva mais próxima abaixo de  $h_1$ ;

$h_{sup}$ : 1200 m se  $h_1 > 1200$  m, caso contrário, a altura nominal efetiva mais próxima acima de  $h_1$ ;

$E_{inf}$ : valor de intensidade de campo para  $h_{inf}$ , na distância desejada;

$E_{sup}$ : valor de intensidade de campo para  $h_{sup}$ , na distância desejada.

A intensidade de campo resultante da extrapolação para  $h_1 > 1\,200$  m deve ser limitada, se necessário, de modo que não exceda o máximo definido no 3.3.5.1.

#### 3.3.5.4 Altura da antena de transmissão ( $h_1$ ) na faixa de 0 a 10 m

O método quando  $h_1$  é inferior a 10 m depende se o percurso é sobre a terra ou sobre o mar.

Para um percurso terrestre, a intensidade do campo na distância requerida  $d$  km para  $0 \leq h_1 < 10$  m é calculada utilizando a equação 36.

$$E = E_{zero} + 0.1h_1(E_{10} - E_{zero}) \quad (36)$$

Em que:

$$E_{zero} = E_{10} + 0.5(C_{1020} + C_{h1neg10}) \quad (37)$$

$$C_{1020} = E_{10} - E_{20} \quad (38)$$

$C_{h1neg10}$ : a correção  $C_{h1}$  em dB é calculada usando a equação 39, para distância desejada inferior a  $h_1 = -10$  m.

$E_{10}$  e  $E_{20}$ : as intensidades de campo em dB ( $\mu$  V / m) calculadas de acordo com o 3.3.5.3 para distância desejada superior a  $h_1 = 10$  m e  $h_1 = 20$  m, respectivamente.

Observe que as correções  $C_{1020}$  e  $C_{h1neg10}$  devem ambas ser avaliadas para valores negativos.

#### 3.3.5.5 Valores negativos de altura da antena transmissora, $h_1$

Para os percursos terrestres, é possível que a altura efetiva da antena transmissora tenha um valor negativo, já que se baseia na altura média do terreno a distâncias de 3 a

15 km. Portanto,  $h_1$  pode ser negativo. Neste caso, o efeito da difração por obstáculos próximos do terreno deve ser levado em consideração.

O procedimento para valores negativos de  $h_1$  é obter a intensidade de campo para  $h_1 = 0$ , conforme descrito em 3.3.5.4, e adicionar uma correção  $Ch_1$  calculada da seguinte forma.

O efeito da perda por difração é levado em conta por uma correção,  $Ch_1$ , dada pelos casos a) ou b) como se segue:

a) No caso de um banco de dados do terreno estar disponível e o risco de descontinuidades na transição em torno de  $h_1 = 0$  não for preocupante na aplicação desta recomendação, o ângulo de afastamento do terreno,  $\theta_{ffe1}$ , da antenna transmissora deve ser calculado como o ângulo de elevação de uma linha livre de todas as obstruções do terreno em até 15 km da antenna transmissora na direção (mas não indo além) da antenna receptora. Este ângulo livre, que terá um valor positivo, deve ser usado em vez de  $\theta_{tca}$  na equação 66 no método de correção do ângulo livre do terreno indicado no 3.3.5.12 para obter  $Ch_1$ . Observe que o uso desse método pode resultar em uma descontinuidade na intensidade do campo na transição em torno de  $h_1 = 0$ .

b) No caso em que um banco de dados do terreno não estiver disponível ou onde um banco de dados do terreno estiver disponível, mas o método nunca deve produzir uma descontinuidade na intensidade do campo na transição em torno de  $h_1 = 0$ , o ângulo (positivo) efetivo do terreno,  $\theta_{eff2}$ , pode ser estimado assumindo uma obstrução da altura  $h_1$  a uma distância de 9 km da antenna transmissora. Observe que isso é usado para todos os comprimentos de percurso, mesmo quando a distância é inferior a 9 km. Ou seja, o solo é considerado como se aproximando de uma oscilação irregular no intervalo de 3 km a 15 km da antenna transmissora, com seu valor médio ocorrendo a 9 km, como indicado na Figura 25. Esse método leva em conta menos explicitamente as variações do terreno, mas também garante que não há descontinuidade na intensidade do campo na transição em torno de  $h_1 = 0$ . A correção a ser adicionada à intensidade do campo neste caso é calculada utilizando:

$$C_{h1} = 6.03 - J(v) \quad (39)$$

Em que:

Para  $v > -0.7806$ , temos:

$$J(v) = \left[ 6.9 + 20 \log \left( \sqrt{(v - 0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \right] \quad (40)$$

para outros valores:

$$J(v) = 0 \quad (41)$$

$$V = K_v \theta_{eff2} \quad (42)$$

e

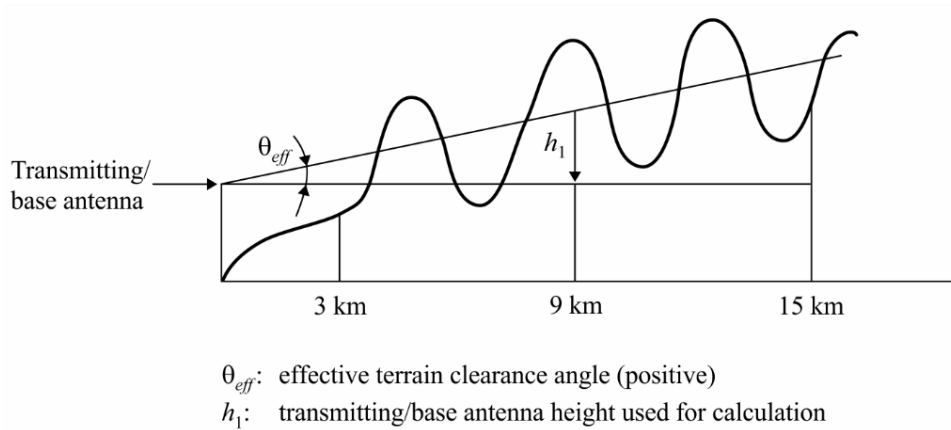
$$\theta_{eff2} = \arctan\left(\frac{-h_1}{9000}\right) \quad (43)$$

$K_v=1.35$  para 100 MHz

$K_v=3.31$  para 600 MHz

$K_v=6.00$  para 2000 MHz

Figura 18 – Ângulo de folga efetivo para  $h_1 < 0$



P.1546-25

Fonte:(JR; BUCK, 2013)

A correção acima, que é sempre menor que zero, é adicionada à intensidade do campo obtida para  $h_1 = 0$ .

### 3.3.5.6 Interpolação de intensidade de campo em função da distância

As figuras 1 a 24 da recomendação, mostram a intensidade do campo plotada em relação à distância,  $d$ , o intervalo de 1 km a 1 000 km. Nenhuma interpolação para a distância é necessária se a força de campo for lida diretamente a partir destes gráficos. Nesse caso, a menos que  $d$  coincida com uma das distâncias fornecidas na Tabela 2, a intensidade do campo  $E$  (dB ( $\mu$  V / m)), deve ser interpolada linearmente para o logaritmo da distância usando a seguinte equação 44.

$$E = E_{inf} + \frac{(E_{sup} - E_{inf}) \log \frac{d}{d_{inf}}}{\log \frac{d_{sup}}{d_{inf}}} \quad (44)$$

Em que:

$d$ : distância para a qual a predição é desejada

$d_{inf}$ : distância na tabela menor ou igual a  $d$

$d_{sup}$ : distância na tabela maior que  $d$

$E_{inf}$ : valor de intensidade de campo para  $d_{inf}$

$E_{sup}$  : valor de intensidade de campo para  $d_{sup}$ .

Esta recomendação não é válida para valores de  $d$  maior que 1000 km.

### 3.3.5.7 Interpolação e extrapolação da intensidade de campo elétrico em função da frequência

Os valores de intensidade de campo para a frequência desejada devem ser obtidos através da interpolação entre os valores para os valores de frequência nominal de 100, 600 e 2 000 MHz. No caso de frequências inferiores a 100 MHz ou superiores a 2 000 MHz, a interpolação deve ser substituída por uma extrapolação a partir dos dois valores de frequência nominais mais próximos. Para a maioria dos percursos pode-se utilizar a interpolação ou extrapolação para log (frequência).

Para percursos terrestres e marítimos onde a frequência desejada é maior que 100 MHz, a intensidade de campo desejada,  $E$ , deve ser calculada utilizando:

$$E = E_{inf} + \frac{(E_{sup} - E_{inf}) \log \frac{f}{f_{inf}}}{\log \frac{f_{sup}}{f_{inf}}} \quad (45)$$

Onde:

$f$ : frequência para a qual a predição é desejada (MHz)

$f_{inf}$  : frequência nominal inferior (100 MHz se  $f < 600$  MHz, 600 MHz caso contrário)

$f_{sup}$  : frequência nominal superior (600 MHz se  $f < 600$  MHz, 2 000 MHz caso contrário)

$E_{inf}$  : valor de intensidade de campo para  $f_{inf}$

$E_{sup}$  : valor de intensidade de campo para  $f_{sup}$

A intensidade de campo resultante da extrapolação para frequência acima de 2 000 MHz deve ser limitada, se necessário, de modo que não exceda o valor máximo dado no 3.3.5.1.

### 3.3.5.8 Interpolação da intensidade do campo em função da porcentagem de tempo

Os valores de intensidade de campo para uma determinada porcentagem de tempo entre 1% e 50% do tempo devem ser calculados por interpolação entre os valores nominais de 1% e 10% ou entre os valores nominais de 10% a 50% do tempo utilizando a equação 46.

$$E = E_{sup} \frac{(Q_{inf} - Q_t)}{(Q_{inf} - Q_{sup})} + E_{inf} \frac{(Q_t - Q_{sup})}{(Q_t - Q_{sup})} \quad (46)$$

Em que:

$t$ : tempo percentual para a qual a predição é desejada

$t_{inf}$ : porcentagem inferior nominal de tempo



$t_{sup}$ : porcentagem superior nominal de tempo

$$Q_t = Q_i \frac{t}{100}$$

$$Q_{inf} = Q_i \frac{t_{inf}}{100}$$

$$Q_{sup} = Q_i \frac{t_{sup}}{100}$$

$E_{inf}$  : valor de intensidade de campo para porcentagem de tempo  $t_{inf}$

$E_{sup}$  : valor de intensidade de campo para porcentagem de tempo  $t_{sup}$

em que  $Q_i(x)$  é a função de distribuição normal cumulativa inversa e complementar.

Esta recomendação é válida para as forças de campo excedidas por vezes percentuais na faixa de 1% a 50% apenas. Extrapolação fora da faixa de 1% a 50% de tempo não é válida.

Uma aproximação à função  $Q_i(x)$  é dada em 3.3.5.17. abaixo.

Tabela 2 – Valores da distância usada nas tabelas de intensidades de campo (km)

1	14	55	140	375	700
2	15	60	150	400	725
3	16	65	160	425	750
4	17	70	170	450	775
5	18	75	180	475	800
6	19	80	190	500	825
7	20	85	200	525	850
8	25	90	225	550	875
9	30	95	250	575	900
10	35	100	275	600	925
11	40	110	300	625	950
12	45	120	325	650	975
13	50	130	350	675	1000

### 3.3.5.9 Percursos mistos

A seguinte descrição do método de percurso misto usa  $E_{land}(d)$  e  $E_{sea}(d)$  para representar a intensidade de campo

### 3.3.5.10 Correção para altura da antena receptora

Os valores de intensidade de campo fornecidos pelas curvas terrestres e tabelas correspondentes nesta recomendação são para uma antena receptora móvel de referência a uma altura igual à maior do representante da altura da cobertura do solo ao redor da antena receptora,  $R_2$ , e 10 m.

Em que a antena receptora está em terra, deve-se primeiro levar em consideração o ângulo de elevação do raio de chegada, calculando uma altura representativa de aglomeração modificada  $R'_2$ , dada por:

$$R'_2 = \left( \frac{1000dR_2 - 15h_1}{1000d - 15} \right) \quad (47)$$

Em que  $h_1$  e  $R_2$  estão em unidades de metros e distância horizontal  $d$  em km.

A altura representativa  $R'_2$  representa uma altura de referência na qual um receptor encontraria um incidente rasante ( $v = 0$ ).

Observe que para  $h_1 < 6.5d + R_2, R'_2 \approx R_2$ .

O valor de  $R'_2$  deve ser limitado, se necessário, de modo que não seja inferior a 1 m.

Quando a antena receptora/móvel está em um ambiente urbano, a correção é então dada por:

para  $h_2 < R'_2$

$$correcao = 6.03 - J(v) \quad (48)$$

para  $h_2 \geq R'_2$

$$correcao = K_{h2} \log \left( \frac{h_2}{R'_2} \right) \quad (49)$$

Em que  $J(v)$  é dado pela equação 40, e:

$$v = K_{nu} \sqrt{h_{dif2} \theta_{clut2}} \quad (50)$$

$$h_{dif2} = R'_2 - h_2 \quad (51)$$

$$\theta_{clut2} = \arctan \left( \frac{h_{dif2}}{27} \right) \quad (52)$$

$$K_{h2} = 3.2 + 6.2 \log(f) \quad (53)$$

$$K_{nu} = 0.0108 \sqrt{f} \quad (54)$$

$f$ : frequência (MHz).

Nos casos em um ambiente urbano em que  $R'_2$  seja inferior a 10 m, a correção dada pela equação 48 ou 49 deve ser reduzida por  $K_{h2} \log(10 / R'_2)$ .

Nos casos em que a antena receptora está em terra em ambiente rural ou aberto, a correção é dada pela equação 49 para todos os valores de  $h_2$  com  $R'_2$  ajustado para 10 m.

Quando a antena receptora estiver adjacente ao mar por  $h_2 \geq 10$  m, a correção deve ser calculada usando a equação 49 com  $R'_2$  ajustada para 10 m.

Quando a antena receptora/móvel estiver adjacente ao mar para  $h_2 < 10$  m, deve ser usado um método alternativo, com base nos comprimentos do caminho em que 0,6 da primeira zona de Fresnel está livre de obstruções pela superfície do mar. Um método aproximado para calcular esta distância é dado em 3.3.5.19.

A distância na qual o caminho teria apenas 0,6 de Fresnel para o valor desejado de  $h_1$  e para  $h_2 = 10$  m,  $d_{10}$ , deve ser calculada como  $D_{06}(f, h_1, 10)$  em 3.3.5.19.

Se a distância desejada for igual ou maior que  $d_{10}$ , então a correção a ser adicionada à intensidade de campo E deve ser calculada utilizando:

para  $d \leq d_{h2}$

$$Correcao = 0.0dB \quad (55)$$

para  $d_{h2} < d < d_{10}$

$$Correcao = C_{10} \frac{\log(\frac{d}{d_{h2}})}{\log(\frac{d_{10}}{d_{h2}})} \quad (56)$$

Em que:

$C_{10}$ : correção para o valor desejado de  $h_2$  na distância  $d_{10}$  usando a equação 49 com  $R_2'$  ajustada para 10 m

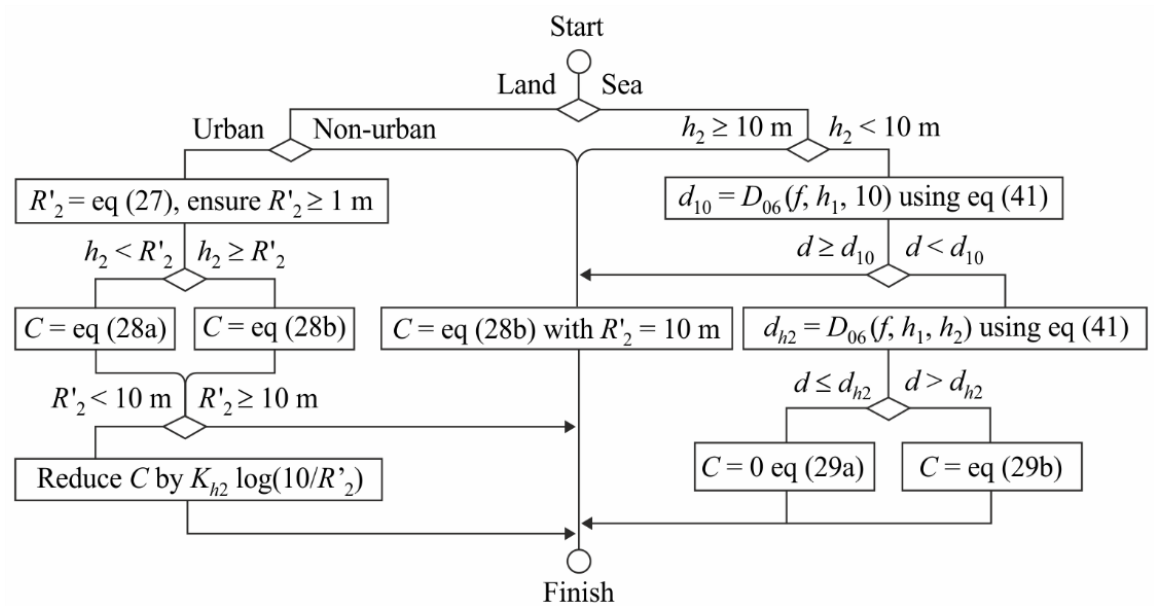
$d_{10}$ : distância em que o caminho possui apenas 0,6 de Fresnel para distância  $h_2 = 10$  m calculado como  $D_{06}(f, h_1, 10)$ , conforme indicado no 3.3.5.19.

$d_{h2}$ : distância na qual o caminho possui apenas 0,6 de Fresnel para o valor desejado de  $h_2$  calculado como  $D_{06}(f, h_1, h_2)$ , conforme indicado no 3.3.5.19.

Esta recomendação não é válida para alturas de antena receptora,  $h_2$ , menor que 1 m quando adjacente à terra ou menor que 3 m quando adjacente ao mar.

A correção completa acima para a altura da antena do receptor pode ser resumida no fluxograma fornecido na Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma para correção da altura do receptor/antena móvel



### 3.3.5.11 Correção do transmissor aglomerado

Esta correção não se aplica a um transmissor aberto. A correção deve ser usada em todos os outros casos, inclusive quando a antena estiver acima da altura da aglomeração. A correção é zero quando o terminal é mais alto do que uma altura de liberação dependente da frequência acima da aglomeração.

$$correcao = -J(v) \quad (57)$$

Em que  $J(v)$  é dado pelas equação 40 ou 41, e:

para  $R_1 \geq h_a$

$$v = K_{nu} \sqrt{h_{dif1} \theta_{clut1}} \quad (58)$$

caso contrário

$$v = -K_{nu} \sqrt{h_{dif1} \theta_{clut1}} \quad (59)$$

$$h_{dif1} = h_a - R_1 \quad (60)$$

$$\theta_{clut1} = \arctan\left(\frac{h_{dif1}}{27}\right) \quad (61)$$

$$K_{nu} = 0.0108 \sqrt{f} \quad (62)$$

f: frequência (MHz).

E  $R_1$  é a altura da aglomeração, m acima do nível do solo, nas proximidades do terminal de transmissor/base.

### 3.3.5.12 Correção do ângulo de afastamento do terreno

Para caminhos terrestres, e quando a antena receptora estiver em uma seção terrestre de um caminho misto, se for necessária mais precisão para prever a intensidade do campo para condições de recepção em áreas específicas, por exemplo, em uma pequena área de recepção, uma correção pode ser feita com base no ângulo de afastamento do terreno.

O ângulo de incidência do terreno  $\theta_{tca}$  é dado por:

$$\theta_{tca} = \theta \quad (63)$$

Onde  $\theta_{tca}$  é o ângulo de elevação da linha da antena receptora que apenas elimina todas as obstruções do terreno na direção da antena transmissora em uma distância de até 16 km, mas que não vai além da antena transmissora.

O cálculo de  $\theta$  não deve levar em consideração a curvatura da Terra.  $\theta_{tca}$  deve ser limitado de modo que não seja inferior a  $+0,55^\circ$  ou superior a  $+40,0^\circ$ .

Em que as informações relevantes do ângulo de abertura do terreno estão disponíveis, a correção a ser adicionada à intensidade do campo é calculada usando:

$$Correcao = J(v') - J(v) \quad (64)$$

Em que  $J(v)$  é dado pela equação 40

$$v' = 0.036\sqrt{f} \quad (65)$$

$$v = 0.065\theta_{tca}\sqrt{f} \quad (66)$$

Onde

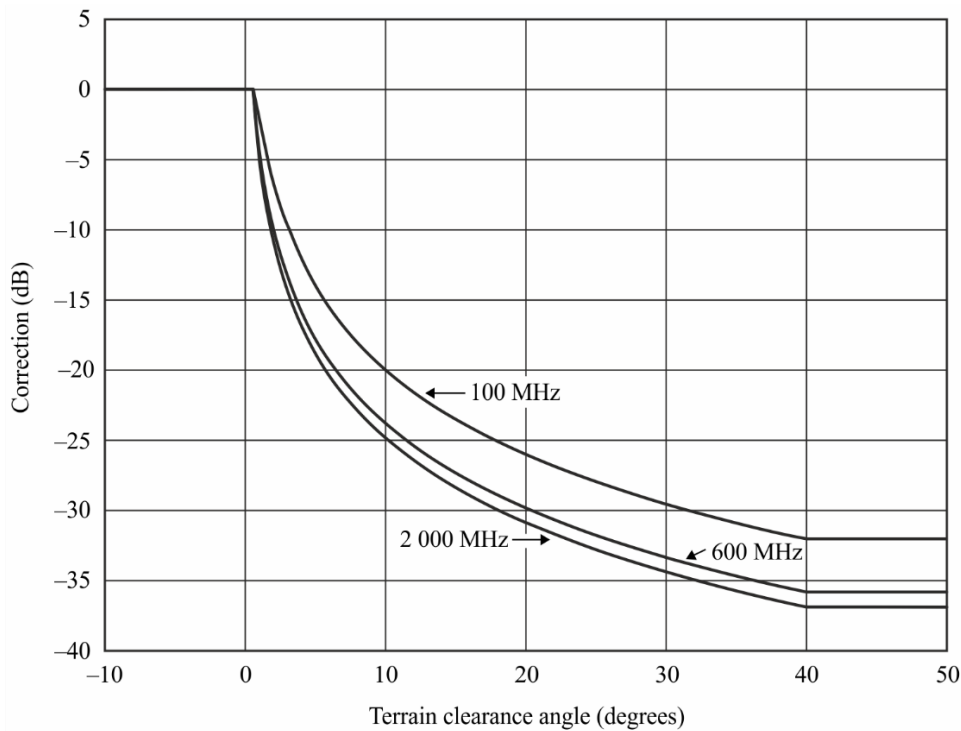
$\theta_{tca}$  é o ângulo de abertura do terreno (graus)

$f$  é a frequência desejada (MHz).

Deve-se notar que as curvas de intensidade do campo terrestre levam em consideração as perdas devido à blindagem típica da antena receptora por terreno ondulado suavemente. Assim, as correções do ângulo de afastamento do terreno são zero em um pequeno ângulo positivo típico de posições de antena receptora.

A Figura 20 ilustra a correção do ângulo de abertura do terreno para as frequências nominais.

Figura 20 – Ângulo de afastamento do terreno (graus)



P.1546-28

Fonte:(JR; BUCK, 2013)

### 3.3.5.13 Variabilidade da localização na previsão de cobertura da área terrestre

Os métodos de previsão de cobertura de área destinam-se a fornecer estatísticas das condições de recepção em uma determinada área, e não em qualquer ponto específico. A interpretação dessas estatísticas dependerá do tamanho da área considerada.

Quando um terminal de um caminho de rádio está parado e o outro terminal é movido, a perda básica de transmissão varia continuamente com o local, de acordo com a totalidade das influências que o afetam. É conveniente classificar essas influências em três categorias principais:

**Variações de multipercurso:** variações de sinal ocorrerão em escalas da ordem de um comprimento de onda devido à adição fasorial de efeitos de multipercurso, por exemplo reflexões do solo, prédios, etc. As estatísticas dessas variações costumam seguir a distribuição de Rayleigh. O impacto desses efeitos irá variar com os sistemas, sendo dependente da largura de banda, modulação e esquema de codificação.

**Variações de percurso:** variações de sinal também ocorrerão devido a alterações na geometria de todo o caminho de propagação, por exemplo a presença de colinas, etc. Para todos, exceto caminhos muito curtos, a escala dessas variações será significativamente maior que a das variações locais da cobertura do solo.

Variações de cobertura do solo local: variações de sinal ocorrerão devido à obstrução da cobertura do solo na vizinhança local, p. edifícios, árvores, etc., sobre escalas da ordem dos tamanhos desses objetos. A escala dessas variações normalmente será significativamente maior que a das variações de caminhos múltiplos.

A variabilidade da localização foi definida de várias maneiras. Alguns textos o definem como relacionado à variação na perda de excesso de caminho em toda a área de serviço de um transmissor, incluindo todos os efeitos do terreno, além de mais sombreamento local. Uma segunda definição refere-se à variabilidade da intensidade do campo em uma pequena área, normalmente representada por um quadrado com um lado de 50 m a 1 km.

Uma análise extensiva dos dados sugere que a distribuição da intensidade média do campo local devido às variações da cobertura do solo é aproximadamente lognormal.

Assim, para uma localização de antena móvel/receptora de terrestre, a intensidade do campo,  $E$ , que será excedida para  $q\%$  das localizações, é dada por:

$$E(q) = E(media) + Q_i\left(\frac{q}{100}\right)\sigma_L(f) \quad (67)$$

Em que:

$Q_i(x)$ : distribuição normal cumulativa complementar inversa em função da probabilidade

$\sigma_L$ : desvio padrão da distribuição gaussiana das médias locais na área de estudo.

Uma aproximação à função  $Q_i(x)$  é dada no 3.3.5.17.

Os valores do desvio padrão dependem da resolução e frequência da previsão, e estudos empíricos mostraram uma dispersão. No caso em que os dados do terreno estão sendo utilizados e a variação em uma pequena área é necessária, valores representativos de  $\sigma_L$  são dados pela equação 68. Os valores representativos referem-se ao percentil 50 das distribuições cumulativas do desvio padrão medido da variabilidade da localização.

$$\sigma_L = \left(\frac{0.0024f}{1000} + 0.52\right)w_a^{0.28} \quad (68)$$

Em que:

$f$ : frequência requerida (MHz)

$w_a$ : resolução de predição (m).

A resolução da predição é a largura da área quadrada sobre a qual a variabilidade se aplica.

Ao usar esta recomendação sem informações do terreno, a variação ao longo da área de serviço pode ser uma medida mais apropriada de  $\sigma_L$ . Neste caso, nenhuma dependência na frequência é encontrada, no entanto, o tipo de ambiente terá impacto no desvio padrão dos valores de variabilidade da localização. Os valores representativos de  $\sigma_L$  são 8, 10 e 12 dB para áreas urbanas, suburbanas e abertas, respectivamente.

### 3.3.5.14 Limitação do Campo devido ao espalhamento troposférico

Se a informação do terreno estiver disponível, uma estimativa do campo devido ao espalhamento troposférico deve ser calculada usando o seguinte procedimento. Esta estimativa pode então ser usada como um 'pisso' para a previsão geral da intensidade do campo (consulte a Etapa 13 em 3.4).

Calcule o ângulo de espalhamento do caminho em graus,  $\theta_s$ , usando:

$$\theta_s = \frac{180d}{\pi ka} + \theta_{eff} + \theta \quad (69)$$

Em que:

$\theta_{eff}$ : o ângulo de afastamento do terreno do terminal em graus calculado usando o método no 3.3.5.5 caso a), sendo  $h_1$  ou não negativo (graus)

$\theta$ : o ângulo de abertura do terminal  $h_2$  em graus, conforme calculado no 3.3.5.12, observando que este é o ângulo de elevação em relação à horizontal local (graus)

$d$ : comprimento do caminho (km)

$a$ : 6 370 km, raio da Terra

$k$ : 4/3, fator de raio da Terra efetivo para condições de refratividade medianas.

Se  $\theta_s$  for menor que zero, defina  $\theta_s$  igual a zero.

Calcule a intensidade do campo prevista para o espalhamento troposférico,  $E_{ts}$ , utilizando:

$$E_{ts} = 24.4 - 20\log(d) - 10\theta_s - L_f + 0.15N_0 + G_t \quad (70)$$

Em que:

$L_f$ : perda dependente da frequência

$$L_f = 5\log(f) - 2.5(\log(f) - 3.3)^2 \quad (71)$$

$N_0$ : 325, refratividade da superfície média, N-unidades, típica de climas temperados

$G_t$ : aprimoramento dependente do tempo

$$G_t = 10.1(-\log(0.02t))^{0.7} \quad (72)$$

$d$ : comprimento do percurso ou distância desejada (km)

$f$ : frequência desejada (MHz)

$t$ : porcentagem de tempo desejada.

### 3.3.5.15 Diferença de altura da antena

É necessária uma correção para levar em conta a diferença de altura entre as duas antenas.

Esta correção é calculada da seguinte maneira.



$$Correcao = 20 \log\left(\frac{d}{d_{slope}}\right) \quad (73)$$

Em que  $d$  é a distância horizontal e a distância do declive,  $d_{slope}$ , é dada da seguinte maneira.

Onde as informações do terreno estiverem disponíveis, use:

$$d_{slope} = \sqrt{d^2 + 10^{-6} [(h_a + h_{tter}) - (h_2 + h_{rter})]^2} \quad (74)$$

Onde as informações do terreno não estiverem disponíveis, use:

$$d_{slope} = \sqrt{d^2 + 10^{-6} (h_a - h_2)^2} \quad (75)$$

e  $h_{tter}$  e  $h_{rter}$  são as alturas do terreno em metros acima do nível do mar nos terminais transmissor e receptor, respectivamente.

### 3.3.5.16 Distâncias inferiores a 1 km

Os parágrafos 1 ao 14 anteriores da recomendação ITU-R P.1546, descrevem o método para obter a intensidade de campo das famílias de curvas para distâncias horizontais de 1 km a 1 000 km. Este processo inclui interpolação ou extrapolação e várias correções. Se a distância horizontal desejada for 1 km ou mais, nenhum cálculo adicional é necessário.

Para percursos com menos de 1 km, o modelo é estendido para distâncias horizontais arbitrariamente curtas da seguinte forma:

Se a distância horizontal for menor ou igual a 0,04 km, a intensidade do campo,  $E$ , é dada por:

$$E = 106.9 - 20 \log(d_{slope}) \quad (76)$$

Caso contrário:

$$E = E_{inf} + (E_{sup} - E_{inf}) \frac{\log\left(\frac{d_{slope}}{d_{inf}}\right)}{\log\left(\frac{d_{sup}}{d_{inf}}\right)} \quad (77)$$

Em que:

$d_{slope}$ : distância da inclinação dada pelas equações 74 ou 75 para a distância horizontal requerida  $d$

$d_{inf}$ : distância da inclinação dada pela equação 74 ou 75 para  $d = 0,04$  km

$d_{sup}$ : distância da inclinação dada pela equação 74 ou 75 para  $d = 1$  km

$E_{inf}$ : 106,9 - 20 log ( $d_{inf}$ )

$E_{sup}$ : intensidade de campo dada pelos 3.3.5.1 a 3.3.5.15 para  $d = 1$  km.

### 3.3.5.17 Uma aproximação da função de distribuição normal cumulativa complementar inversa

A seguinte aproximação para a função de distribuição normal cumulativa complementar inversa,  $Q_i(x)$ , é válida para  $0,01 \leq x \leq 0,99$ :

se  $x \leq 0,5$

$$Q_i(x) = T(x) - \xi(x) \quad (78)$$

se  $x > 0,5$

$$Q_i(x) = -\{T(1-x) - \xi(1-x)\} \quad (79)$$

Em que:

$$T(x) = \sqrt{[-2\ln(x)]} \quad (80)$$

$$\xi = \frac{[(C_2T(x) + C_1)T(x)] + C_0}{[(D_3T(x) + D_2)T(x) + D_1]T(x) + 1} \quad (81)$$

$$C_0 = 2.515517$$

$$C_1 = 0,802853$$

$$C_2 = 0,010328$$

$$D_1 = 1.432788$$

$$D_2 = 0,189269$$

$$D_3 = 0,001308$$

### 3.3.5.18 Perda básica de transmissão equivalente

Quando necessário, a perda básica de transmissão equivalente a uma determinada intensidade de campo é dada por:

$$L_b = 139.3 - E + 20\log(f) \quad (82)$$

Em que:

$L_b$ : perda básica de transmissão (dB)

$E$ : intensidade de campo (dB  $\mu$  V / m) para 1 kW e.r.p.

$f$ : frequência (MHz).

### 3.3.5.19 Uma aproximação do comprimento do percurso zona livre Fresnel de 0,6

O comprimento do percurso que atinge apenas 0,6 da primeira zona de Fresnel sobre uma Terra curva e lisa, para uma dada frequência e alturas de antena  $h_1$  e  $h_2$ , é dado aproximadamente por:

$$D_{06} = \frac{D_f D_h}{D_f + D_h} \quad (83)$$

Em que:

$D_f$ : termo dependente da frequência

$$D_f = 0.0000389 f h_1 h_2 \quad (84)$$

$D_h$ : termo assintótico definido pelas distâncias do horizonte

$$D_h = 4.1(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (85)$$

$f$ : frequência (MHz)

$h_1, h_2$ : alturas da antena acima da Terra (m).

Nas equações acima, o valor de  $h_1$  deve ser limitado, se necessário, de forma que não seja menor que zero. Além disso, os valores resultantes de  $D_{06}$  devem ser limitados, se necessário, de forma que não seja inferior a 0,001 km.

### 3.4 Anexo 6 - Procedimentos para a aplicação da ITU-R P.1546

O anexo 6 descreve passo a passo a implementação de uma maneira geral o método de previsão.

O procedimento passo-a-passo que será apresentado a seguir destina-se a encontrar os valores da intensidade de campo ou das tabelas de distância disponível no ITU. A Tabela 3 contém uma lista de parâmetros de entrada mínima e seus limites.

Tabela 3 – Listas de parâmetros de entrada e seus limites

Parâmetro	Unidades	Definição	Limites
$f$	MHz	Frequência de operação	30 - 3000 MHz
$d$	Km	Comprimento do percurso horizontal	< 1000 km
$p$	%	Porcentagem de tempo	1 - 50%
$h_1$	M	Altura da antena transmissora / base.	Até 3000 m
$h_a$	M	Altura da antena transmissora acima do solo.	> 1 m
$h_b$	M	Altura da antena do transmissor sobre o nível	médio do terreno medido entre 0,2d e d.
$h_2$	M	Altura da antena receptora	
$R_1$	M	Altura da urbanização em torno do transmissor	
$R_2$	M	Altura da urbanização em torno do receptor	
$\theta_{tca}$	Graus	Ângulo de obstrução do terreno	
$\theta_{eff}$ $\theta_{eff1}$ $\theta_{eff2}$	Graus	Ângulos de obstrução do terreno	efetivos do transmissor / base

Se a distância horizontal exigida for menor ou igual a 0,04 km, inicie no passo 17. Se a distância horizontal exigida for maior do que 0,04 km e menor que 1 km, os passos 1 ao 16 devem ser seguidas com  $d$  valendo 1 km, e os restantes passos devem ser seguidos com  $d$  valendo a distância horizontal requerida inicialmente. Caso contrário, todos os passos devem ser seguidos com  $d$  valendo a distância requerida.

**Passo 1:** Determinar o tipo do percurso de propagação como: terra, mar frio ou mar quente. Se o percurso for misto, na ocasião, determinar dois tipos de caminho que serão considerados como primeiro e segundo tipos de propagação. Se o percurso pode ser representado por um único tipo, então, este é considerado como o primeiro tipo de propagação e o método para percursos mistos no Passo 11 não será necessário.

**Passo 2:** Para uma dada porcentagem de tempo (entre 1% a 50%) determinar duas porcentagens nominais de tempo da seguinte maneira:

$1 < p < 10$ , as porcentagens de tempo nominais mais baixas e mais altas são 1 e 10, respectivamente;

$10 < p < 50$ , as porcentagens de tempo nominais inferior e superior são 10 e 50, respectivamente;

Se a porcentagem de tempo exigida for igual a 1%, 10% ou 50%, este valor deve ser considerado como a porcentagem nominal inferior do processo e interpolação do Passo 10 não será necessário.

**Passo 3:** Para qualquer frequência desejada (na faixa de 30 a 3000 MHz), determinar duas frequências nominais como se segue:

Onde a frequência desejada  $< 600$  MHz, as frequências nominais inferiores e superiores são 100 e 600 MHz, respectivamente;

Onde a frequência desejada  $> 600$  MHz, as frequências nominais inferiores e superiores são 600 e 2000 MHz, respectivamente.

Se a frequência desejada for igual a 100, 600 ou 2000 MHz, este valor deve ser considerado como a frequência nominal inferior e o processo de interpolação/extrapolação do Passo 9 não é necessário.

**Passo 4:** Determinar as distâncias nominais inferiores e superiores da tabela 2 mais próxima da distância requerida. Se a distância necessária coincide com um valor na tabela 2, esta deve ser considerada como a distância nominal inferior e o processo de interpolação do Passo 8.1.5 não é necessário.

**Passo 5:** Para o primeiro tipo de propagação siga os passos de 6 a 11.

**Passo 6:** Para a porcentagem de tempo nominal inferior, siga os passos 7 a 10.

**Passo 7:** Para a frequência nominal inferior siga os passos 8 e 9.

**Passo 8:** Obter a intensidade de campo excedidos em 50% das localidades para uma antena receptora/móvel na altura  $R_2$ , acima do solo para a distância requerida e para a altura da antena transmissora/base como segue:

**Passo 8.1:** Para uma altura de antena transmissora/base  $h_1$  igual ou superior a 10 m, siga os passos 8.1.1 até 8.1.6:

**Passo 8.1.1:** Determinar os valores nominais superior e inferior de  $h_1$  utilizando o método apresentado na subseção em 3.3.5.3. Se  $h_1$  coincide com um dos valores nominais de 10, 20, 37.5, 75, 150, 300, 600 ou 1200 m, esse valor deve ser considerado como o valor nominal inferior de  $h_1$  e o processo de interpolação do Passo 8.1.6 não é necessário.

**Passo 8.1.2:** Para o valor nominal inferior de  $h_1$ , siga para os passos 8.1.3 a 8.1.5.

**Passo 8.1.3:** Para o valor nominal inferior da distância siga o passo 8.1.4.

**Passo 8.1.4:** obter a intensidade de campo excedida em 50% das localidades para uma antena móvel de recepção na altura  $R_2$ , para os valores requeridos de distância e altura da antena,  $h_1$ .

**Passo 8.1.5:** Se a distância requerida não coincide com a distância nominal inferior, repita o Passo 8.1.4 para a distância nominal superior e interpolar as duas intensidades de campo para a distância utilizando o método apresentado em 3.3.5.6

**Passo 8.1.6:** Se a altura da antena transmissora/base,  $h_1$ , não coincide com um dos valores nominais, repita os passos 8.1.3 a 8.1.5 e interpolar/extrapolar para  $h_1$ , utilizando o método da interpolação da intensidade de campo em função da altura da antena transmissora apresentado em 3.3.5.3. Se for necessário limite o resultado ao máximo apresentado em 3.3.5.1.

**Passo 8.2:** Para uma antena transmissora/base de altura  $h_1$  menor ou igual a 10 m, determinar a intensidade de campo usando o método apresentado em 3.3.5.4. Se  $h_1$  é menor que zero, o método apresentado em 3.3.5.5 também deve ser usado.

**Passo 9:** Se a frequência exigida não coincide com a frequência nominal inferior, repita o Passo 8 para a frequência nominal superior e interpolar/extrapolar as duas intensidades de campo, utilizando o método apresentado em 3.3.5.7. Se necessário limitar o resultado à máxima intensidade de campo como apresentado em 3.3.5.1.

**Passo 10:** Se a porcentagem de tempo exigida não coincide com a menor porcentagem de tempo nominal, repita os passos 7 a 9 para a porcentagem de tempo nominal superior e interpolar as duas intensidades de campo, utilizando o método apresentado em 3.3.5.8.

**Passo 11:** Se a predição é para um caminho misto, siga o procedimento passo a passo apresentado em ???. Isso requer o uso dos passos 6 até 10 para caminhos de cada tipo de propagação. Observe que, se diferentes partes do caminho forem classificadas como mar frio e quente, todas as partes do mar devem ser classificadas como mar quente.

**Passo 12:** Se houver informação sobre o ângulo de desobstrução do terreno na antena receptora/móvel adjacente à terra disponível, corrigir a intensidade de campo no receptor usando o método apresentado em 3.3.5.12.

**Passo 13:** Calcule a força de campo estimada devido ao espalhamento troposférico usando o método apresentado em 3.3.5.14, e tomar o valor máximo entre  $E$  e  $E_{ts}$ .

**Passo 14:** Corrija a intensidade de campo no receptor para uma altura da antena receptora/móvel  $h_2$  usando o método apresentado em 3.3.5.10.

**Passo 15:** Se houver urbanização ao redor do terminal transmissor, usar o método apresentado em 3.3.5.11.

**Passo 16:** Aplique a correção de inclinação apresentada em 3.3.5.15.

**Passo 17:** Em 3.3.5.16, apresenta um método para caminhos menores que 1 km.

**Passo 18:** Se for necessária uma intensidade de campo excedida numa porcentagem de localidades diferente de 50%, corrigir a intensidade de campo para a porcentagem de localidades desejada utilizando o método apresentado em 3.3.5.13.

**Passo 19:** Se necessário, limitar a intensidade de campo resultante ao valor máximo apresentado em 3.3.5.1. Se um cálculo caminho misto tem sido feito por um percentual de tempo inferior a 50%, será necessário calcular a intensidade de campo máxima por linear interpolação entre os valores da terra e do mar. Isto é dado pela equação 86 .

$$E_{max} = E_{fs} + \frac{d_s E_{se}}{d_{total}} \quad (86)$$

Onde:

$E_{fs}$ : intensidade de campo no espaço livre dada pela equação 33 em 3.3.5.1

$E_{se}$ : melhoria em pequenas percentagens de tempo para um percurso marinho é dado pela equação 34 em 3.3.5.1

$d_s$ : a distância total do mar (km)

$d_{total}$ : a distância total do percurso (km).

**Passo 20:** Se necessário, converter a intensidade de campo para a perda básica de transmissão equivalente; utilize o método apresentado em 3.3.5.18.

### 3.5 Anexo 7 - Ajuste para diferentes regiões climáticas

As curvas indicadas nos anexos 2, 3 e 4 baseiam-se em medições em climas temperados. As intensidades de campo em regiões do mundo onde o gradiente vertical de refratividade atmosférica é significativamente diferente não serão, em geral, previstas com tanta precisão.

O método a seguir pode ser usado para aplicar as informações de gradiente de refratividade vertical da Recomendação ITU-R P.453 para corrigir as curvas dos anexos 2, 3 e 4 para uso em qualquer lugar do mundo. Os arquivos de dados da Recomendação ITU-R P.453 fornecem gradientes de refratividade em N-unidades/km nos 65 m mais baixos da atmosfera como valores negativos.

Para efeitos deste ajustamento, considera-se que as curvas dos anexos 2, 3 e 4 representam valores de referência do gradiente  $dN_0$  dados por:

Para campos excedidos por 50% do tempo:

$$dN_0 = -43,3 \quad (87)$$

Para campos excedidos por 10% do tempo:

$$dN_0 = -141,9 \quad (88)$$

Para campos excedidos por 1% do tempo:

$$dN_0 = -301,3 \quad (89)$$

Para ajustar uma família de curvas de intensidade de campo para uma região radio-climática diferente do mundo, calcule a diferença no gradiente  $\Delta N$  dado por:

$$\Delta N = dN_0 - dN \quad (90)$$

Onde:

$dN$ : gradiente excedido para a porcentagem de tempo a ser ajustada

$dN_0$ : gradiente de referência para o tempo percentual da curva a ser ajustado, dado pelas equações 88, 89 e 90

Para qualquer distância,  $d$  (km), se  $dN$  for menor que  $-301,3$ , adicione um ajuste à intensidade máxima do campo fornecida por:

$$\delta E_{max} = 0.007(-301.3 - dN) \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-d}{50}\right) \right\} \exp\left(\frac{-d}{6000}\right) \quad (91)$$

Observe que nenhuma alteração é feita nas forças máximas do campo se  $dN$  for maior ou igual a  $-301,3$ .

Calcule o fator de escala  $K$  para  $\Delta N > 0$ , dado por:

$$K = 14.94 - 6.693 * 10^{-6}(1494 - \Delta N)^2 \quad (92)$$

E para  $\Delta N \geq 0$ :

$$K = 0.08\Delta N \quad (93)$$

Para que a curva mais baixa da família seja ajustada, ou seja, para  $h_1 = 10$  m, adicione um ajuste,  $\delta E_1$ , dado por:

$$\delta E_1 = k \left\{ 1 - \exp \frac{-d}{50} \right\} \exp \left( \frac{-d}{6000} \right) \quad (94)$$

Se necessário, o valor de  $\delta E_1$  deve ser limitado da seguinte forma:

$\delta E_1$  deve ser limitado para que a intensidade do campo ajustada não exceda a intensidade do campo máxima ajustada.

Se  $\Delta N$  for maior que zero,  $\delta E_1$  deve ser limitado, de modo que a diferença entre a intensidade de campo máxima ajustada e  $h_1 = 10$  m não seja maior do que nas curvas não ajustadas. Observe que esta condição não deve ser aplicada quando  $\Delta N$  for menor que zero.

Ajuste as intensidades de campo para outros valores de  $h_1$ , de modo que ocupem a mesma posição proporcional entre a intensidade do campo máxima e  $h_1 = 10$  m a intensidade do campo correspondente nas curvas não ajustadas, usando:

$$E'_n = E'_1 + \frac{(E_n - E_1)(E'_{max} - E'_1)}{E_{max} - E_1} \quad (95)$$

Em que:

$E_1$ : intensidade do campo para  $h_1 = 10$  m

$E_n$ : intensidade do campo para valores  $h_1$  maiores que 10 m

$E_{max}$ : Intensidade de campo máxima.

E os primeiros indicam valores ajustados.

### 3.6 Anexo 8 - Comparação com o modelo de Okumura-Hata

O método de Okumura-Hata é dado por:

$$E = 69,82 + 6,16 \log f + 13,82 \log H_1 + a(H_2) - (44,9 - 6,55 \log H_1)(\log d)^b \quad (96)$$

Onde:

$E$  é o campo elétrico (dB( $\mu$ V/m)) para 1 kW e.r.p



$f$  é a frequência (MHz)

$H_1$  altura da antena transmissora acima do solo no intervalo de 30 a 200 m da estação base.

$H_2$  altura da antena receptora acima do solo no intervalo de 1 a 10 m.

$$a(H_2) = (1,1 \log f - 0,7)H_2 - (1,56 \log f - 0,8) \quad (97)$$

$b = 1$  para  $d \leq 20$  km

$b = 1 + (0,14 + 0,000187f + 0,00107H_1')(\log[0,5d])^{0,8}$  para  $d > 20$  Km

$$H_1' = \frac{H_1}{\sqrt{(1+0,00000H_1^2)}}$$

### 3.7 Considerações finais deste capítulo

Neste capítulo foram apresentados os modelos de propagação espaço livre, Hata e ITU-R P.1546. Na seção 3.1 foi exposto o modelo espaço livre. Na seção 3.2 foi exposto o modelo de Hata e na seção 3.3 foi descrita a recomendação ITU-R P.1546, detalhando os procedimentos de cálculo para a definição do valor da intensidade de campo para um determinado ponto/área.



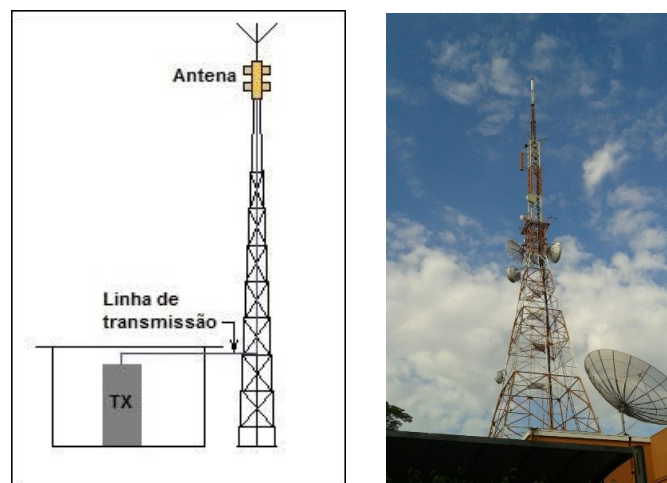
## Medições de potência elétrica

Este capítulo visa descrever os equipamentos utilizados para as aquisições das amostras e as campanhas de medições de intensidade de potência elétrica na cidade de Uberlândia.

### 4.1 Sistema de transmissão

O sistema de transmissão é composto por um sistema irradiante, uma linha de transmissão e um transmissor. A Figura 21 apresenta um diagrama desse *setup* de transmissão. As finalidades do sistema de transmissão são a geração e a emissão do sinal eletromagnético para a sua determinada região, de acordo com as limitações definidas pela Anatel e Ministério das Comunicações.

Figura 21 – Sistema de transmissão

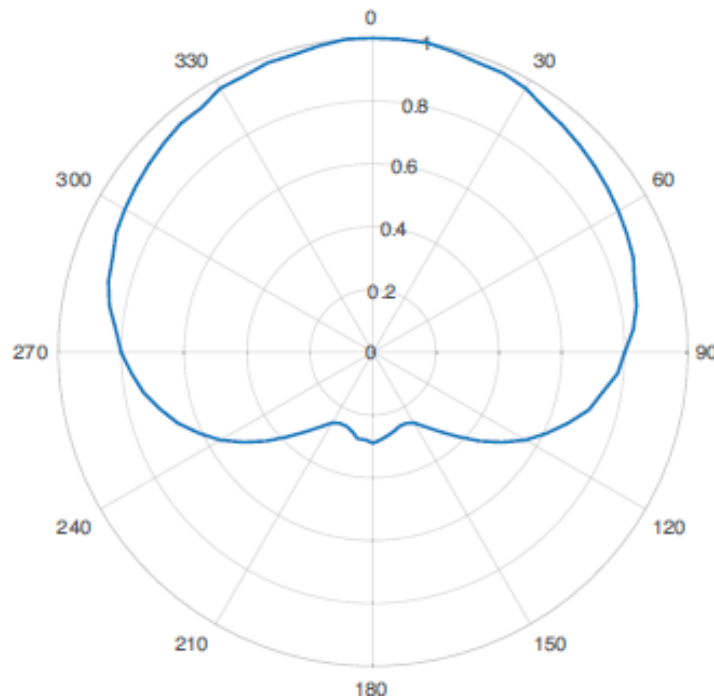


Fonte: Elaborada pelo autor.

O *setup* de transmissão adotado para esse trabalho está localizado na zona leste da cidade de Uberlândia, no bairro Umuarama, a uma altitude de 937 m, com as seguintes coordenadas geográficas da estação transmissora  $18^{\circ} 53' 06''$  S  $48^{\circ} 15' 42''$  W.

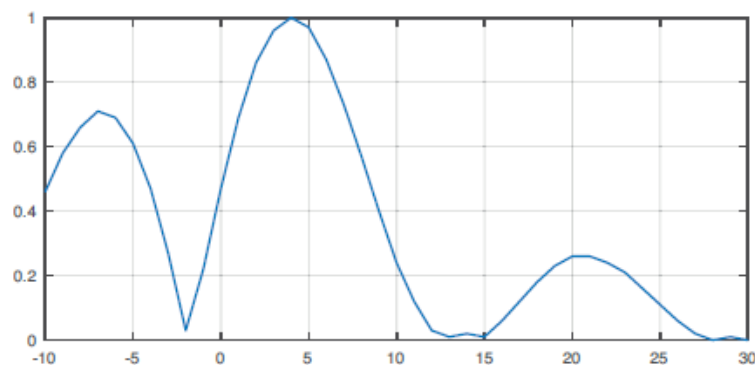
O sistema irradiante é composto por uma antena de polarização elíptica 70x30, modelo ISD083022UT do fabricante Ideal Antenas com um ganho máximo de 11,20 dBd, com *tilt* elétrico de 4°. As ondas eletromagnéticas são transmitidas 70% horizontal e 30% vertical. O centro de fase (Hci) do sistema irradiante está a 64 m de altura do chão. Os diagramas de Azimute e elevação da antena Ideal Antenas, modelo ISD082822TT, são apresentados nas Figuras 22 e 23, respectivamente.

Figura 22 – Diagrama de azimute polarização vertical



Fonte: (VASCONCELOS et al., 2017)

Figura 23 – Diagrama de elevação polarização vertical



Fonte: (VASCONCELOS et al., 2017)

A linha de transmissão de 71 m, do fabricante *Radio Frequency Systems* (RFS) modelo HCA158-50J, com diâmetro de 1 5/8 com perda de inserção de 1,27 dB/100 m e eficiência de 0,7046. A Tabela 4 apresenta o *datasheet* da linha de transmissão.

Tabela 4 – Atenuação e potência da linha de transmissão HCA 158-50J

Frequency	dB/100m	dB/100ft	Power	Frequency	dB/100m	dB/100ft	Power
0.5	0.04	0.013	270.00	512	1.47	0.449	8.30
1	0.06	0.019	196.00	600	1.60	0.488	7.64
1.5	0.08	0.023	160.00	700	1.74	0.529	7.03
2	0.09	0.027	138.00	800	1.86	0.568	6.59
10	0.20	0.06	61.40	824	1.89	0.577	6.49
20	0.28	0.085	43.40	894	1.98	0.603	6.20
30	0.34	0.104	35.40	900	1.98	0.605	6.20
50	0.44	0.135	27.30	925	2.01	0.614	6.11
88	0.59	0.18	20.50	960	2.05	0.626	6.00
100	0.63	0.193	19.20	1000	2.10	0.64	5.86
108	0.66	0.20	18.40	1250	2.37	0.722	5.21
150	0.78	0.237	15.60	1500	2.61	0.797	4.75
174	0.84	0.256	14.40	1700	2.80	0.853	4.44
200	0.90	0.275	13.50	1800	2.89	0.88	4.31
300	1.11	0.339	11.00	2000	3.06	0.932	4.08
400	1.29	0.394	9.44	2200	3.22	0.982	3.89
450	1.38	0.419	8.83	2300	3.30	1.01	3.81
500	1.45	0.443	8.41	3000	3.83	1.17	3.32

O transmissor modelo DVI3400 do fabricante Harris opera no canal 30 na faixa de frequência de 566 a 572 MHz, sua frequência de operação é 569,142857 MHz, e a potência de transmissão é 2,5 kW. A Figura 24 mostra o transmissor do canal 30.

Figura 24 – Transmissor do canal 30



Fonte: Elaborada pelo autor.

As características técnicas dos dados do sistema de transmissão da emissora analisado

neste trabalho são apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Características do sistema de transmissão

Localização da estação transmissora	-18,885° -48,2617°
Canal digital	30
Faixa de frequência	566 a 572 MHz
Frequência de operação	569,142857 MHz
Potência de operação do transmissor	2,5 kW
Antena	ISDE083022UT
Beam-tilt elétrico	4°
Azimute	210°
Polarização	Elíptica (70x30)
Ganho da antena transmissora	13,3484 dBi (Horizontal) 9,6684 dBi (Vertical)
Altura do centro de radiação	64 m
Linha de transmissão	HCA158-50J
Comprimento da linha de transmissão	71 m
Perdas de acessórios	1,27 dB
Largura de feixe vertical da antena transmissora	6,5°

## 4.2 Sistema de recepção

O *setup* de recepção é responsável por aferir e armazenar o sinal transmitido. O sistema de recepção responsável pela coleta dos dados está representado na figura 25, composto por duas antenas verticais omnidirecionais de ganho 0 dBi, um aparelho de *Global Positioning System* (GPS), um analisador de cobertura modelo TSMW da empresa Rhode & Schwarz, um *notebook* acoplado ao analisador com o *software* ROMES.

Figura 25 – Sistema de recepção



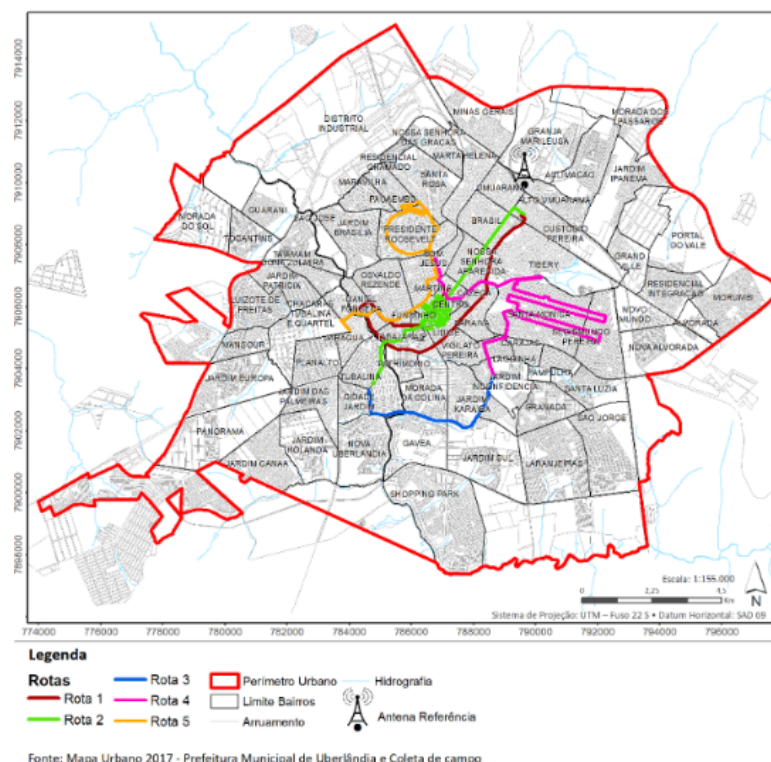
Fonte: Elaborada pelo autor.

## 4.3 Procedimentos de medição

A partir da definição dos sistemas de transmissão e recepção, o próximo passo consistiu na escolha da faixa de frequência UHF de TV digital. Neste trabalho escolheu-se a faixa de frequência de 566 a 572 MHz com frequência de operação 569,142857 MHz, para realizar as aquisições de potência elétrica.

Com a escolha da faixa de frequência a ser utilizada, definiu-se os percursos em que seriam realizadas as medições de potência elétrica. Pode-se observar na figura 26 os cinco percursos definidos para a aquisições dos dados.

Figura 26 – Percursos de aquisições dos dados



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em sequência, instalou-se o sistema de recepção no carro. Com o sistema de recepção devidamente instalado foi necessário realizar uma calibração do analisador de espectro, a fim de verificar se o analisador estava capturando as amostras sem nenhum erro. Após a instalação do sistema de recepção ao carro e realização da calibração do aparelho, a etapa seguinte foi configurar o analisador de espectro, informando a faixa de frequência do canal que seria coletado/capturado o sinal da potência elétrica. Neste caso, usou-se o canal 30 UHF com a frequência de operação 569,142857 MHz.

Assim que o analisador reconheceu a frequência a ser analisada, fez-se necessário esperar o sinal atingir a sua estabilidade para dar início às coletas da potência elétrica pelas regiões definidas da cidade. Com o *setup* calibrado e configurado, iniciaram-se as leituras

de potência elétrica do canal escolhido nos percursos predefinidos. Ao percorrer os cinco percursos estipulados, a uma velocidade média de 40 Km/h, o analisador espectral coletava e armazenava os dados de cada ponto analisado como coordenadas geográficas e potência elétrica das duas antenas, gerando um banco de dados, conforme apresentado na tabela 6.

Tabela 6 – Banco de dados do analisador espectral das coletas das amostras nas regiões

Amostra	Coordenadas Geográficas		Potência elétrica	
	Latitude	Longitude	Antena 1	Antena 2
01	-18,891171	-48,251472	-44	-44
02	-18,891171	-48,251472	-44	-44
03	-18,891171	-48,251472	-43,9	-44
04	-18,891171	-48,251472	-43,9	-44
05	-18,891171	-48,251472	-43,9	-44
06	-18,891171	-48,251472	-43,9	-44
07	-18,891171	-48,251472	-43,9	-44
08	-18,891171	-48,251471	-43,9	-44
09	-18,891171	-48,251471	-43,9	-44
10	-18,891171	-48,251471	-43,9	-44

Ao término da coleta da potência elétrica nos cinco percursos, a ação seguinte foi realizar uma filtragem no banco de dados gerado. Esse procedimento de filtragem foi necessário, pois o equipamento gerava erros nas coletas, como o não armazenamento de dados de potência elétrica, latitude e longitude em alguns pontos. Com essa filtragem realizada, obteve-se o banco de dados dos 5 percursos, com as amostras coletas para cada um dos cinco percursos, como pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7 – Quantidade de Pontos dos percursos

Percurso	Quantidade de pontos
1	137263
2	223091
3	61031
4	230383
5	176180
Total	827948

Com o banco de dados gerado, o próximo passo foi realizar a conversão de potência elétrica para campo elétrico nas amostras coletadas nos cinco percursos percorridos.

As 827948 amostras de potência elétrica medida em *dbm* do banco de dados, foram convertidas de *dbm* para *dBW*, através da equação 98.

$$Pot_{[dBW]} = Pot_{medida_{[dbm]}} - 30 \quad (98)$$

Na sequência, foi realizada a conversão da potência medida em *dbW* para *W*, essa transformação foi realizada pela equação 99.



$$Pot_{[W]} = 10^{\left(\frac{Pot_{[dBW]}}{10}\right)} \quad (99)$$

Dando continuidade foi realizada a conversão de potência em Watts para campo elétrico. A transformação foi feita através da equação 100.

$$E = \sqrt{(8 * Z_0) \frac{P_{[W]}}{1 * \lambda^2}} \quad (100)$$

Onde temos que a impedância é dada por  $Z_0 = 120\pi$  e a velocidade da luz é  $c = 3*10^8$  e  $\lambda = \frac{c}{f}$  e a frequência de operação é  $f = 569.142857 MHz$ ;

$$E = 120 + 20 \log_{10}(E) \quad (101)$$

O ganho das antenas do analisador de cobertura é de 0 dBi.

$$E_{[dB\mu V/m]} = 120 + 20 \log_{10} \frac{68,82}{\lambda \sqrt{\frac{P}{G}}} \quad (102)$$

Essas conversões de potência elétrica em dBm para campo elétrico em  $dB\mu V/m$ , foram realizadas através de um algoritmo desenvolvido no software Matlab®, conforme anexo A.1. A Tabela 8 demonstra um exemplo do banco de dados gerado com as conversões realizadas.

Tabela 8 – Banco de dados das amostras das regiões

Amostra	Coordenadas Geográficas		Potência elétrica		
	Latitude	Longitude	Antena 1	Antena 2	Campo elétrico
01	-18,891171	-48,251472	-44	-44	86,16785558
02	-18,891171	-48,251472	-44	-44	86,16785558
03	-18,891171	-48,251472	-43,9	-44	86,26785558
04	-18,891171	-48,251472	-43,9	-44	86,26785558
05	-18,891171	-48,251472	-43,9	-44	86,26785558
06	-18,891171	-48,251472	-43,9	-44	86,26785558
07	-18,891171	-48,251472	-43,9	-44	86,26785558
08	-18,891171	-48,251471	-43,9	-44	86,26785558
09	-18,891171	-48,251471	-43,9	-44	86,26785558
10	-18,891171	-48,251471	-43,9	-44	86,26785558

Com isso, tem-se o banco de dados das amostras dos cinco percursos, com os seguintes parâmetros: coordenadas geográficas (latitude e longitude), potência elétrica e campo elétrico.

## 4.4 Considerações finais deste capítulo

Neste capítulo foram apresentados os sistemas de transmissão e recepção, utilizados nas coletas de amostras de potência elétrica na Cidade de Uberlândia. Detalhou-se o

procedimento de medição desde a configuração do *setup* de recepção até a obtenção do banco de dados gerado pelas as medições realizadas.

---

## Análise da variabilidade da intensidade de campo elétrico

Este capítulo tem o intuito de descrever os procedimentos da análise da variabilidade da intensidade do sinal na cidade de Uberlândia. Será apresentado a metodologia adotada na análise, que contempla seis estudos a serem realizados.

### 5.1 Setorização

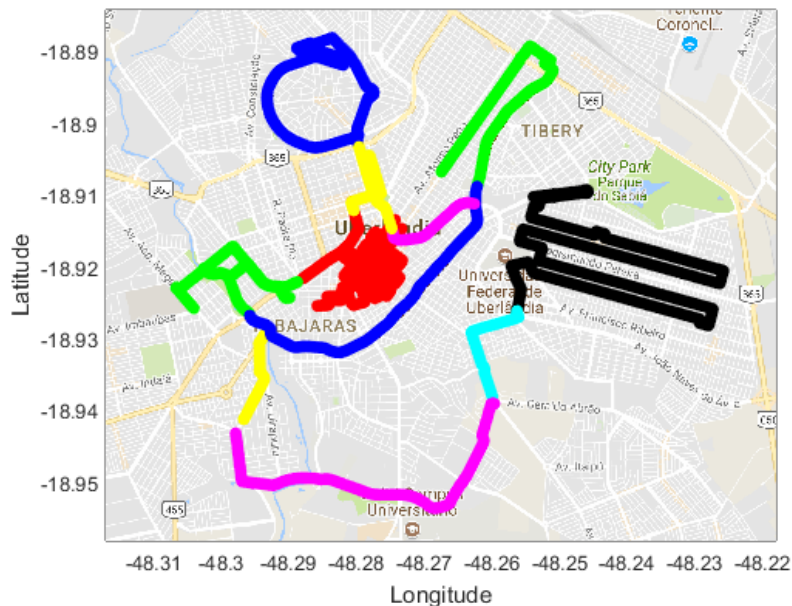
A campanha de medições consistiu na captura de sinais de potência elétrica de uma estação transmissora, em cinco diferentes percursos, no mês de Fevereiro de 2017, na cidade de Uberlândia, conforme apresentado no capítulo 4.

A partir dos cinco percursos coletados, filtrou-se cada percurso em regiões. A filtragem dessas regiões, constituiu-se através do perfil urbanístico de cada uma das amostras desses cinco percursos. Constatou-se que nos percursos tinham bairros com perfis urbanísticos diferente dos demais. A fim de se ter uma análise mais detalhada do comportamento do sinal UHF da cidade de Uberlândia, o estudo foi dividido em regiões com perfis urbanísticos diferentes. Com isso, foram definidas onze regiões, denominadas: Central, Roosevelt, Brasil, Santa Mônica, Lagoinha, Gávea, Cidade Jardim, Daniel Fonseca, Rondon Pacheco, Cazeca e Martins, conforme demonstrado na Figura 27.

Com a definição das regiões, o próximo passo foi especificar o seu perfil. A especificação se deu a partir das características do bioma da região, classificação de prédios e casas, entorno do percurso, arborização da vegetação, altitude média do solo e distância média das amostras ao transmissor.

A classificação do bioma da cidade de Uberlândia é definido por (VITAL, 2012), onde define-se que o bioma da área urbana e rural é composto por cerrado e mata atlântica. O cerrado é o bioma que está presente na maioria do território do município, enquanto que a mata atlântica tem algumas parcelas pequenas que podem ser encontradas na região rural do município.

Figura 27 – Regiões filtradas



Fonte: Elaborada pelo autor.

A arborização da vegetação de Uberlândia pode ser classificada, segundo (VITAL, 2012), como alta densidade, média densidade, baixa densidade e densidade rarefeita. De acordo com esta classificação, na região urbana observa-se a predominância da arborização de densidade média e baixa. Cada região tem suas características específicas.

Com a classificação e a especificação da região, o passo seguinte é analisar o comportamento da intensidade do campo elétrico.

## 5.2 Comportamento da intensidade do campo elétrico

O primeiro procedimento a ser realizado no comportamento da intensidade do campo elétrico é verificar a quantidade de amostras coletadas em cada uma das onze regiões definidas. A partir dessas amostras pode-se gerar o gráfico do percurso na região analisada.

Através da quantidade de amostras de campo elétrico na região, é plotado uma mancha da intensidade do campo elétrico nessa determinada região. Com a mancha gerada, consegue-se estimar o efeito do comportamento elétrico na região através da visualização dessa imagem em determinado ponto escolhido. Outra análise que pode ser realizada visualizando este gráfico são os valores médio, máximo e mínimo do campo elétrico. O valor médio, consegue-se observando a predominância da cor e estimando pela a legenda do colorbar. E os valores máximo e mínimo a partir dos valores inferior(mínimo) e superior(máximo) do colorbar. A forma definida neste trabalho para definir esses valores, foi

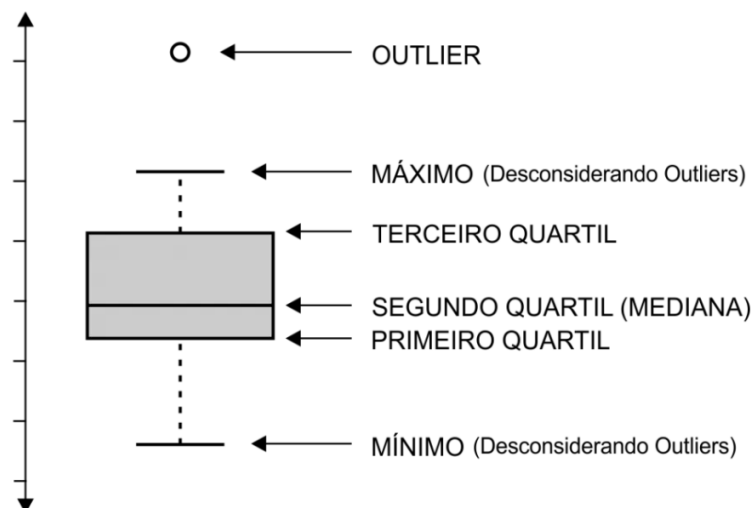
utilizando o banco de dados do Excel ®, e estimandos através de funções media, máximo e mínimo.

Em sequência, as amostras de campo elétrico são submetidas ao teste de normalidade, a fim de verificar se as amostras resultam de uma distribuição normal. O teste definido para realizar essa análise da normalidade é o *Kolmogorov-smirnov*. O algoritmo desenvolvido em Matlab ®, que realiza a análise da normalidade encontra-se no anexo A.3.

A fim, de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico na região, os valores do campo elétrico são ordenados em função da distância em ordem crescente e na sequência é gerado o gráfico do campo elétrico em relação a distância. Com o gráfico plotado é possível verificar a faixa de distância do percurso das amostras aferidas em relação ao transmissor.

Com o objetivo de retratar e comparar a variação da intensidade do campo elétrico das amostras, utiliza-se a ferramenta gráfica boxplot que permite visualizar a distribuição e valores discrepantes (*outliers*) das amostras de campo elétrico na região. A figura 28 representa o gráfico Boxplot com as análises estatísticas descritivas como o mínimo, máximo, primeiro quartil, segundo quartil/mediana e o terceiro quartil, as quais pertencem ao gráfico boxplot.

Figura 28 – Boxplot



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em que:

Mínimo: menor valor dentro do critério de seleção de outliers (Limite Inferior =  $Q1 - 1,5 * (Q3 - Q1)$ ).

Q1(primeiro quartil): Separa os 25% valores inferiores dos 75% superiores;

Q2 (segundo quartil): Separa os 50% valores inferiores dos 50% superiores (mediana);

Q3 (terceiro quartil): Separa os 75% valores inferiores dos 25% superiores;

Máximo: maior valor dentro do critério de seleção de outliers (Limite Superior =  $Q3 + 1,5 * (Q3 - Q1)$ ).

### 5.3 Interpolação linear

A interpolação linear constitui-se através de três análises. A primeira análise foi a geração de um modelo de regressão linear polinomial, através das amostras de campo elétrico e distância. A segunda análise foi a comparação do erro cumulativo do campo elétrico com uma função distribuição cumulativa normal. E por fim, a última análise foi feita com a comparação do erro cumulativo do campo elétrico com uma função distribuição cumulativa exponencial.

Para a geração do modelo de regressão linear polinomial, inicia-se com o banco de dados das amostras de campo elétrico, o primeiro passo realizado foi ordenar a intensidade do campo em relação a distância, em sequência plotar o gráfico do comportamento do campo elétrico em relação a distância de cada amostra.

A fim de prever o comportamento do campo elétrico medido com a altitude do relevo, gerou-se um modelo de regressão linear polinomial para a região analisada.

O Modelo estatístico de regressão linear simples é dado pela equação 103, na qual são consideradas duas variáveis  $X$  e  $Y$  com  $n$  pares  $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ , onde  $Y$  é função linear de  $X$ .

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i, \quad \text{para } i = 1, \dots, n, \quad (103)$$

Onde:

$Y_i$  é uma variável aleatória e descreve o valor da variável resposta (variável dependente);

$x_i$  representa o valor da variável explicativa;

$\varepsilon_i$  é uma variável aleatória que representa o erro experimental;

$\beta_0$  e  $\beta_1$  são os parâmetros do modelo;

$n$  é o tamanho da amostra.

Utilizando-se o Método dos Mínimos Quadrados, foram definidos os parâmetros do modelo de regressão linear, que limitou-se em minimizar a soma dos quadrados dos desvios  $L$ , de acordo na expressão da equação 104.

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [Y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i]^2 \quad (104)$$

Para minimizar a soma dos quadrados dos desvios, derivou-se a equação 104 em relação aos parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$ .

$$\frac{\partial L(\beta_0, \beta_1)}{\partial \beta_0} = -2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) \quad (105)$$

$$\frac{\partial L(\beta_0, \beta_1)}{\partial \beta_1} = -2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) x_i \quad (106)$$

No sentido de mostrar os valores particulares dos parâmetros que minimizam  $L$ , substituiu-se  $\beta_0$  e  $\beta_1$  por  $\hat{\beta}_0$  e  $\hat{\beta}_1$  e igualou-se as derivadas parciais a zero, assim foram obtidas as equações 107 e 108.

$$-2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i) = 0 \quad (107)$$

$$-2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i) x_i = 0. \quad (108)$$

Resumindo, tem-se as Equações Normais de Mínimos Quadrados expressas pela equação 109.

$$\begin{cases} n\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n Y_i \\ \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_i + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i Y_i. \end{cases} \quad (109)$$

Resolvendo o sistema de equações apresentado na equação 109, encontrou-se os valores de  $\hat{\beta}_0$  e  $\hat{\beta}_1$  que minimizam  $L$ .

Considerando a equação 109, tem-se:

$$\hat{\beta}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} - \frac{\hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

ou seja,

Para se obter os valores de  $\hat{\beta}_0$  e  $\hat{\beta}_1$  que minimizam  $L$ , e resolvido o sistema dado na equação 109.

$$\hat{\beta}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} - \frac{\hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

ou seja,

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (110)$$

em que  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  e  $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$  são as médias de  $x$  e da variável  $Y$ , respectivamente.

Deste modo, substituindo-se a equação 110 na equação 109 tem-se que:

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 &= \sum_{i=1}^n x_i Y_i - \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_i \\ &= \sum_{i=1}^n x_i Y_i - (\bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{x}) \sum_{i=1}^n x_i \\ &= \sum_{i=1}^n x_i Y_i - \bar{Y} \sum_{i=1}^n x_i + \hat{\beta}_1 \bar{x} \sum_{i=1}^n x_i \end{aligned}$$

$$= \sum_{i=1}^n x_i Y_i - n\bar{x}\bar{Y} + n\hat{\beta}_1 \bar{x}^2.$$

Então,

$$\hat{\beta}_1 \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) = \sum_{i=1}^n x_i Y_i - n\bar{x}\bar{Y}$$

e portanto, conclui-se que

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i Y_i - n\bar{x}\bar{Y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \quad (111)$$

É possível escrever  $\hat{\beta}_1$  também da seguinte forma:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})Y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})x_i} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i Y_i - n\bar{x}\bar{Y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2} \quad (112)$$

Os valores de  $\hat{\beta}_0$  e  $\hat{\beta}_1$  assim determinados são chamados Estimadores de Mínimos Quadrados (EMQ).

Ajustando o modelo de regressão linear simples tem-se, então:

$$\hat{Y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$$

sendo que  $\hat{Y}$  é um estimador pontual da média da variável Y para um valor de x, ou seja,

$$E(\hat{Y}|x_i) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

Com o polinômio calculado, o próximo passo é reproduzir a reta polinomial desses valores e apresentar a sua equação linear polinomial.

Com o polinômio estabelecido, o próximo passo a ser realizado será o cálculo das diferenças das amostras de campo elétrico medido com o polinômio gerado em cada ponto do espaço amostral. A equação 113 demonstra o método do cálculo.

$$Erro = Campo_{medido} - Polinômio \quad (113)$$

Com os erros encontrados nas amostras de campo elétrico, gera-se o histograma e normaliza-se em seguida. E por fim, calcula-se a soma cumulativa desses erros. Em sequência é gerado o gráfico da cumulativa do erro do campo elétrico.

Através da média e do desvio padrão dos erros do campo elétrico, calcula-se a função distribuição cumulativa normal determinada pela equação 114.

$$F(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{\frac{-(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (114)$$



Na sequência gera o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico com a distribuição cumulativa normal normalizada do erro.

A próxima análise realizada será a função distribuição cumulativa exponencial. Para se obter a função distribuição cumulativa exponencial, primeiramente, e realizado a conversão do campo elétrico de  $\text{dB}\mu/\text{Vm}$  para  $\text{dBm}$  pela a equação 115.

$$E = 10^{\frac{\text{campo}}{10}} \quad (115)$$

Na sequência são normalizados os valores de campo elétrico em  $\text{dbm}$ . Com os valores de campo elétrico convertidos em  $\text{dbm}$  e normalizados, é elaborado o histograma dessas amostras. Em seguida, é realizada a normalização do histograma gerado e calculada a cumulativa do histograma. A partir do histograma do campo elétrico, são obtidos os valores do campo mínimo e máximo, média e desvio padrão em  $\text{dbm}$ . Em seguida, e realizado o gráfico da cumulativa do campo elétrico em  $\text{dbm}$ .

Com a média do campo elétrico em  $\text{dBm}$  encontrada, calcula-se a função distribuição cumulativa exponencial, determinada pela a equação 116.

$$F(x/\mu) = \int_0^x \frac{1}{\mu} e^{-\frac{t}{\mu}} dt = 1 - e^{-\frac{x}{\mu}} \quad (116)$$

Após a execução destas etapas, e plotado o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em  $\text{dbm}$  com a função distribuição cumulativa exponencial. No anexo A.4, é apresentado o algoritmo desenvolvido para a realização das análises da interpolação linear.

## 5.4 Interpolação do campo bidimensional

A interpolação do campo bidimensional consiste em seis análises. A primeira análise constitui na interpolação do campo elétrico em uma superfície em relação às variáveis altitude e distância. Já a segunda análise tem o intuito de demonstrar o comportamento do erro do campo elétrico em relação a uma superfície com às variáveis altitude e distância. As análises subsequentes são a comparação do erro do campo elétrico com as funções de distribuição gaussiana, função densidade de probabilidade normalizada com o histograma do erro, com uma distribuição exponencial e um histograma do erro com a pdf.

Para a geração da superfície interpolada do campo elétrico e com o intuito de relacionar a variável campo elétrico medido com as variáveis altitudes do relevo e distância do transmissor, e gerado um modelo de regressão linear múltipla polinomial para o local analisado. Esse modelo é definido pela equação 117.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon \quad (117)$$

No qual,  $Y$  representa a variável resposta (campo elétrico), os parâmetros  $x_1$  e  $x_2$  da equação representam as variáveis distância e altitude, respectivamente denominadas variáveis explicativa e o  $\varepsilon$  representa o erro experimental. Os coeficientes da regressão são denominados como  $\beta_0, \beta_1$  e  $\beta_2$ .

Presumindo  $E(\varepsilon) = 0$ , tem-se então a seguinte equação  $E(Y|x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$ , a qual representa um plano bidimensional, que é intitulado como superfície de resposta.

A variável resposta  $Y$  pode ser comparada a um número  $p$  de variáveis de entrada. O modelo de regressão linear múltipla (MRLM) com  $p$  variáveis explicativas é dado pela equação 118.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (118)$$

Onde:

$x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}$  são valores das variáveis explicativas;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$  são os coeficientes da regressão;

$\epsilon_i$  são erros aleatórios independentes.

Os dados de um MRLM podem ser representados conforme demonstrado pela a Tabela 9.

Tabela 9 – Representação dos dados

$y$	$x_1$	$x_2$	$\dots$	$x_p$
$y_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	$\dots$	$x_{1p}$
$y_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	$\dots$	$x_{2p}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$y_n$	$x_{n1}$	$x_{n2}$	$\dots$	$x_{np}$

Através do método dos mínimos quadrados, define os parâmetros do modelo de regressão linear, que minimiza a função derivando-a, conforme a equação 119.

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{i1} - \beta_2 x_{i2} - \dots - \beta_p x_{ip})^2 \quad (119)$$

Derivando  $L$  em função dos  $\beta$ 's obtém-se

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_0} = -2 \sum_{i=1}^n [Y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{i1} - \beta_2 x_{i2} - \dots - \beta_p x_{ip}],$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta_j} = -2 \sum_{i=1}^n [Y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{i1} - \beta_2 x_{i2} - \dots - \beta_p x_{ip}] x_{ji}, \quad j = 1, 2, \dots, p.$$

Igualando as derivadas parciais a zero e substituindo  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$  por  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p$ , tem-se o seguinte sistema de equações

$$\left\{ \begin{array}{l} n\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_p \sum_{i=1}^n x_{ip} = \sum_{i=1}^n Y_i \\ \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_p \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ip} = \sum_{i=1}^n x_{i1}Y_i \\ \vdots \\ \hat{\beta}_0 \sum_{i=1}^n x_{ip} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{ip}x_{i1} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{ip}x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_p \sum_{i=1}^n x_{ip}^2 + \sum_{i=1}^n x_{ip}Y_i \end{array} \right. \quad (120)$$

Outra maneira que o MRLM pode ser representado é na forma matricial dos dados.

Assim, levando em consideração a entrada de dados apresentada na Tabela 9, o modelo MRLM pode ser escrito conforme a equação 121.

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (121)$$

com

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix},$$

Onde:

$Y$  é um vetor  $n \times 1$  cujos componentes corresponde às  $n$  respostas;

$X$  é uma matriz de dimensão  $n \times (p + 1)$  denominada matriz do modelo;

$\varepsilon$  é um vetor de dimensão  $n \times 1$  cujos componentes são os erros e

$\beta$  é um vetor  $(p + 1) \times 1$  cujos elementos são os coeficientes de regressão.

O método de mínimos quadrados tem como objetivo encontrar o vetor  $\hat{\beta}$  que minimiza

$$\begin{aligned} L &= \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon' \varepsilon = (Y - X\beta)'(Y - X\beta) = \\ &= Y'Y - Y'X\beta - \beta'X'Y + \beta'X'X\beta = Y'Y - 2\beta'X'Y + \beta'X'X\beta, \end{aligned}$$

sendo que  $Y'X\beta = \beta'X'Y$  pois o produto resulta em um escalar. A notação  $X'$  representa o transposto da matriz  $X$  enquanto que  $Y'$  e  $\beta'$  representam os transpostos dos vetores  $Y$  e  $\beta$ , respectivamente. Usando a técnica de derivação (em termos matriciais) obtém-se:

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = -2X'Y + 2X'X\beta.$$

Igualando a zero e substituindo o vetor  $\beta$  pelo vetor  $\hat{\beta}$ , tem-se

$$(X'X)\hat{\beta} = X'Y.$$

Em geral, a matriz  $(X'X)$  é não singular, ou seja, tem determinante diferente de zero, e portanto é invertível. Desta forma, conclui-se que os estimadores para os parâmetros  $\beta_j$ ,  $j = 0, \dots, p$  são dados pelo vetor

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y. \quad (122)$$

Portanto, o modelo de regressão linear ajustado e o vetor de resíduos são respectivamente

$$\hat{Y} = X\hat{\beta} \quad \text{e} \quad e = Y - \hat{Y} = Y - \hat{Y}. \quad (123)$$

Ao substituírmos os estimadores de mínimos quadrados, tem-se que  $\hat{Y} = HY$  no qual  $H = X(X'X)^{-1}X'$  é a matriz chapéu, ou matriz de projeção do vetor de respostas  $Y$  no vetor de respostas ajustadas  $\hat{Y}$ .

Com as variáveis altitude, distância e campo elétrico medido, calcula-se o polinômio de grau 1. A partir do ajuste da curva polinomial realizado o próximo passo é plotar a superfície do campo elétrico medido em relação as variáveis altitude e distância na região analisada.

Na sequência é realizada uma análise estatística, onde calcula-se os valores mínimo e máximo, media, mediana, desvio padrão e variância nas amostras de campo elétrico na região.

Para realizar os calculos da média do sinal, defini-se através da equação 124.

$$E[X] = \mu_x = \mu = \sum_i x_i P(x_i) \quad (124)$$

A variância é definida pela a equação 125.

$$Var[X] = \sigma_{(x)}^2 = E[(X - \mu_{(x)})^2] \quad (125)$$

O desvio padrão é definido pela a equação 126.

$$\sigma_{(x)} = \sqrt{\sigma_{(x)}^2} \quad (126)$$

Na sequência é calculado a diferença do campo elétrico entre o valor do campo interpolado e o valor medido para as amostras da região.

Em seguida, é realizado o calculo do polinômio de grau 1 da diferença do campo elétrico e calcula-se os valores dos coeficientes. Esses calculos são gerados através de um algoritmo desenvolvido no Matlab®.

Após estas etapas, foi plotado o gráfico da superfície do campo elétrico interpolado com as variáveis distância e altitude, com a diferença do erro do campo elétrico.

Por fim, são calculados os valores medio, desvio padrão, valor máximo e mínimo, mediana e variância, do erro do campo elétrico.

Com os valores da diferença entre o valor do campo interpolado e o valor medido calculado. O próximo passo é realizar o histograma normalizado dessa diferença. Na sequência é realizado a soma cumulativa do histograma normalizado.

A partir dos valores da diferença do valor do campo interpolado, calcula-se a média, desvio padrão, variância e mediana. Dos valores média e desvio padrão do campo interpolado, foi obtida a distribuição gaussiana.

O próximo passo a realizar é a análise do histograma cumulativo da diferença do campo elétrico interpolado com uma função de distribuição gaussiana. Em sequência é plotado o gráfico da pdf do campo da diferença e a cdf normalizada.

A partir da média e desvio padrão da diferença do campo elétrico interpolado, calcula a pdf normalizada do erro da diferença do campo elétrico e o histograma da diferença do campo. Com a pdf e o histograma calculados o próximo passo é gerar o gráfico da pdf gaussiana e do histograma da diferença.

Para realizar a expcdf, inicialmente converte os valores absolutos em logaritmos. Na sequência esses valores são normalizados. Com os valores de campo elétrico convertidos em dbm e normalizados, os histogramas dessas amostras são gerados. A partir do histograma do campo elétrico, encontraram-se os valores do campo mínimo e máximo, média e desvio padrão em dbm. Em seguida, é plotado o gráfico da cumulativa do campo elétrico em dbm.

A partir da média do campo elétrico em dBm/normalizado encontrada, calcula a função distribuição cumulativa exponencial. Na sequência, gera o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em dbm com a função distribuição cumulativa exponencial.

A pdf da exponencial da diferença do campo elétrico e calculada é o histograma da diferença do campo elétrico é obtido. Assim, o gráfico da pdf do histograma do campo elétrico interpolado (E-valor interpolado) e pdf da exponencial são plotados. No anexo A.5, são apresentados os algoritmos desenvolvidos para a realização das análises da interpolação bidimensional.

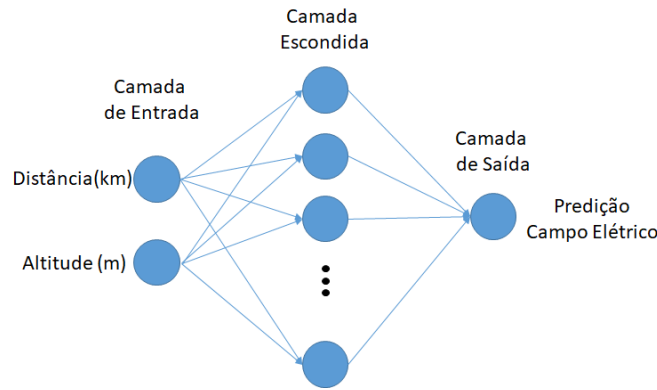
## 5.5 Comparação dos modelos de propagação

Com o intuito de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico em relação aos modelos de propagação de ondas na cidade de Uberlândia, definiu-se quais os modelos de propagação foram analisados neste trabalho. Os modelos de propagação escolhidos foram o espaço livre, hata, ITU-R P.1546 e RNA.

Para a geração/desenvolvimento do modelo de RNA para a cidade de Uberlândia, inicialmente unificou-se os onze bancos de dados das regiões em apenas um banco, totalizando 71000 amostras. A partir de uma análise do banco de dados, definiu-se os parâmetros de entrada que seriam utilizados no modelo. Os parâmetros definidos são distância e

altitude. Na sequência estabelece o campo elétrico como parâmetro alvo/saída da RNA, conforme demonstrado pela Figura 29.

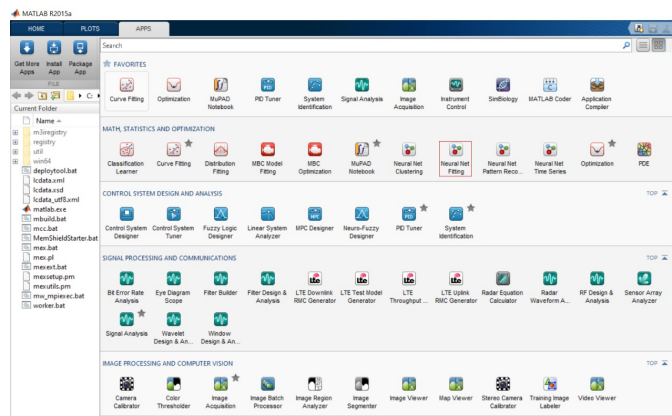
Figura 29 – Arquitetura da RNA



Fonte: Elaborada pelo autor.

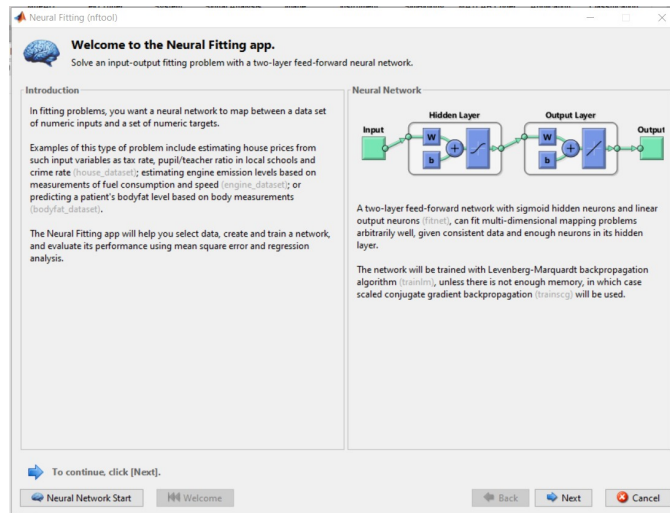
Com base nos parâmetros de entrada e saída determinados da RNA, em seguida é realizado o desenvolvimento da RNA no Matlab®, através do *toolbox Neural Net Fitting*. O *toolbox Neural Net Fitting*, se encontra na aba APP no Matlab®, conforme demonstrado na Figura 30.

Figura 30 – *Toolbox Neural Net Fitting*



Fonte: Elaborada pelo autor.

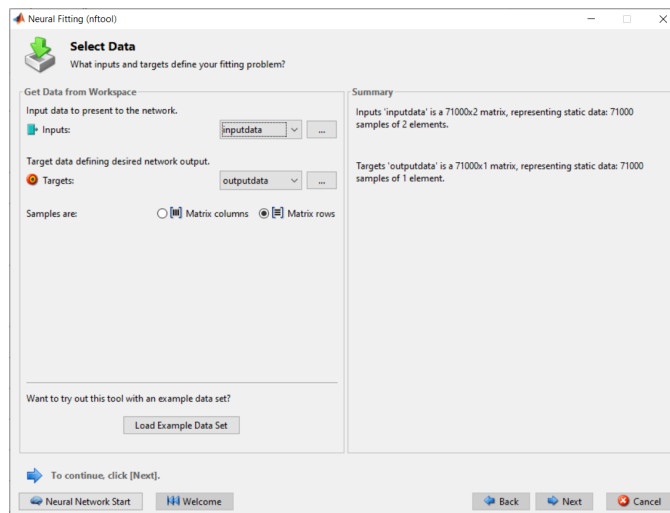
Ao selecionar o toolbox Neural Net Fitting será direcionado para a tela inicial de boas vindas da ferramenta, conforme demonstrado na Figura 31.

Figura 31 – Tela inicial do *toolbox Neural Net Fitting*

Fonte: Elaborada pelo autor.

No próximo passo é realizada a configuração no toolbox das entradas e saídas da RNA. Primeiramente são informadas as entradas (distância e altitude) do banco de dados e na sequência a saída (campo elétrico medido), conforme demonstrado pela a Figura 32.

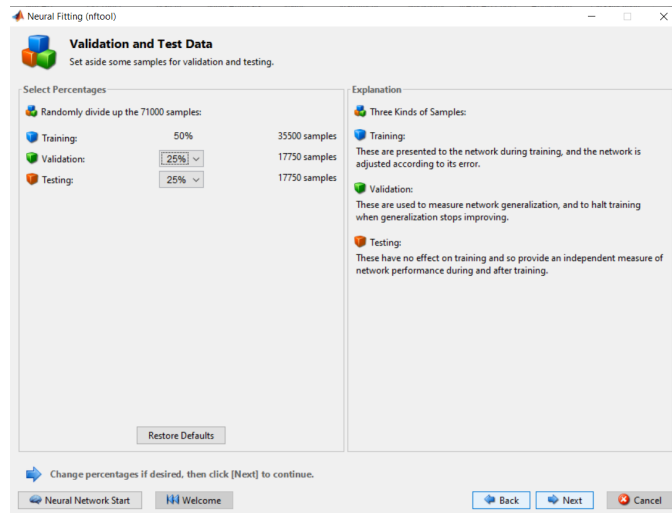
Figura 32 – Configuração de entradas e saída da RNA



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a configuração realizada das entradas e saídas é necessário realizar os ajustes da validação e teste das amostras da RNA. Essa etapa consiste em definir a porcentagem de amostras que serão utilizadas para treinamento, validação e testes. Definiu-se aleatoriamente que das 71000 amostras, 50% serão utilizadas para treinamento, 25% para validação e 25% para testes, conforme demonstrado na Figura 33.

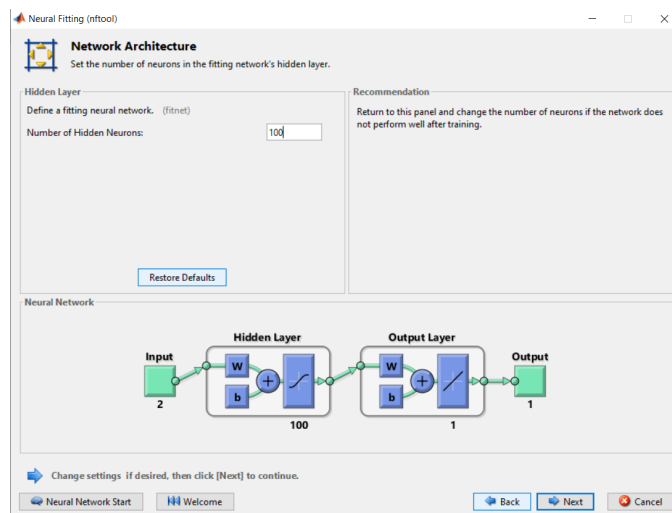
Figura 33 – Configuração de ajustes de validação e testes da RNA



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência definiu-se a quantidade de neurônios na camada escondida. A quantidade de neurônios definidos para a rede neural foi de 100 neurônios. Assim a RNA desenvolvida para este trabalho terá 100 neurônios na camada escondida, conforme demonstrado na Figura 34.

Figura 34 – Definição de neurônios da RNA

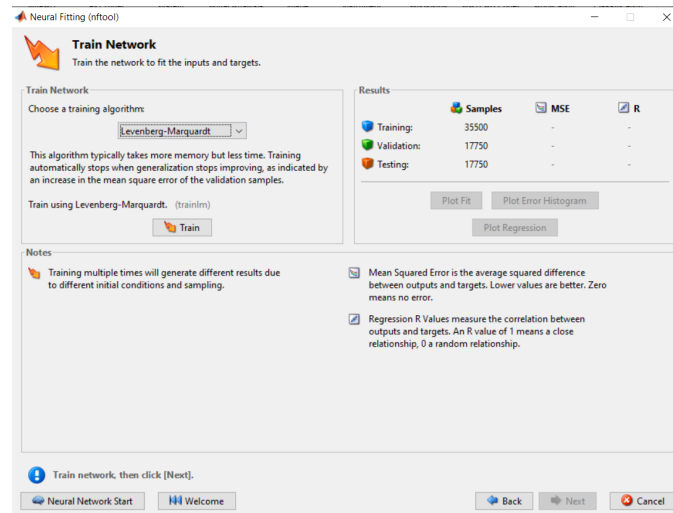


Fonte: Elaborada pelo autor.

E por fim, realizou-se o treinamento da RNA. Para iniciar o treinamento é necessário escolher qual algoritmo de treinamento que será utilizado Levenberg-Marquardt, Bayesian Regularization ou Scaled Conjugate Gradient. O algoritmo de treinamento escolhido foi Levenberg-Marquardt, conforme demonstrado pela a Figura 35.

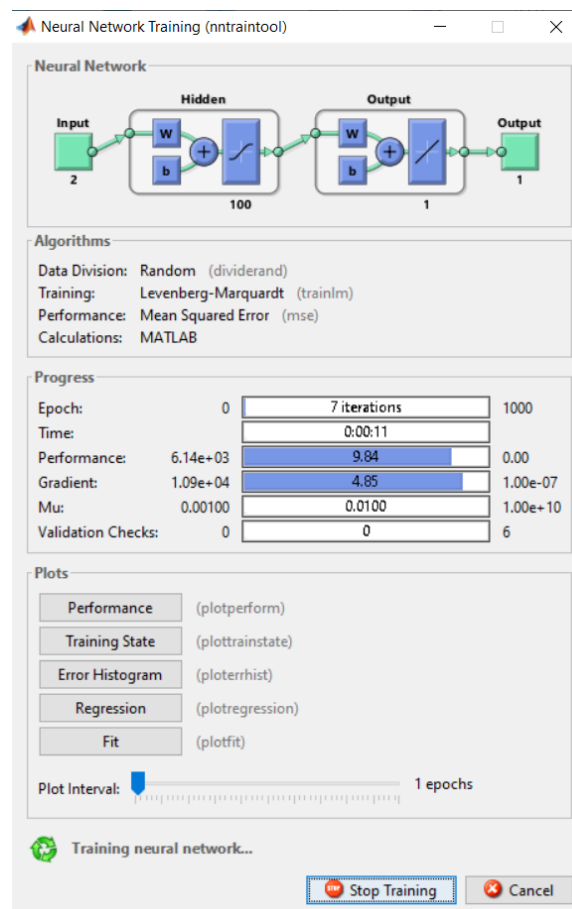


Figura 35 – Tela de treinamento da RNA



Fonte: Elaborada pelo autor.

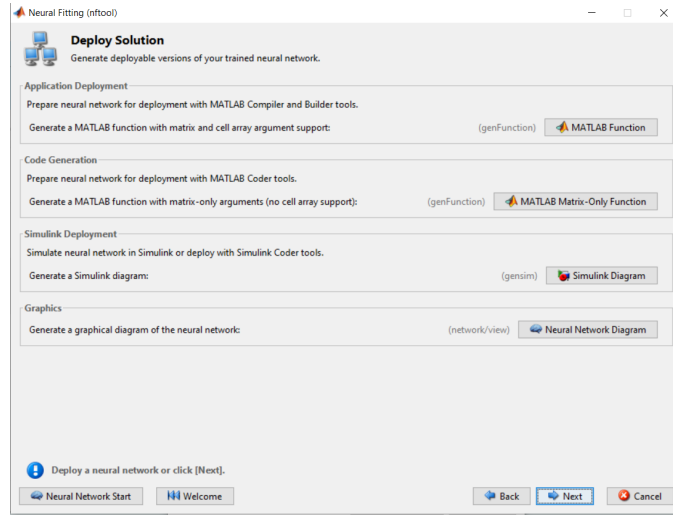
Na sequência inicia-se o treinamento da RNA. A Figura 36 apresenta a RNA treinando.

Figura 36 – RNA em treinamento pelo o *toolbox Neural Net Fitting*

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a RNA treinada e definida, o próximo passo é gerar o código da função da RNA gerada. A figura 37 apresenta a tela do toolbox responsável em gerar o código da função. O código completo da RNA encontra-se no Anexo A.2.

Figura 37 – Tela inicial do *toolbox Neural Net Fitting*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a definição dos modelos de propagação e a geração do modelo RNA, o próximo passo a ser realizado é o desenvolvimento de algoritmos no software Matlab®(Anexo A.8), para realizar os cálculos de campo elétrico previstos dos modelos determinados neste trabalho.

Na sequência, processou esses algoritmos para cada uma das regiões analisadas, retornando os valores de campo elétrico previstos de cada amostra do banco de dados das onze regiões. De porte dos valores previstos de campo elétrico dos modelos de propagação, estes foram armazenados nos banco de dados das regiões.

Em seguida, define-se a métrica a ser utilizada para avaliação dos modelos de propagação de ondas eletromagnéticas. As métricas escolhidas foram o erro e o desvio padrão entre os valores de campo previstos e os valores de campo elétrico medidos.

O erro será calculado de três modos diferentes, conforme retratado em (CAVALCANTE, 2010). O erro médio, o erro médio absoluto e o erro RMS.

O erro médio  $e_i$  é determinado pela equação 127 e 128.

$$e_i = E_{pi} - E_{mi} \quad (127)$$

$$E = |E_{pi} - E_{mi}| \quad (128)$$

Onde  $E_{pi}$  é o campo elétrico previsto e o  $E_{mi}$  é o campo elétrico medido para cada amostra.

O erro médio e o erro médio absoluto são calculados a partir das equações 129 e 130:

$$\langle e \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i \quad (129)$$

$$\langle E \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (130)$$

Onde N é o número de amostras.

O desvio padrão absoluto ( $\sigma$ ), é calculado a partir do erro absoluto e do erro médio absoluto pela equação 131.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left( \sum_{i=1}^N E_i^2 - \langle E \rangle^2 \right)} \quad (131)$$

O erro RMS é uma associação dos dois parâmetros anteriores. Assim, usando as equações 130 e 131, tem-se a equação 132:

$$E_{RMS} = \sqrt{\langle E \rangle^2 + \sigma^2} \quad (132)$$

Com as métricas definidas, o próximo passo é realizar os calculos dos valores estatísticos desses parâmetros(erro médio, erro médio absoluto, erro RMS e desvio padrão) dos modelos de propagação em relação ao campo elétrico medido para cada região analisada.

De posse dos resultados calculados e das amostras medidas em campo, é possível realizar uma comparação tanto da eficácia desses modelos existentes e comparar os desempenhos de intensidade do campo elétrico em cada região dos modelos analisados.

## 5.6 Correlação das regiões

A correlação das regiões consiste em realizar a comparação das onze regiões analisadas, a fim de identificar o melhor desempenho da intensidade do campo elétrico na Cidade de Uberlândia-MG.

A primeira correlação a ser realizada é a comparação dos boxplots das onze regiões. Através dos boxplots das regiões consegue constatar de maneira visual qual o comportamento do campo elétrico nas regiões. Para certificar que as amostras das regiões são distintas é realizado o teste de comparação. Optou por um teste de comparação mais generalizado e mais abrangente e que leva em consideração a comparação das medianas. O teste de comparação escolhido é o teste *Mann Whitney*. No Anexo A.7 encontra-se o algoritmo para a realização do teste *Mann Whitney*.

A segunda correlação a ser executada é a comparação das análises estatísticas das regiões com os modelos de propagação espaço livre, hata, ITU-R P.1546 e RNA.

## 5.7 Considerações finais deste capítulo

Neste capítulo foi apresentada a metodologia adotada para analisar a variabilidade da intensidade de campo elétrico na cidade de Uberlândia. Na seção 5.1 foi demonstrado como foi realizada a setorização das regiões. A seção 5.2 apresentou a metodologia adotada para analisar o comportamento da intensidade do campo elétrico. Na seção 5.3 demonstrou a interpolação linear. A seção 5.4 apresentou a interpolação bidimensional. Na sequência, a seção 5.5 expôs a geração de um modelo de RNA e demonstrou a metodologia adotada para a comparação dos modelos de propagação adotados neste trabalho. E por fim, na seção 5.6 apresentou a metodologia adotada para realizar a correlação das regiões.

## Resultados

Esse capítulo tem como objetivo expor os resultados das análises estatísticas de variabilidade do sinal eletromagnético transmitido pelo canal de rádio propagação na cidade de Uberlândia. Os resultados referentes à variabilidade do sinal são apresentados na primeira seção deste capítulo através das regiões analisadas e da correlação.

### 6.1 Região Central

A região central é demonstrada na figura 38, sendo composta por 73533 pontos de medição. Constatou-se que nessa região ela é composta por prédios residenciais e comerciais, com arborização rarefeita e altitude média do terreno de 856,54 m. A altura dos prédios nessa região é de em média 10 pavimentos.

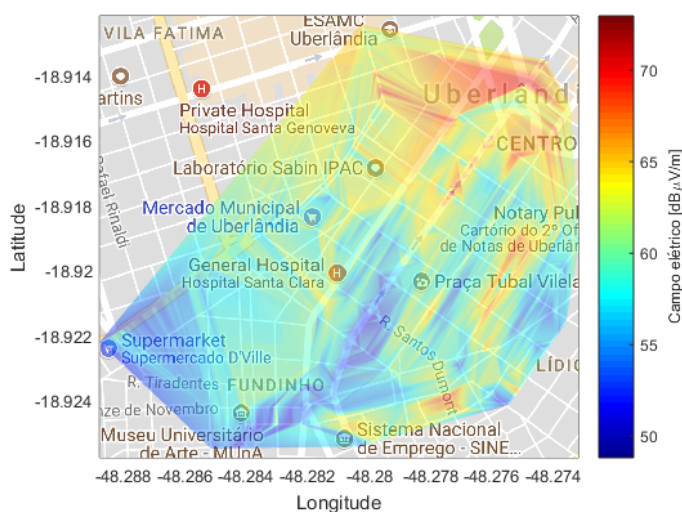
Figura 38 – Região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a medição do campo elétrico no percurso da figura 38, o próximo passo a ser realizado é gerar uma mancha da intensidade do sinal do campo elétrico na região. A figura 39 representa a mancha da intensidade do campo elétrico na região central.

Figura 39 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Central



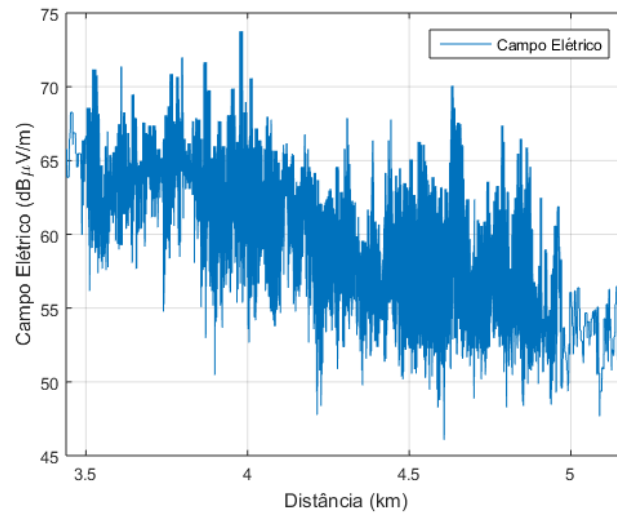
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na mancha da intensidade do sinal elétrico na figura 39 a predominância da cor cian, de acordo com a legenda do colobar dessa região a faixa de frequência que representa a cor cian é de 55 a 60  $\text{dB}\mu\text{V/m}$ , onde obtém uma média da intensidade do campo elétrico de 59,05  $\text{dB}\mu\text{V/m}$  e constata-se que o campo elétrico máximo e mínimo são 73,76 e 46,06  $\text{dB}\mu\text{V/m}$ , respectivamente.

Na sequência as 73533 amostras são submetidas ao teste de normalidade *Kolmogorov-Smirnov* A fim de verificar se as amostras resultam de uma distribuição normal. O teste de normalidade para a região Central apresentou que as amostras não provém de uma distribuição normal.

As 73533 amostras de campo elétrico da região central em relação a distância do transmissor são plotadas, conforme apresentado pela a figura 40.

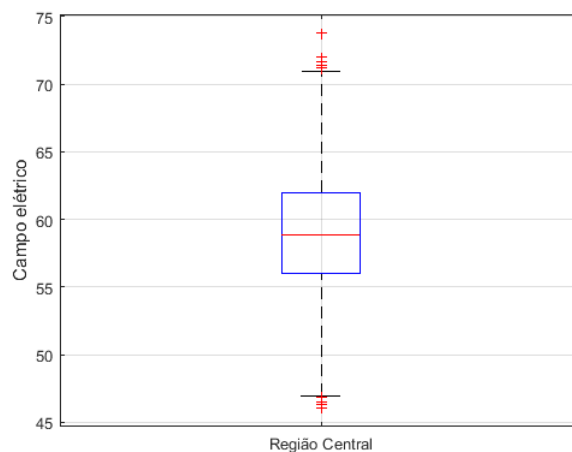
Figura 40 – Campo elétrico da região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observar-se que na figura 40, apresenta o comportamento da intensidade do sinal ao longo do percurso da região central das 73533 amostras. Essas amostras estão a uma faixa de 3,43 a 5,16 km do transmissor. Para retratar a variação do campo elétrico utiliza-se a ferramenta gráfica boxplot, que representa a alteração do campo elétrico por meio de quartis.

Figura 41 – Boxplot da região Central



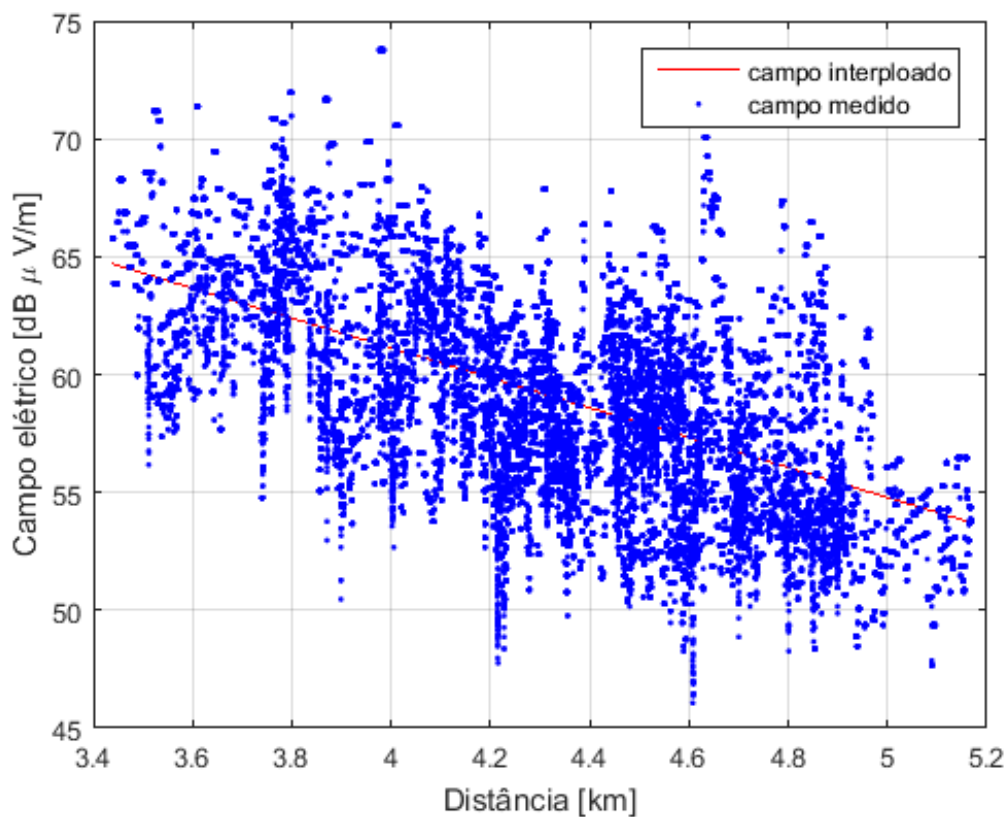
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na figura 41, apresenta o gráfico boxplot do campo elétrico da região central. O qual apresenta 177 outliers (medidas discrepantes), o limite superior de  $73,7679 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , e o Terceiro quartil Q3 (75%)  $61,9679$ , segundo quartil Q2 (mediana)  $58,8679$ , primeiro quartil Q1 (25%)  $55,9679$  e limite inferior  $46,0679$ .

### 6.1.1 Interpolação linear da região Central

Na interpolação linear são realizadas três análises. A primeira análise é a geração de um modelo de regressão linear polinomial. Com o intuito de conceber um modelo de regressão linear polinomial das 73533 amostras coletadas, ordenou-se as amostras em ordem crescente de acordo com a distância e através da regressão linear encontrou-se o polinômio de grau 1. O qual é representado na figura 42 por uma reta em vermelho. A equação dessa reta da figura 42 e expressa por  $y = -6,3396x + 86,4852$ .

Figura 42 – Regressão linear polinomial do campo elétrico da região Central



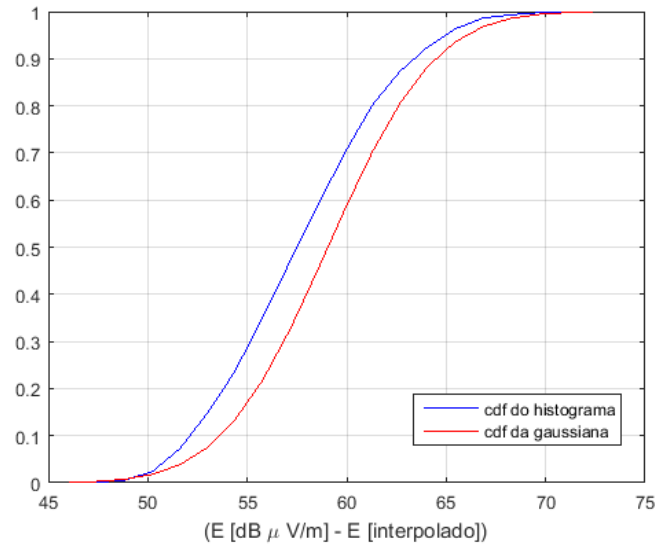
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência calcula-se a diferença das amostras de campo elétrico medido com o polinômio gerado da região em cada ponto do espaço amostral. E analisa-se o comportamento do erro interpolado com as funções distribuição de probabilidade cdf e exponencial.

Na distribuição cdf, com os erros calculados, gera-se um histograma normalizado desses erros e calcula-se a soma cumulativa. Na sequência, com a média (59,0530) e o desvio padrão (4,2081) dos erros da intensidade de campo elétrico, calcula-se a função distribuição cumulativa normal (cdf). Com os valores calculados, o próximo passo é produzir o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico com a cdf normalizada do erro, apresentado na figura 43.



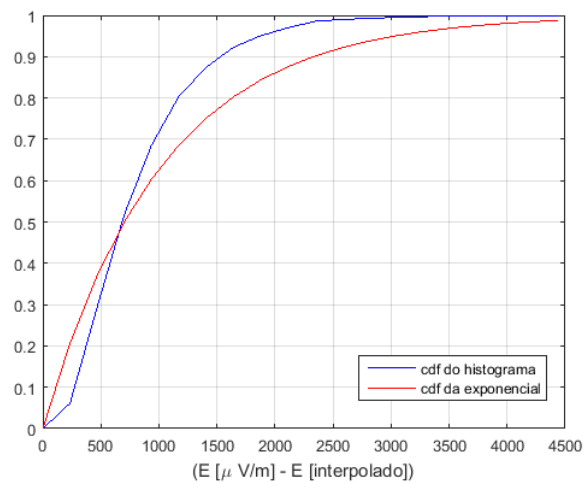
Figura 43 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima análise a ser realizada é a função distribuição cumulativa exponencial. Primeiramente converte-se os valores de campo elétrico para dBm e em seguida normaliza-os. Gera-se o histograma e calcula os valores de média ( $1,0116e+03$ ) e desvio padrão ( $534,3119$ ). A partir da média encontrada do campo elétrico em dbm, calcula-se a função distribuição cumulativa exponencial (`expcdf`). Em sequência gera-se o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em dbm com a `expcdf`, apresentada na figura 44.

Figura 44 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os gráficos das figuras 43 e 44 podemos concluir que os erros interpolados

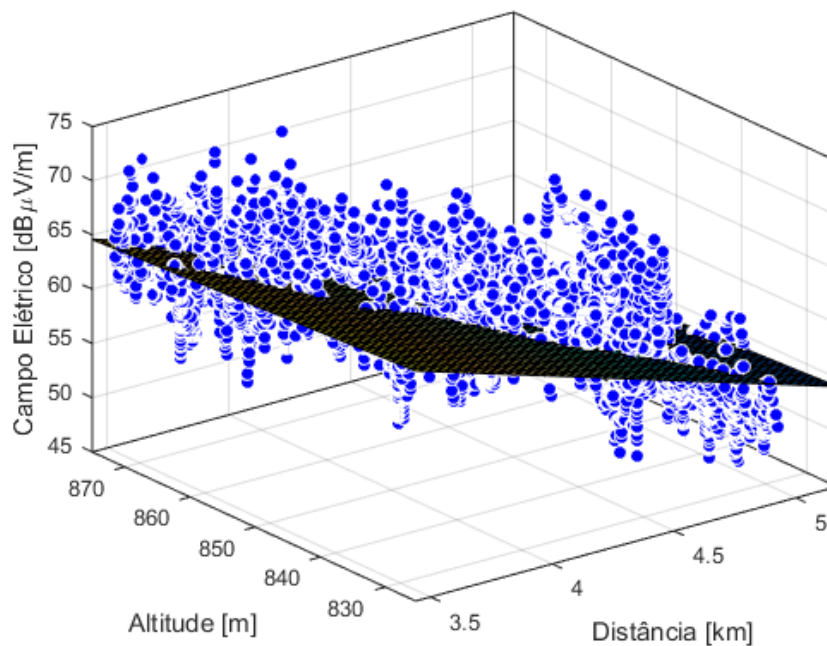
dos campos em:

- 1:  $dB\mu V/m$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa normal.
- 2:  $\mu V/m$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa exponencial.

### 6.1.2 Interpolação bidimensional da região Central

A interpolação do campo bidimensional da região central consiste em seis análises. A primeira análise realizada é a interpolação linear do campo elétrico em uma superfície em relação às variáveis altitude e distância com o campo elétrico medido, representada pela Figura 45.

Figura 45 – Intensidade do campo elétrico em relação a altitude e distância da região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

A superfície gerada é representada pela expressão  $E = 116,9 - 6,922x - 0,03251y$ . Onde  $E$  representa o campo elétrico,  $x$  a distância e  $y$  a altitude. Os coeficientes do polinômio de interpolação com 95% de intervalo de confiança são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Polinômios de interpolação da região Central

p00	p10	p01
116.9	-6.922	-0.03251
(113.9, 119.8)	(-7.008, -6.836)	(-0.0357, -0.02932)

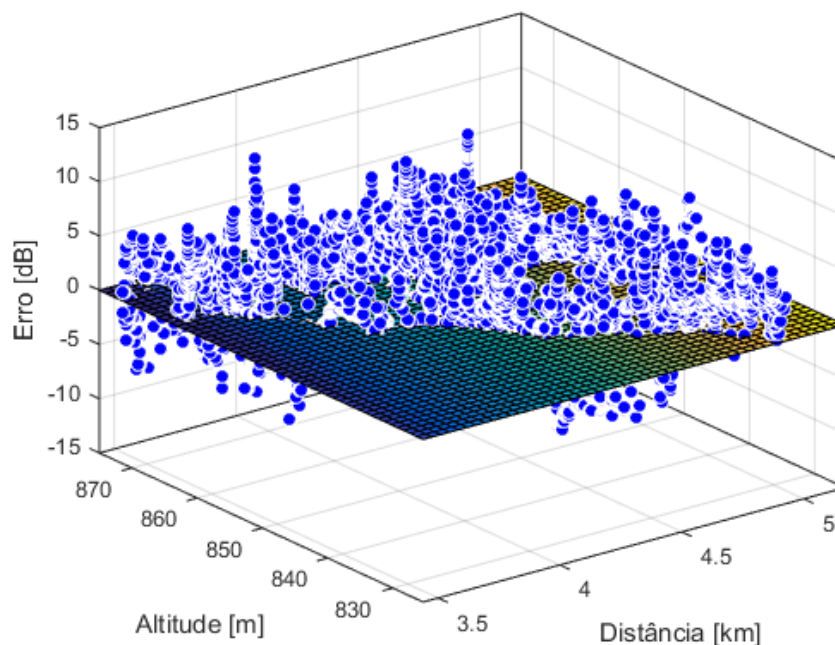
Com os dados (campo elétrico, altitude do terreno e distância do transmissor), realizou-se análises estatísticas para as 73533 amostras da região Central. A tabela 11 apresenta os resultados da análise estatística da região central.

Tabela 11 – Análises estatísticas da região Central

	Campo elétrico	Altitude	Distância
Valor mínimo	46,06	825,34	3,43
Valor máximo	73,76	874,99	5,16
Media	59,05	856,54	4,32
Mediana	58,86	585,16	4,34
Desvio padrão	4,20	10,38	0,38
Variância	17,70	107,76	0,14

A segunda análise tem como o intuito demonstrar o comportamento do erro do campo elétrico em uma superfície com às variáveis altitude e distância. Com isso realiza-se a interpolação da diferença da intensidade de campo elétrico medido em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado. A Figura 46 apresenta o plano de interpolação e a diferença (erro) do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado.

Figura 46 – Intensidade do erro na região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise estatística encontrada para o erro do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado da região central e mostrado na Tabela 12.

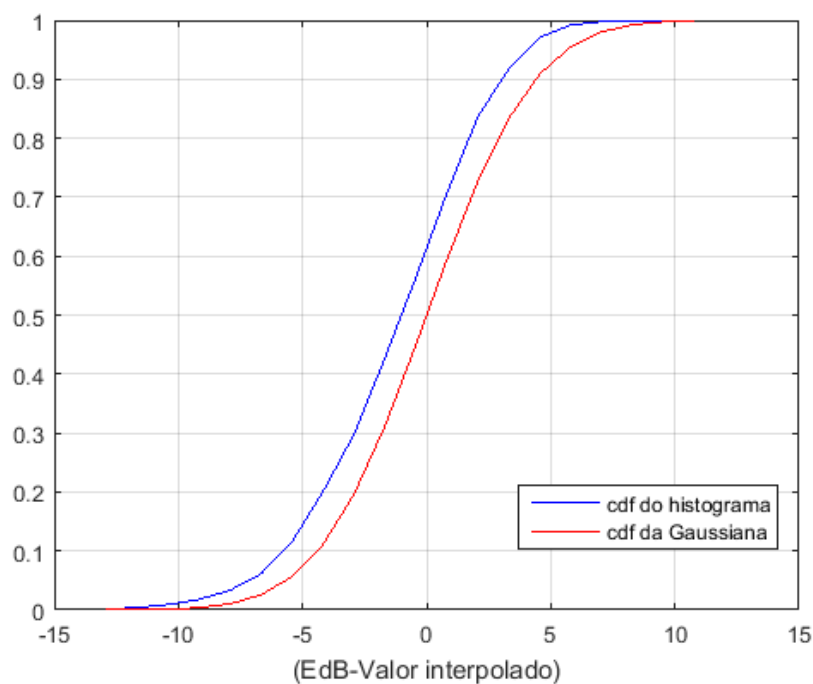
Tabela 12 – Análise estatística do erro da região Central

Media	Desvio padrão	Valor Máximo	Valor Mínimo	Mediana	Variância
-3.8819e-11	3.4174	12.04	-12.89	0.1755	11.6787

As análises subsequentes foram realizadas para a comparação: do erro do campo elétrico com as funções de distribuição gaussiana; função densidade de probabilidade (pdf) normalizada com o histograma do erro; com uma distribuição exponencial e um histograma do erro com a pdf.

A Figura 47 representa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo elétrico em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo elétrico e uma função de distribuição Gaussiana com média de  $-3.8819\text{e-}11$  e desvio padrão de 3.4174.

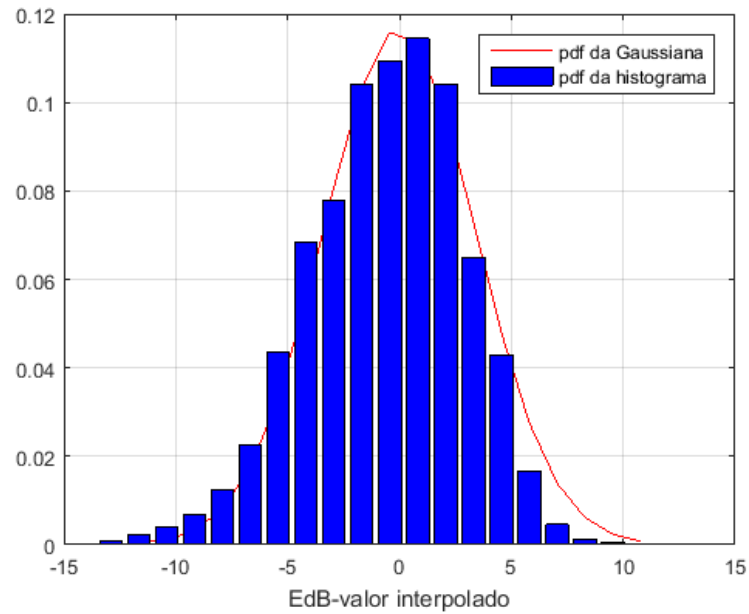
Figura 47 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 48 apresenta a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a Gaussiana com média de  $-3.8819\text{e-}11$  e desvio padrão de 3.4174.

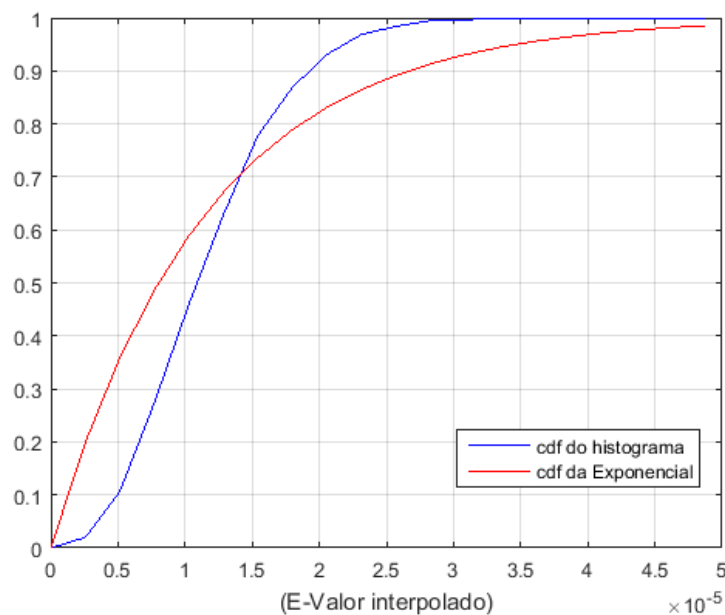
Figura 48 – pdf do histograma de EdB e pdf da gaussiana da região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 49 retrata a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $1.1563\text{e-}05$  e desvio padrão de  $5.5646\text{e-}06$ .

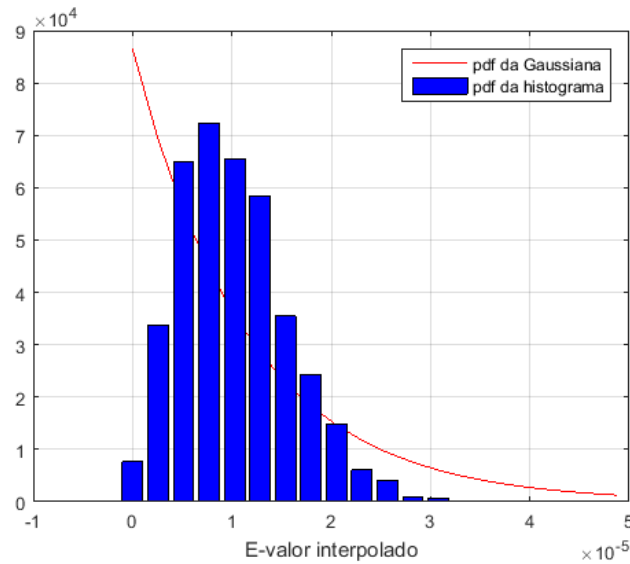
Figura 49 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 50 demonstra a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $1.1563\text{e-}05$  e desvio padrão de  $5.5646\text{e-}06$ .

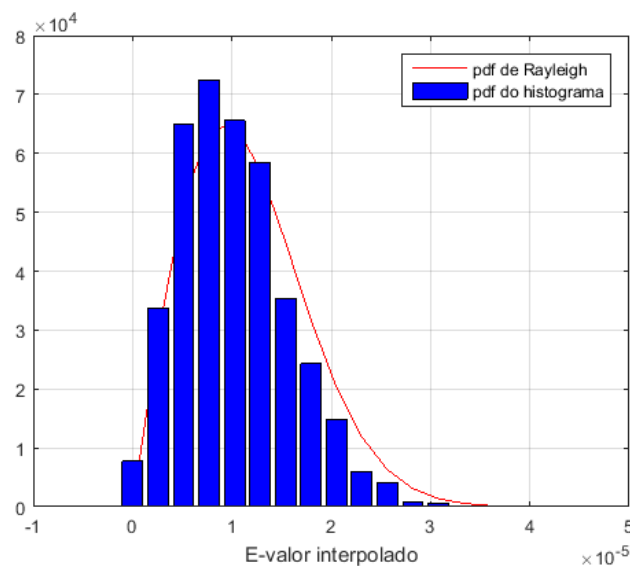
Figura 50 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 51 representa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $1.1563\text{e-}05$  e desvio padrão de  $5.5646\text{e-}06$ .

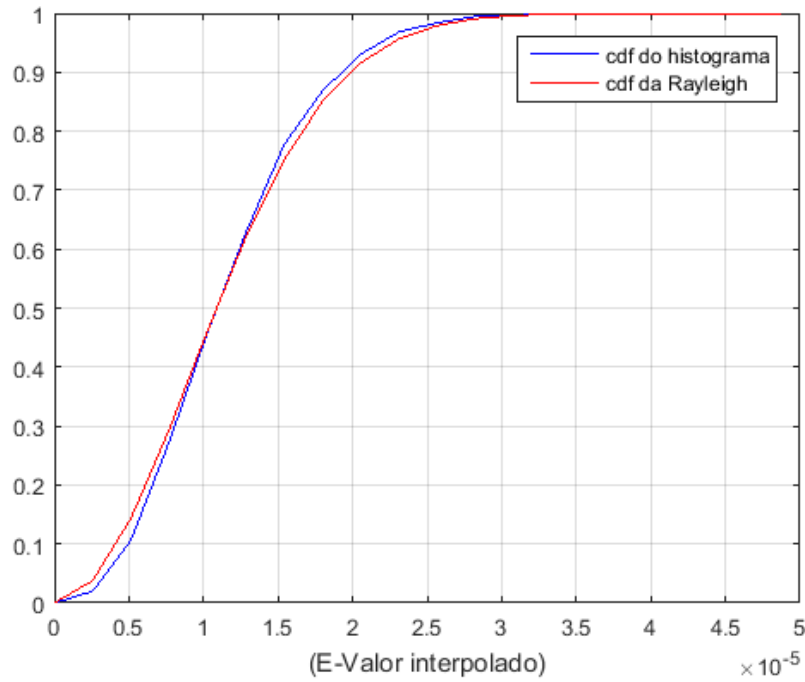
Figura 51 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 52 expressa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $1.1563\text{e-}05$  e desvio padrão de  $5.5646\text{e-}06$ .

Figura 52 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

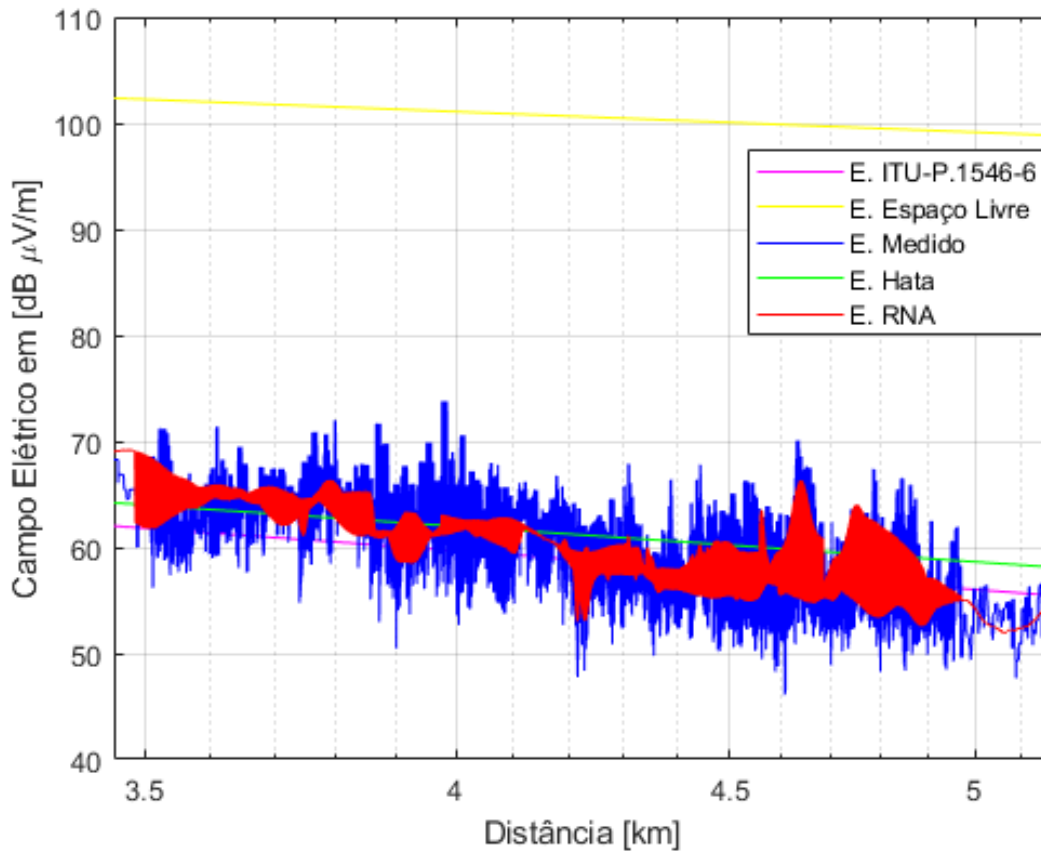
Analisando os gráficos das Figuras 47 até 52 pode-se concluir que os campos elétricos dados em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf Gaussiana.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

### 6.1.3 Comparação dos modelos de propagação da região Central

Com o intuito de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico medido em relação aos modelos de propagação de ondas, na cidade de Uberlândia, calculou-se o campo elétrico nas 73533 amostras da região Central para cada um dos modelos de propagação definidos. A figura 53 mostra o comportamento do sinal UHF (campo medido) em relação aos modelos de propagação espaço livre, Hata, ITU-R P.1546, interpolado e RNA gerada.

Figura 53 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Central



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 13, apresenta os resultados da análise estatística dos modelos de propagação na região central.

Tabela 13 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Central

Modelo	Média	Erro médio	Erro RMS	Desvio Padrão
ITU-R P.1546-6	58,37	-0,6740	4,32	3,11
Espaço Livre	100,29	41,2421	41,60	3,89
Hata	60,77	1,7255	4,67	3,20
RNA	59,0555	0,0025	3,72	2,88

Nota-se pela a Figura 53 que visualmente o modelo que mais se comportou com o sinal medido do campo elétrico foi a RNA. E pela a Tabela 13 o modelo que apresentou o menor erro RMS foi a RNA.



## 6.2 Região Roosevelt

A Região Roosevelt é demonstrada na figura 54, essa região é composta por 33000 pontos de medição. A região Roosevelt é composta por casas residenciais e alguns poucos prédios de 3 a 10 pavimentos, espalhados pela a região. Sua arborização é de densidade intermediária e a altitude média do relevo é de 867 m.

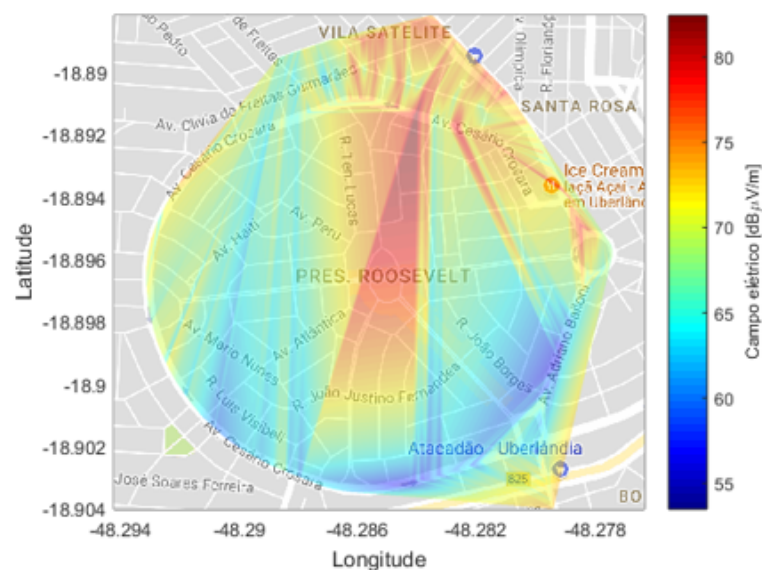
Figura 54 – Região Roosevelt



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a medição do campo elétrico no percurso da figura 54, o próximo passo a ser realizado é gerar uma mancha da intensidade do sinal do campo elétrico na região. A figura 55 representa a mancha da intensidade do campo elétrico na região Roosevelt.

Figura 55 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Roosevelt



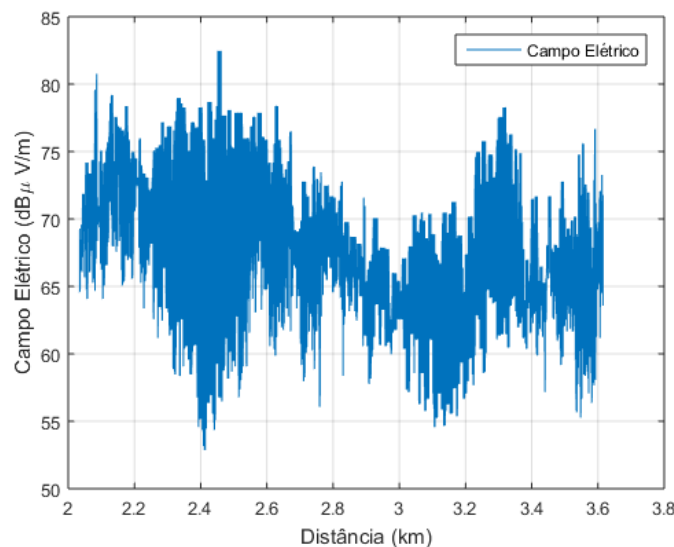
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na mancha da intensidade do sinal elétrico na figura 55 a predominância da cor cian, de acordo com a legenda do colobar dessa região a faixa de frequência que representa a cor cian é de aproximadamente 63 a 68 dB $\mu$ V/m, onde obtém uma média da intensidade do campo elétrico de 68,80 dB $\mu$ V/m e constata-se que o campo elétrico máximo e mínimo são 82,46 e 52,86 dB $\mu$ V/m, respectivamente.

Na sequência as 33000 amostras são submetidas ao teste de normalidade *Kolmogorov-Smirnov*, a fim de verificar se as amostras resultam de uma distribuição normal. O teste de normalidade para a região Roosevelt apresentou que as amostras não provém de uma distribuição normal.

As 33000 amostras de campo elétrico da região Roosevelt em relação a distância do transmissor são plotadas, conforme apresentado pela a figura 56.

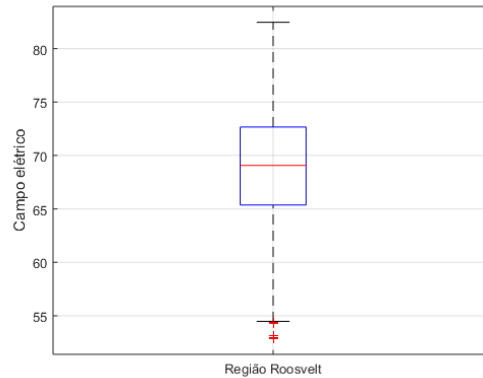
Figura 56 – Campo elétrico da região Roosevelt



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observar-se que na figura 56, apresenta o comportamento da intensidade do sinal ao longo do percurso da região Roosevelt das 33000 amostras. Essas amostras estão a uma faixa de 2,03 a 3,61 km do transmissor. Para retratar a variação do campo elétrico utiliza-se a ferramenta gráfica boxplot, que representa a alteração do campo elétrico por meio de quartis, conforme demonstrado pela a Figura 57.

Figura 57 – Boxplot da região Roosevelt



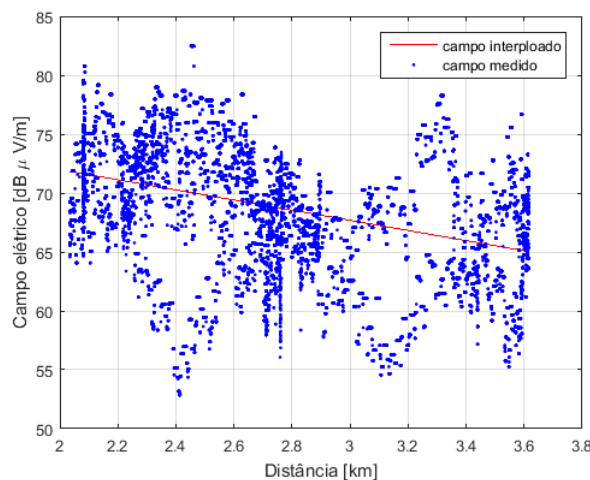
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na figura 57, apresenta o gráfico boxplot do campo elétrico da região Roosevelt. O qual apresenta 45 outliers (medidas discrepantes), o limite superior de  $82,4679 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , e o Terceiro quartil Q3 (75%)  $72,6679$ , segundo quartil Q2 (mediana)  $69,0679$ , primeiro quartil Q1 (25%)  $65,3679$  e limite inferior  $54,4679$ .

### 6.2.1 Interpolação linear da região Roosevelt

Na interpolação linear são realizadas três análises. A primeira análise é a geração de um modelo de regressão linear polinomial. Com o intuito de conceber um modelo de regressão linear polinomial das 33000 amostras coletadas, ordenou-se as amostras em ordem crescente de acordo com a distância e através da regressão linear encontrou-se o polinômio de grau 1. O qual é representado na figura 58 por uma reta em vermelho. A equação dessa reta da figura 58 e expressa por  $y = -4,3x + 86,59$

Figura 58 – Regressão linear polinomial do campo elétrico da região Roosevelt

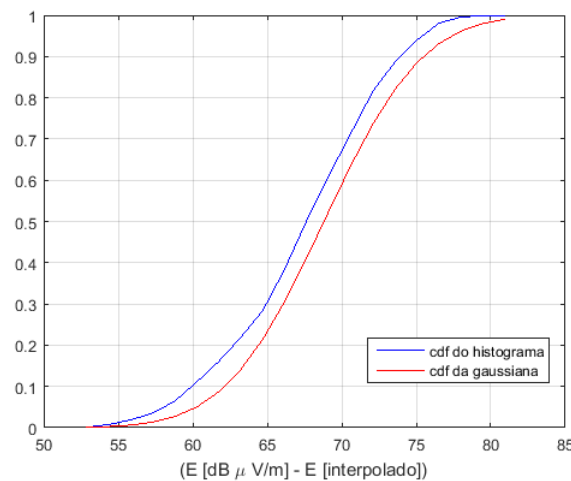


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência calcula-se a diferença das amostras de campo elétrico medido com o polinômio gerado da região Roosevelt em cada ponto do espaço amostral. E analisa-se o comportamento do erro interpolado com as funções distribuição de probabilidade cdf e exponencial.

Na distribuição cdf, com os erros calculados, gera-se um histograma normalizado desses erros e calcula-se a soma cumulativa. Na sequência, com a média (68,8069) e o desvio padrão (5,1907) dos erros da intensidade de campo elétrico, calcula-se a função distribuição cumulativa normal (cdf). Com os valores calculados, o próximo passo é produzir o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico com a cdf normalizada do erro, apresentado na figura 59.

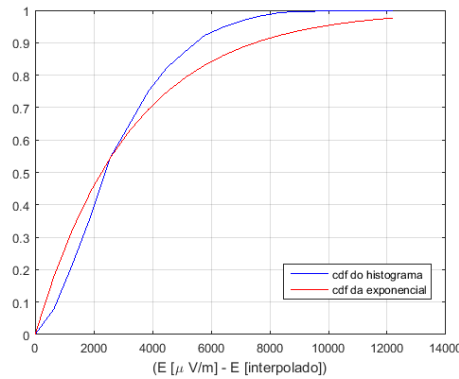
Figura 59 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Roosevelt



Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima análise a ser realizada é a função distribuição cumulativa exponencial. Primeiramente converte os valores de campo elétrico para dBm e em seguida normaliza-os. Gera-se o histograma e calcula os valores de média ( $3,2550e+03$ ) e desvio padrão ( $1,8522e+03$ ). A partir da média encontrada do campo elétrico em dbm, calcula-se a função distribuição cumulativa exponencial (expcdf). Em sequência gera-se o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em dbm com a expcdf, apresentada na figura 60.

Figura 60 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Roosevelt



Fonte: Elaborada pelo autor.

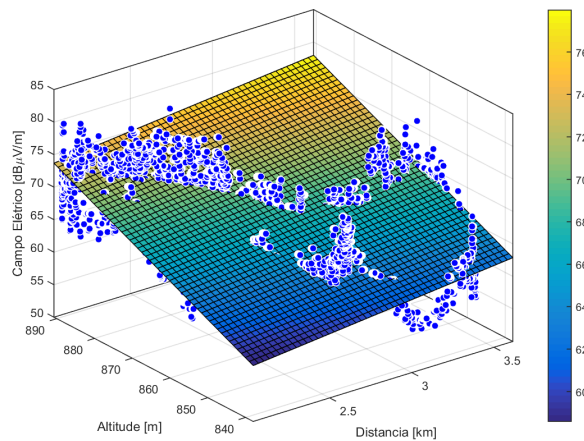
Analisando os gráficos das figuras 59 e 60 podemos concluir que os erros interpolados dos campos em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V/m}$  se ajustam a uma pdf Gaussiana.
- 2:  $\mu\text{V/m}$  se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

### 6.2.2 Interpolação bidimensional da região Roosevelt

A interpolação do campo bidimensional da região Roosevelt consiste em seis análises. A primeira análise realizada é a interpolação linear do campo elétrico em uma superfície em relação às variáveis altitude e distância com o campo elétrico medido, representada pela Figura 61.

Figura 61 – Intensidade do campo elétrico em relação altitude e distância da região Roosevelt



Fonte: Elaborada pelo autor.

A superfície gerada é representada pela expressão  $E = -186,6 + 2,713 x + 0,286 y$ . Onde  $E$  representa o campo elétrico,  $x$  a distância e  $y$  a altitude. Os coeficientes do polinômio de interpolação com 95% de intervalo de confiança são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Polinômios de interpolação da região Roosevelt

p00	p10	p01
-186.6	2.713	0.286
(-190.7, -182.5)	(2.575, 2.851)	0.2816, 0.2904)

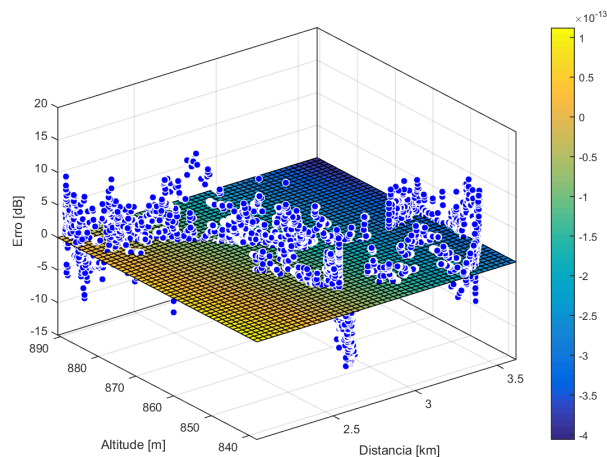
Com os dados (campo elétrico, altitude do terreno e distância do transmissor), realizou-se análises estatísticas para as 33000 amostras da região Roosevelt. A tabela 15 apresenta os resultados da análise estatística da região Roosevelt.

Tabela 15 – Análises estatísticas da região Roosevelt

Análise estatística	Campo elétrico	Altitude	Distância
Valor mínimo	52,86	837,97	2,03
Valor máximo	82,46	890,73	3,61
Media	68,80	867	2,73
Mediana	69,06	867,36	2,67
Desvio padrão	5,19	15,29	0,48
Variância	26,94	233,96	0,23

A segunda análise tem como o intuito demonstrar o comportamento do erro do campo elétrico em uma superfície com as variáveis altitude e distância. Com isso realiza-se a interpolação da diferença da intensidade de campo elétrico medido em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado. A Figura 62 apresenta o plano de interpolação e a diferença (erro) do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado.

Figura 62 – Intensidade do erro na região Roosevelt



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise estatística encontrada para o erro do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado e mostrado na Tabela 16.

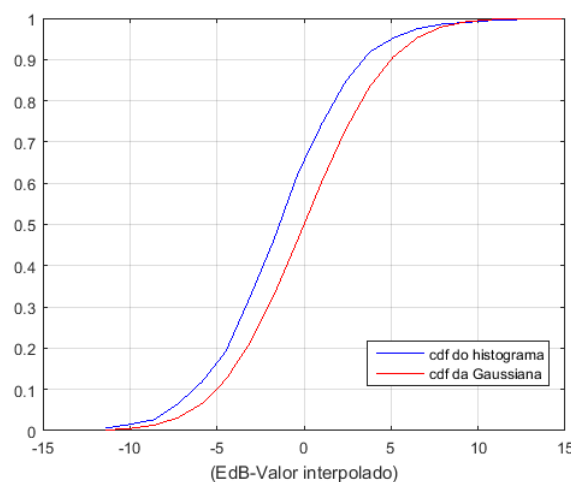
Tabela 16 – Análise estatística do erro da região Roosevelt

Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Medio	Mediana	Desvio Padrão	variância
-11,35	16,13	-1,2987e-13	-0,0671	3,88	15,11

As análises subsequentes foram realizadas para a comparação: do erro do campo elétrico com as funções de distribuição gaussiana; função densidade de probabilidade (pdf) normalizada com o histograma do erro; com uma distribuição exponencial e um histograma do erro com a pdf.

A Figura 63 representa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo elétrico em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo elétrico e a Gaussiana com o média de  $-1.2987\text{e-}13$  e desvio padrão de 3.8873.

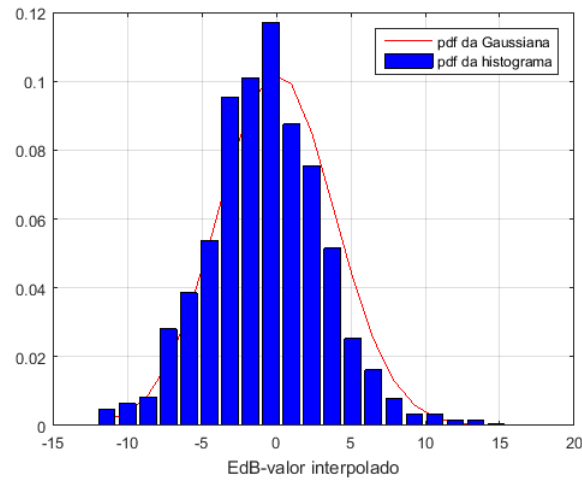
Figura 63 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Roosevelt



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 64 apresenta a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a Gaussiana com média de  $-1.2987\text{e-}13$  e desvio padrão de 3.8873.

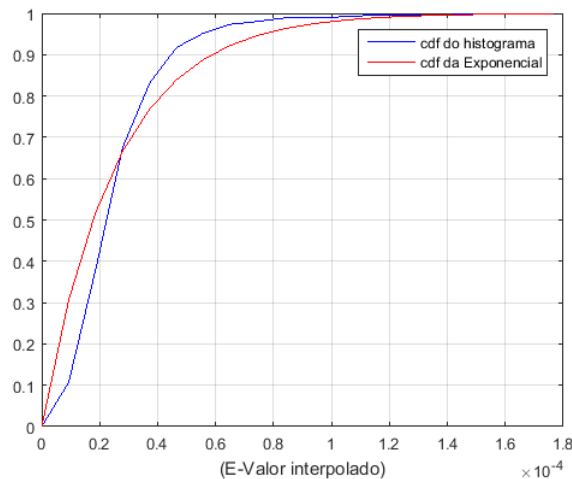
Figura 64 – pdf do histograma de EdB e pdf da gaussiana da região Roosevelt



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 65 retrata a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $2.5449\text{e-}05$  e desvio padrão  $1.7520\text{e-}05$ .

Figura 65 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Roosevelt

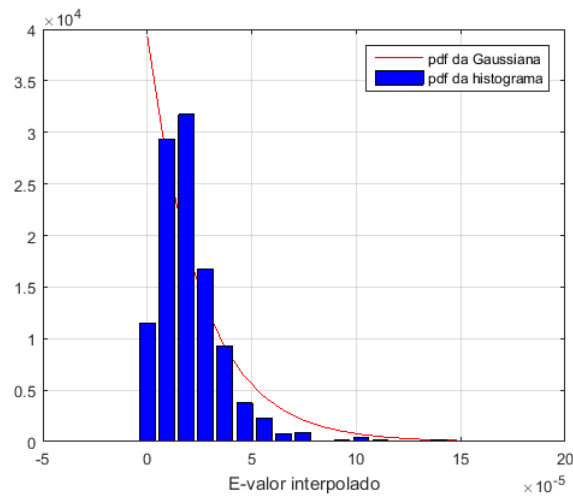


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 66 demonstra a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $2.5449\text{e-}05$  e desvio padrão de  $1.7520\text{e-}05$ .



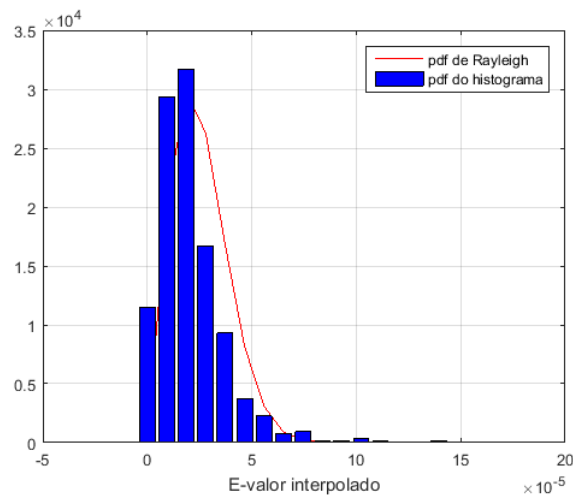
Figura 66 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Roosevelt



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 67 representa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V/m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $2.5449\text{e-}05$  e desvio padrão de  $1.7520\text{e-}05$ .

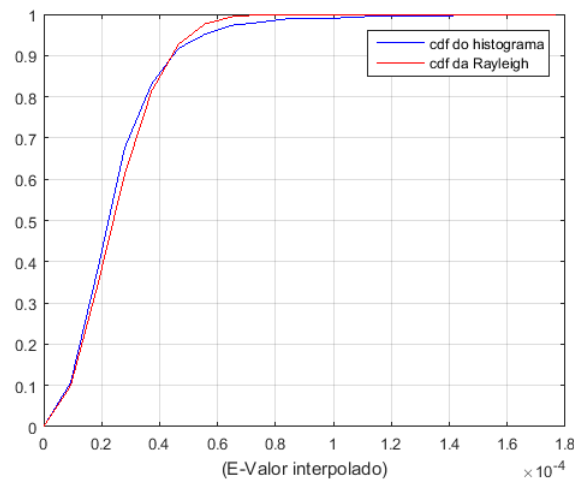
Figura 67 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Roosevelt



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 68 expressa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V/m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $2.5449\text{e-}05$  e desvio padrão de  $1.7520\text{e-}05$ .

Figura 68 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Roosevelt



Fonte: Elaborada pelo autor.

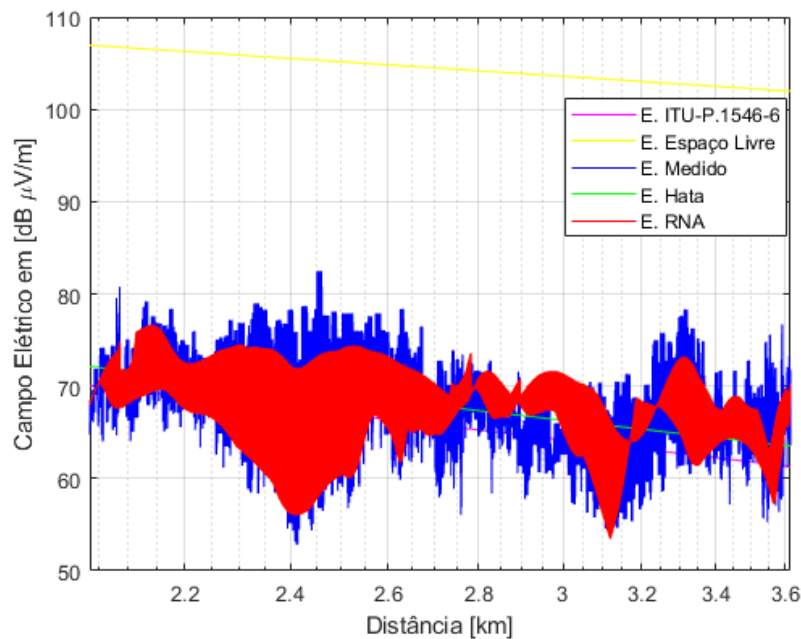
Analisando os gráficos das Figuras 63 até 68 pode-se concluir que os campos elétricos dados em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf Gaussiana.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

### 6.2.3 Comparação dos modelos de propagação da região Roosevelt

Com o intuito de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico medido em relação aos modelos de propagação de ondas, na cidade de Uberlândia, calculou-se o campo elétrico nas 33000 amostras da região Roosevelt para cada um dos modelos de propagação definidos. A figura 69 mostra o comportamento do sinal UHF (campo medido) em relação aos modelos de propagação espaço livre, Hata, ITU-R P.1546, interpolado e RNA gerada.

Figura 69 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Roosevelt



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 17, apresenta os resultados da análise estatística dos modelos de propagação na região Roosevelt.

Tabela 17 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Roosevelt

Modelo	Média	Erro médio	Erro RMS	Desvio Padrão
ITU-R P.1546-6	65,59	-3,21	6,73	4,70
Espaço Livre	104,18	35,37	36,13	5,07
Hata	67,69	-1,11	6,08	4,5
RNA	68,71	-0,09	4,75	4,04

Nota-se pela a Figura 69 que visualmente os modelos que mais se comportou com o sinal medido do campo elétrico foi a RNA e ITU-R P.1546. E pela a Tabela 17 o modelo que apresentou o menor erro RMS foi a RNA.

## 6.3 Região Brasil

A Região Brasil é demonstrada na figura 70, sendo composta por 25000 pontos de medição. A região Brasil é composta por casas residenciais e alguns prédios de 3 a 10 pavimentos espalhados pela a região. Sua arborização é de densidade média e altitude média do terreno de 883,43 m.

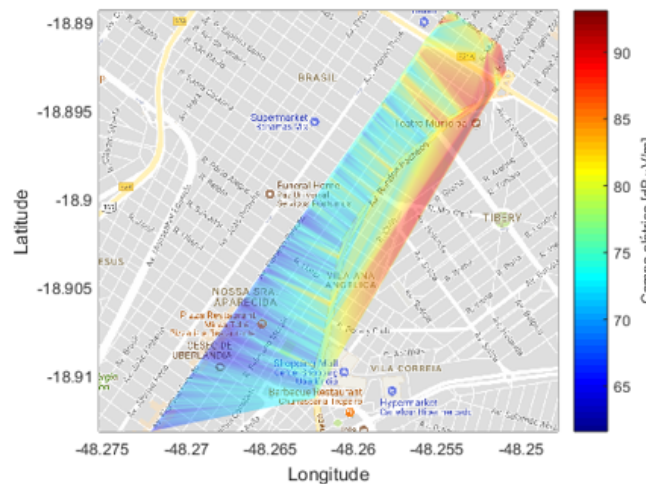
Figura 70 – Região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a medição do campo elétrico no percurso da figura 70, o próximo passo a ser realizado é gerar uma mancha da intensidade do sinal do campo elétrico na região. A figura 71 representa a mancha da intensidade do campo elétrico na região Brasil.

Figura 71 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

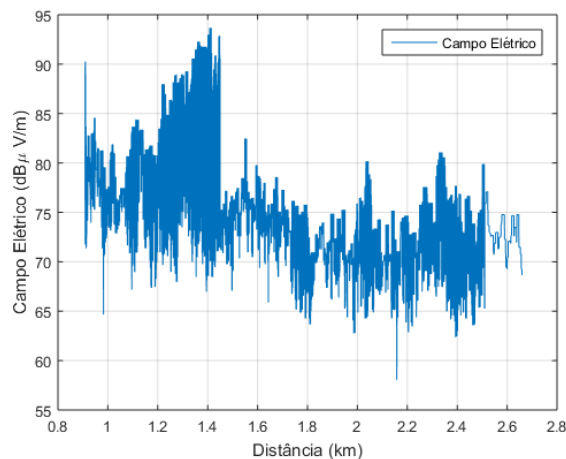
Nota-se na mancha da intensidade do sinal elétrico na figura 71 a predominância da cor cian, de acordo com a legenda do colobar dessa região a faixa de frequência que representa a cor cian é de 71 a 78 dBμV/m, onde obtém uma média da intensidade do campo elétrico de 75,84 dBμV/m e constata-se que o campo elétrico máximo e mínimo são 93,66 e 58,06 dBμV/m, respectivamente.

Na sequência as 25000 amostras são submetidas ao teste de normalidade *Kolmogov-Smirnov* A fim de verificar se as amostras resultam de uma distribuição normal. O teste

de normalidade para a região Brasil apresentou que as amostras não provém de uma distribuição normal.

As 25000 amostras de campo elétrico da região Brasil em relação a distância do transmissor são plotadas, conforme apresentado pela a figura 72.

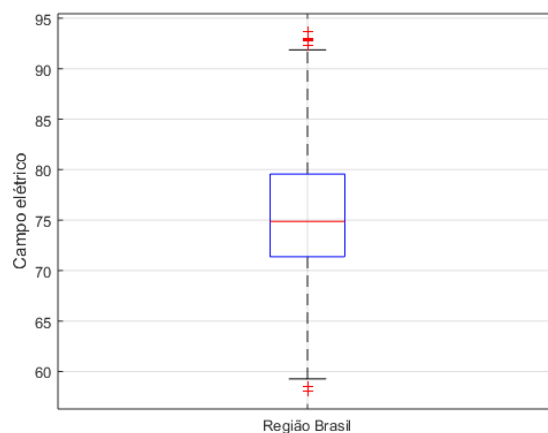
Figura 72 – Campo elétrico da região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observar-se que na figura 72, apresenta o comportamento da intensidade do sinal ao longo do percurso da região central das 25000 amostras. Essas amostras estão a uma faixa de 0,90 a 2,66 km do transmissor. Para retratar a variação do campo elétrico utiliza-se a ferramenta gráfica boxplot, que representa a alteração do campo elétrico por meio de quartis

Figura 73 – Boxplot da região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

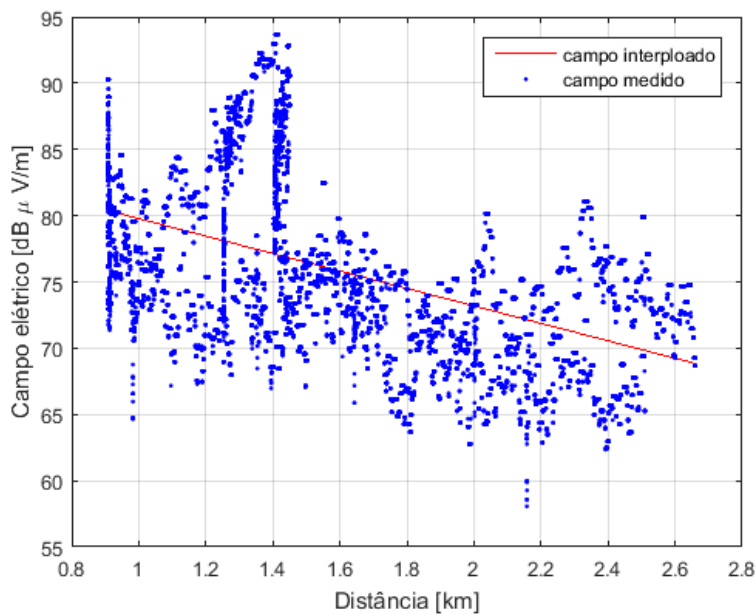
Nota-se na figura 73, apresenta o gráfico boxplot do campo elétrico da região Brasil. O

qual apresenta 211 outliers (medidas discrepantes), o limite superior de  $91,8679 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , e o Terceiro quartil Q3 (75%)  $79,5679$ , segundo quartil Q2 (mediana)  $74,8679$ , primeiro quartil Q1 (25%)  $71,3679$  e limite inferior  $59,2679$ .

### 6.3.1 Interpolação linear da região Brasil

Na interpolação linear são realizadas três análises. A primeira análise é a geração de um modelo de regressão linear polinomial. Com o intuito de conceber um modelo de regressão linear polinomial das 25000 amostras coletadas, ordenou-se as amostras em ordem crescente de acordo com a distância e através da regressão linear encontrou-se o polinômio de grau 1. O qual é representado na figura 74 por uma reta em vermelho. A equação dessa reta da figura 74 e expressa por  $y = -6,5868x + 86,3613$ .

Figura 74 – Regressão linear polinomial do campo elétrico da região Brasil

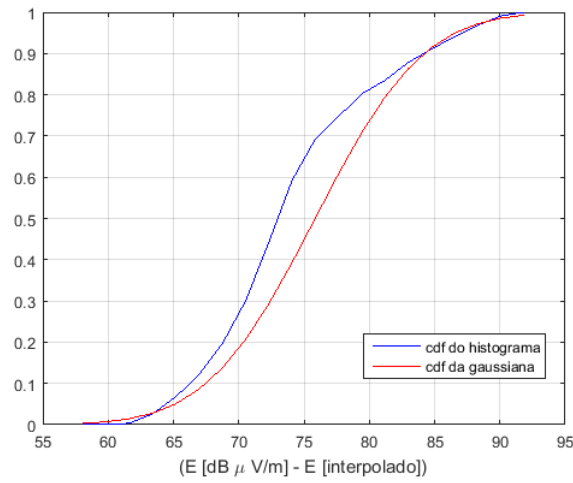


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência calcula-se a diferença das amostras de campo elétrico medido com o polinômio gerado da região em cada ponto do espaço amostral. E analisa-se o comportamento do erro interpolado com as funções distribuição de probabilidade cdf e exponencial.

Na distribuição cdf normalizada, com os erros calculados, gera-se um histograma normalizado desses erros e calcula-se a soma cumulativa. Na sequência, com a média ( $75,8487$ ) e o desvio padrão ( $6,5098$ ) dos erros da intensidade de campo elétrico, calcula-se a função distribuição cumulativa normal (cdf). Com os valores calculados, o próximo passo é produzir o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico com a cdf normalizada do erro, apresentado na figura 75.

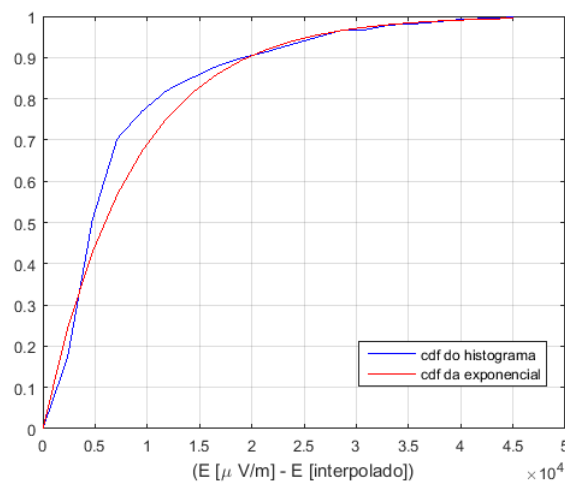
Figura 75 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima análise a ser realizada é a função distribuição cumulativa exponencial. Primeiramente converte os valores de campo elétrico para dBm e em seguida normaliza-os. Gera-se o histograma e calcula os valores de média ( $8,4937e+03$ ) e desvio padrão ( $8,0787e+03$ ). A partir da média encontrada do campo elétrico em dbm, calcula-se a função distribuição cumulativa exponencial (`expcdf`). Em sequência gera-se o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em dbm com a `expcdf`, apresentada na figura 76.

Figura 76 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os gráficos das figuras 75 e 76 podemos concluir que os erros interpolados

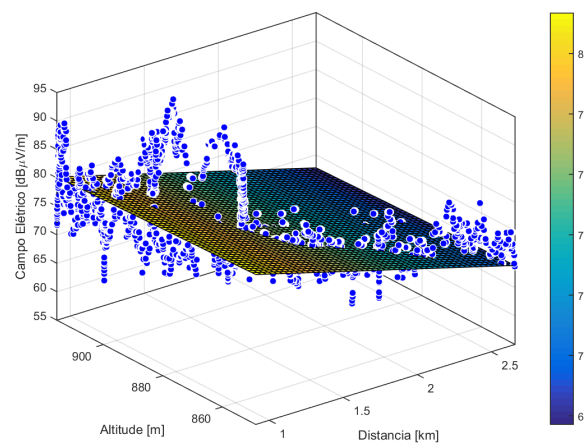
dos campos em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa normal.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa exponencial.

### 6.3.2 Interpolação bidimensional da região Brasil

A interpolação do campo bidimensional da região Brasil consiste em seis análises. A primeira análise realizada é a interpolação linear do campo elétrico em uma superfície em relação às variáveis altitude e distância com o campo elétrico medido, representada pela Figura 77.

Figura 77 – Intensidade do campo elétrico em relação a altitude e distância da região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

A superfície gerada é representada pela expressão  $E = 102,6 - 7,112x - 0,01744y$ . Onde  $E$  representa o campo elétrico,  $x$  a distância e  $y$  a altitude. Os coeficientes do polinômio de interpolação com 95% de intervalo de confiança são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Polinômios de interpolação da região Brasil

p00	p10	p01
102.6	-7.112	-0.01744
(95.81, 109.4)	(-7.376, -6.848)	(-0.02473, -0.01015)

Com os dados (campo elétrico, altitude do terreno e distância do transmissor), realizou-se análises estatísticas para as 25000 amostras. A tabela 19 apresenta os resultados da região Brasil.

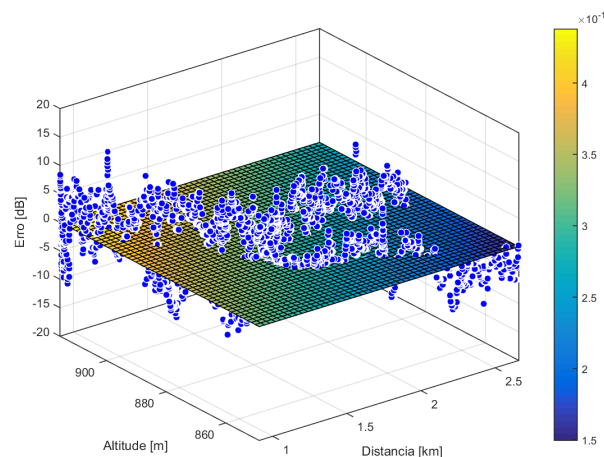


Tabela 19 – Análises estatísticas da região Brasil

Análise estatística	Campo elétrico	Altitude	Distância
Valor mínimo	58,06	848,77	0,90
Valor máximo	93,66	915,61	2,66
Media	75,84	883,43	1,59
Mediana	74,86	879,85	1,45
Desvio padrão	17,39	6,50	0,48
Variância	42,37	302,41	0,23

A segunda análise tem como o intuito demonstrar o comportamento do erro do campo elétrico em uma superfície com às variáveis altitude e distância. Com isso realiza-se uma interpolação da diferença da intensidade de campo elétrico medido em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e com o valor interpolado. A Figura 78 apresenta o plano de interpolação e a diferença (erro) do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado.

Figura 78 – Intensidade do erro na região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise estatística encontrada para o erro do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado da região Brasil e mostrado na Tabela 20.

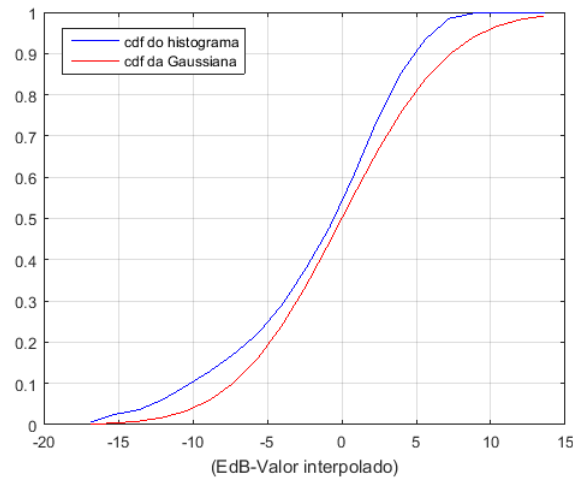
Tabela 20 – Análise estatística do erro da região Brasil

Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Medio	Mediana	Desvio Padrão	variância
-16,83	15,19	3,1542e-13	1,1103	5,68	32,34

As análises subsequentes foram realizadas para a comparação: do erro do campo elétrico com as funções de distribuição gaussiana; função densidade de probabilidade (pdf) normalizada com o histograma do erro; com uma distribuição exponencial e um histograma do erro com a pdf.

A Figura 79 representa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo elétrico em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo elétrico e a Gaussiana com o média de  $3.1542\text{e-}13$  e desvio padrão de  $5.6874$ .

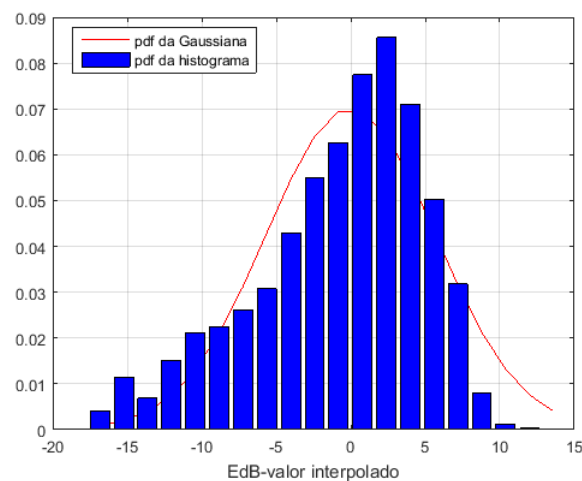
Figura 79 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 80 apresenta a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a Gaussiana com média de  $3.1542\text{e-}13$  e desvio padrão de  $5.6874$ .

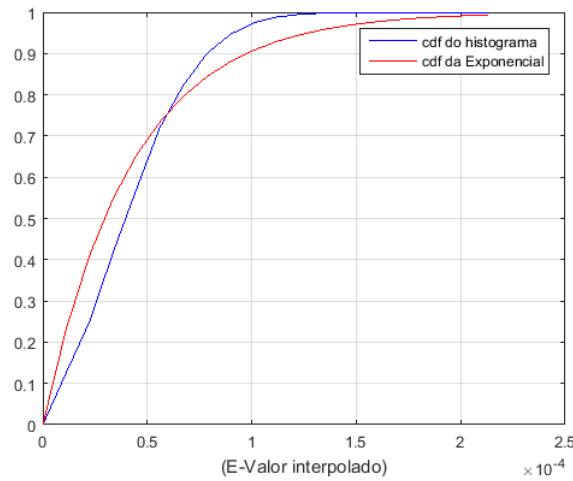
Figura 80 – pdf do histograma de EdB e pdf da gaussiana da região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 81 retrata a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $4.2277\text{e-}05$  e desvio padrão de  $2.6530\text{e-}05$ .

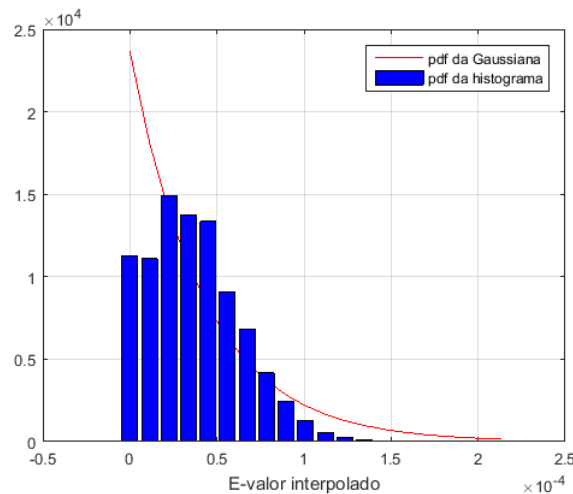
Figura 81 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 82 demonstra a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $4.2277\text{e-}05$  e desvio padrão de  $2.6530\text{e-}05$ .

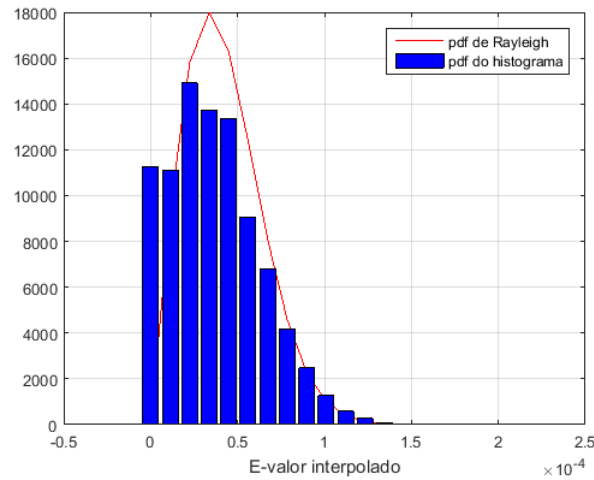
Figura 82 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 83 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $4.2277\text{e-}05$  e desvio padrão de  $2.6530\text{e-}05$ .

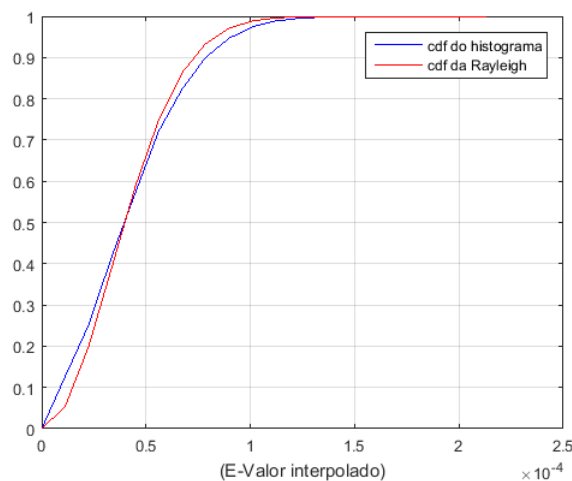
Figura 83 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 84 representa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $4.2277\text{e-}05$  e desvio padrão de  $2.6530\text{e-}05$ .

Figura 84 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

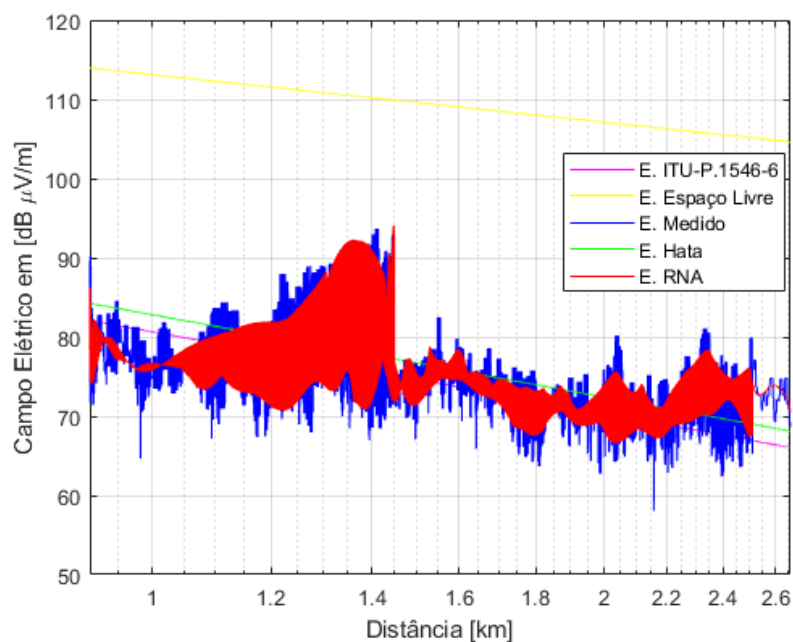
Analisando os gráficos das Figuras 79 até 84 pode-se concluir que os campos elétricos dados em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf Gaussiana.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

### 6.3.3 Comparação dos modelos de propagação da região Brasil

Com o intuito de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico medido em relação aos modelos de propagação de ondas, na cidade de Uberlândia, calculou-se o campo elétrico nas 25000 amostras da região Brasil para cada um dos modelos de propagação definidos. A figura 85 mostra o comportamento do sinal UHF (campo medido) em relação aos modelos de propagação espaço livre, Hata, ITU-R P.1546, interpolado e RNA gerada.

Figura 85 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Brasil



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 21, apresenta os resultados da análise estatística dos modelos de propagação na região Brasil.

Tabela 21 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Brasil

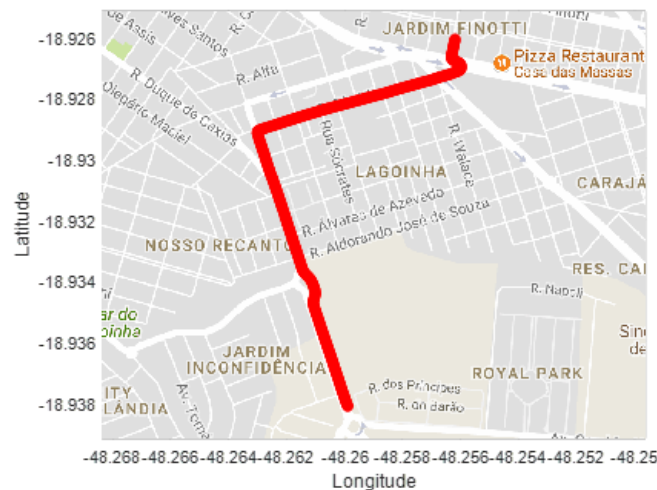
Modelo	Média	Erro médio	Erro RMS	Desvio Padrão
ITU-R P.1546-6	74,04	-1,80	8,12	6,35
Espaço Livre	109	33,15	34,46	6,60
Hata	76,13	0,2865	8,01	6,12
RNA	75,68	-0,1636	6,05	5,52

Nota-se pela a figura 85 que visualmente o modelo que mais se comportou com o sinal medido do campo elétrico foi RNA. E pela a Tabela 21 o modelo que apresentou o menor erro RMS foi RMS.

## 6.4 Região Lagoinha

A Região Lagoinha é demonstrada na figura 86, sendo composta por 9000 pontos de medição. Constatou-se que nessa região é composta por casas residenciais e alguns lotes vagos espalhados pela a região. Sua arborização é de densidade baixa e a altitude do terreno média de 864,19 m.

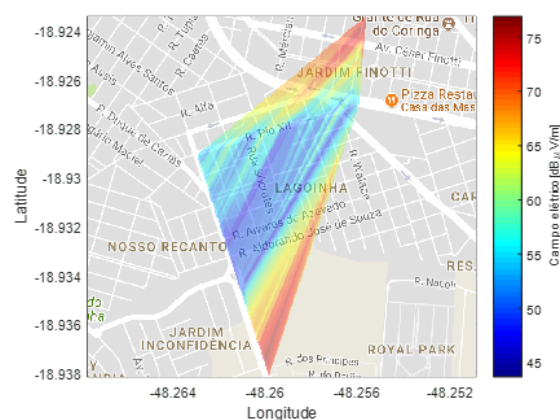
Figura 86 – Região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a medição do campo elétrico no percurso da figura 86, o próximo passo a ser realizado é gerar uma mancha da intensidade do sinal do campo elétrico na região. A figura 87 representa a mancha da intensidade do campo elétrico na região lagoinha.

Figura 87 – Mancha da intensidade do campo elétrico da região Lagoinha



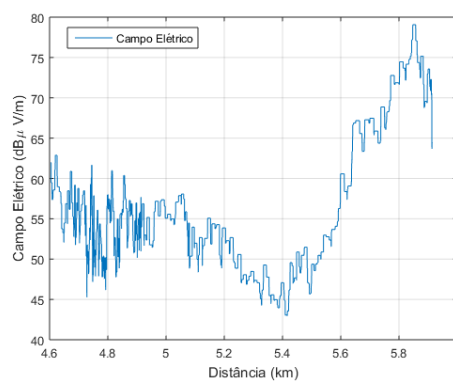
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na mancha da intensidade do sinal elétrico na figura 87 a predominância da cor cian, de acordo com a legenda do colobar dessa região a faixa de frequência que representa

a cor cian é de 52 a 60 dB $\mu$ V/m, onde obtém uma média da intensidade do campo elétrico de 66,82 dB $\mu$ V/m e constata-se que o campo elétrico máximo e mínimo são 79,06 e 42,96 dB $\mu$ V/m, respectivamente.

Na sequência as 9000 amostras são submetidas ao teste de normalidade *Kolmogorov-Smirnov* A fim de verificar se as amostras resultam de uma distribuição normal. O teste de normalidade para a região Lagoinha apresentou que as amostras não provém de uma distribuição normal. As 9000 amostras de campo elétrico da região Lagoinha em relação a distância do transmissor são plotadas, conforme apresentado pela a figura 88.

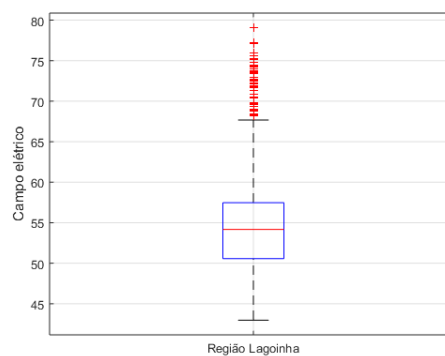
Figura 88 – Campo elétrico da região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observar-se que na figura 88, apresenta o comportamento da intensidade do sinal ao longo do percurso da região lagoinha das 9000 amostras. Essas amostras estão a uma faixa de 4,60 a 5,91 km do transmissor. Para retratar a variação do campo elétrico utiliza-se a ferramenta gráfica boxplot, que representa a alteração do campo elétrico por meio de quartis.

Figura 89 – Boxplot da região Lagoinha



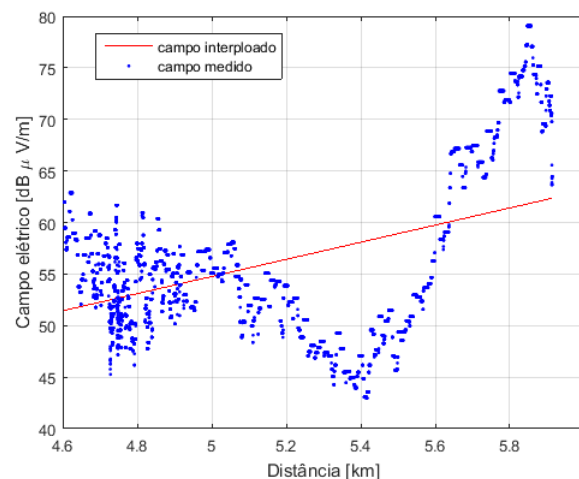
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na figura 89, apresenta o gráfico boxplot do campo elétrico da região central. O qual apresenta 789 outliers (medidas discrepantes), o limite superior de  $67,6679 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , e o Terceiro quartil Q3 (75%)  $54,4679$ , segundo quartil Q2 (mediana)  $54,1679$ , primeiro quartil Q1 (25%)  $50,5679$  e limite inferior  $42,9679$ .

### 6.4.1 Interpolação linear da região Lagoinha

Na interpolação linear são realizadas três análises. A primeira análise é a geração de um modelo de regressão linear polinomial. Com o intuito de conceber um modelo de regressão linear polinomial das 9000 amostras coletadas, ordenou-se as amostras em ordem crescente de acordo com a distância e através da regressão linear encontrou-se o polinômio de grau 1. O qual é representado na figura 90 por uma reta em vermelho. A equação dessa reta da figura 90 e expressa por  $y=8,31x+13,2103$ .

Figura 90 – Regressão linear polinomial do campo elétrico na região Lagoinha



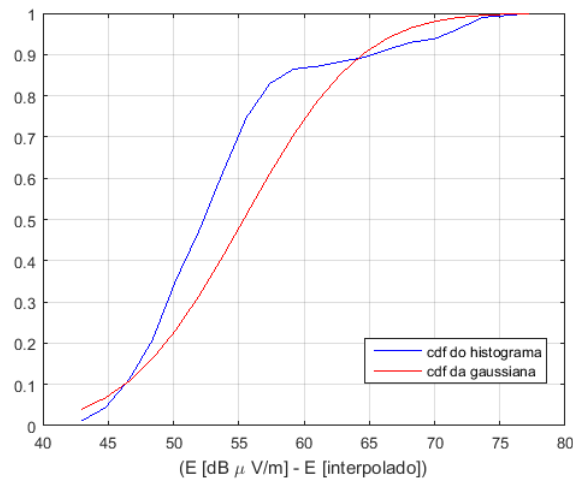
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência calcula-se a diferença das amostras de campo elétrico medido com o polinômio gerado da região lagoinha em cada ponto do espaço amostral. Assim encontra-se o erro em cada amostra e analisa o comportamento do erro interpolado com as funções distribuição de probabilidade cdf e exponencial.

Na distribuição cdf normalizada, com os erros calculados, gera-se um histograma normalizado desses erros e calcula-se a soma cumulativa. Na sequência, com a média ( $55,3811$ ) e o desvio padrão ( $7,09$ ) dos erros da intensidade de campo elétrico, calcula-se a função distribuição cumulativa normal (cdf). Com os valores calculados, o próximo passo é produzir o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico com a cdf normalizada do erro, apresentado na figura 91.



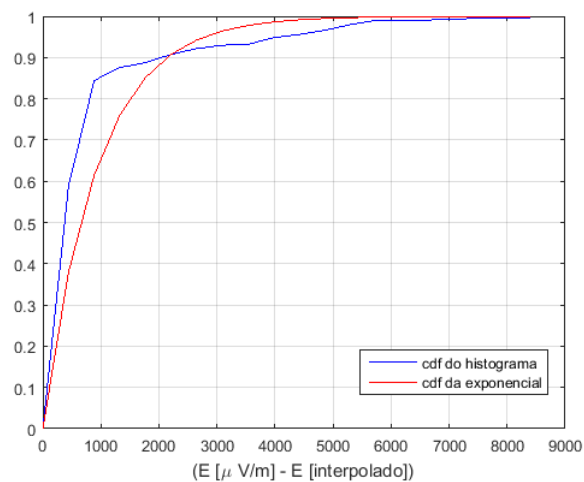
Figura 91 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima análise a ser realizada é a função distribuição cumulativa exponencial. Primeiramente converte os valores de campo elétrico para dBm e em seguida normaliza-os. Gera-se o histograma e calcula os valores de média (927,9554) e desvio padrão ( $1,3035e+03$ ). A partir da média encontrada do campo elétrico em dbm, calcula-se a função distribuição cumulativa exponencial (`expcdf`). Em sequência gera-se o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em dbm com a `expcdf`, apresentada na figura 92.

Figura 92 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os gráficos das figuras 91 e 92 podemos concluir que os erros interpolados

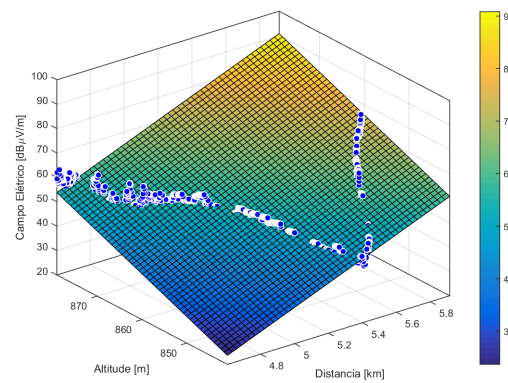
dos campos em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  stam a uma função distribuição cumulativa normal.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  e ajustam a uma função distribuição cumulativa exponencial.

### 6.4.2 Interpolação bidimensional da região Lagoinha

A interpolação do campo bidimensional da região Lagoinha consiste em seis análises. A primeira análise realizada é a interpolação linear do campo elétrico em uma superfície em relação às variáveis altitude e distância com o campo elétrico medido, representada pela Figura 93.

Figura 93 – Intensidade do campo elétrico em relação a altitude e distância da região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

A superfície gerada é representada pela expressão  $E = -771,6 + 28,28 x + 0,7909 y$ . Onde E o campo elétrico, x a distância e y a altitude. Os coeficientes do polinômio de interpolação com 95% de intervalo de confiança são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Polinômios de interpolação da região Lagoinha

p00	p10	p01
-771.6	28.28	0.7909
(-781.2, -762)	(27.98, 28.58)	(0.7812, 0.8005)

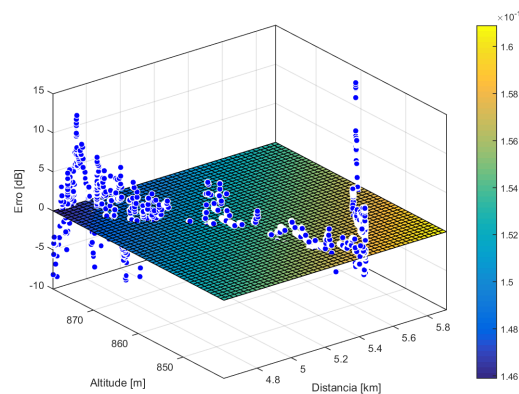
Com os dados (campo elétrico, altitude do terreno e distância do transmissor), realizou-se análises estatísticas para as 9000 amostras. A tabela 23 apresenta os resultados da análise estatística da região lagoinha.

Tabela 23 – Análises estatísticas da região Lagoinha

	Campo elétrico	Altitude	Distância
Valor mínimo	42,96	840,92	4,60
Valor máximo	79,06	879	5,91
Media	55,38	864,19	5,07
Mediana	54,16	868,05	4,90
Desvio padrão	7,09	11,83	0,38
Variância	50,26	140,02	0,14

A segunda análise tem como o intuito demonstrar o comportamento do erro do campo elétrico em uma superfície com às variáveis altitude e distância. Com isso realiza-se a interpolação da diferença da intensidade de campo elétrico medido em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e com o valor interpolado. A Figura 94 apresenta o plano de interpolação e a diferença (erro) do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado.

Figura 94 – Intensidade do erro na região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise estatística encontrada para o erro do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado da região lagoinha e mostrado na Tabela 24.

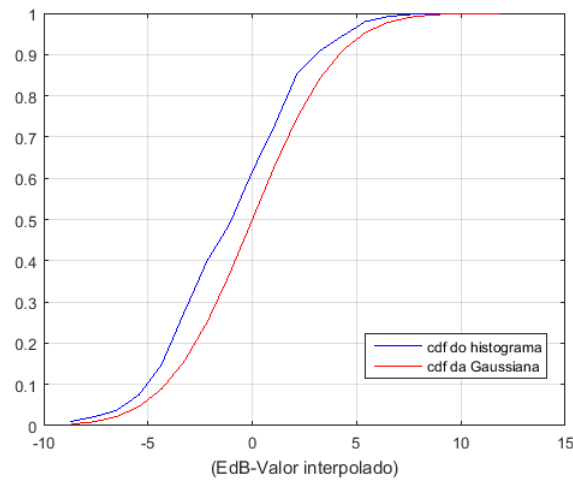
Tabela 24 – Análise estatística do erro da região Lagoinha

Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Medio	Mediana	Desvio Padrão	variância
-8,6907	13	1,5165e-12	0,0795	3,2283	10,42

As análises subsequentes foram realizadas para a comparação: do erro do campo elétrico com as funções de distribuição gaussiana; função densidade de probabilidade (pdf) normalizada com o histograma do erro; com uma distribuição exponencial e um histograma do erro com a pdf.

A Figura 95 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo elétrico em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo elétrico e a Gaussiana com média de  $1,3250\text{e-}04$  e desvio padrão de  $1,3658\text{e-}04$ .

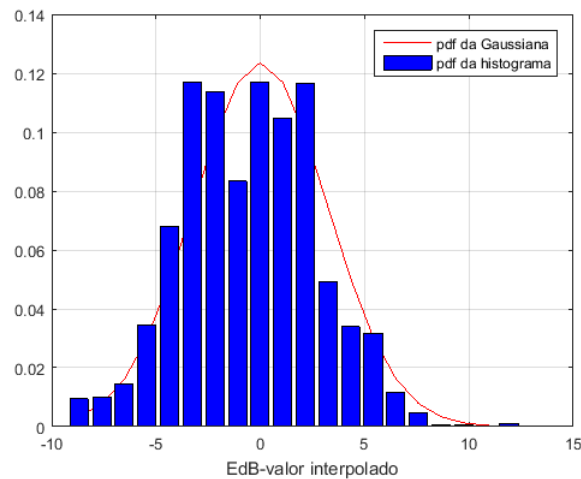
Figura 95 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 96 apresenta a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a Gaussiana com média de  $1,3250\text{e-}04$  e desvio padrão de  $1,3658\text{e-}04$ .

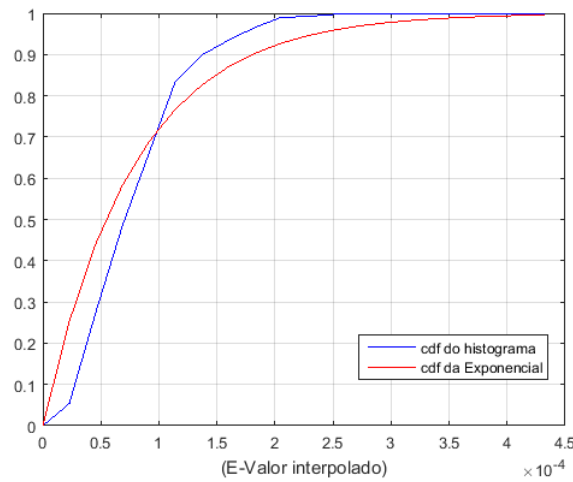
Figura 96 – pdf do histograma de EdB e pdf da gaussiana da região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 97 representa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $1.5165\text{e-}12$  e desvio padrão de 3.2283.

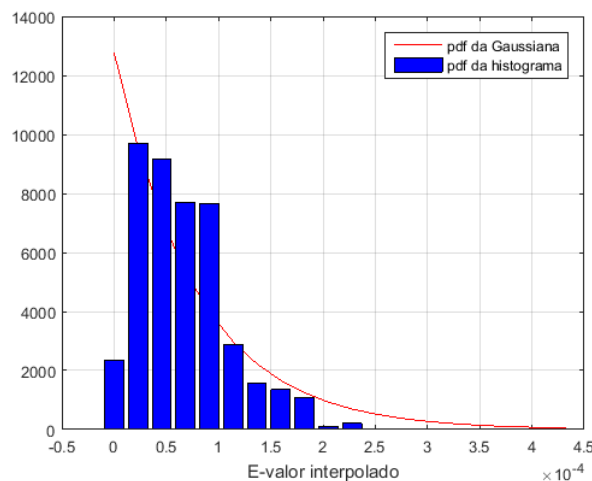
Figura 97 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 98 retrata a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V/m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $1.5165\text{e-}12$  e desvio padrão de 3.2283.

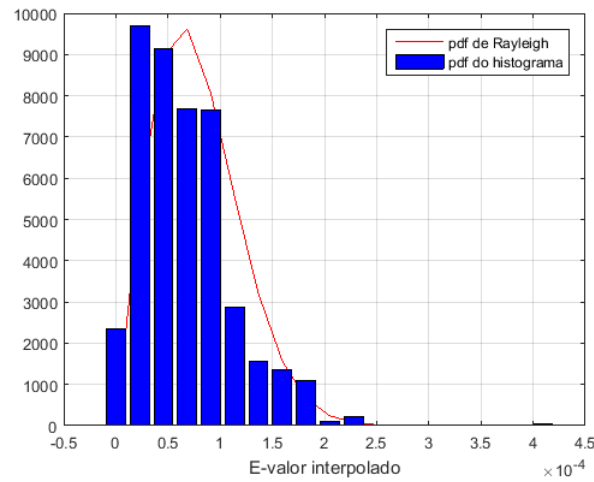
Figura 98 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 99 representa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V/m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $1.5165\text{e-}12$  e desvio padrão de 3.2283.

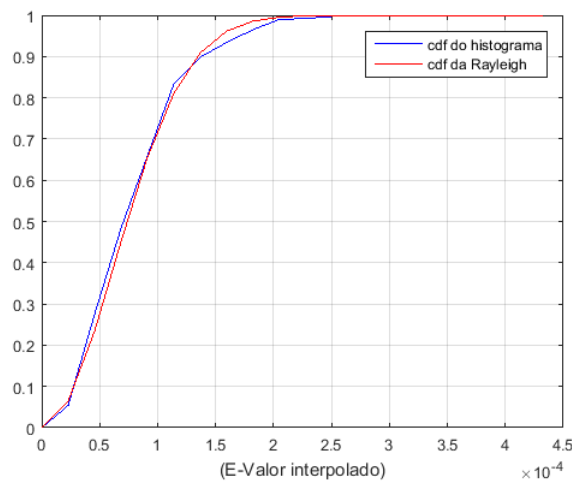
Figura 99 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 100 expressa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $1.5165\text{e-}12$  e desvio padrão de 3.2283.

Figura 100 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

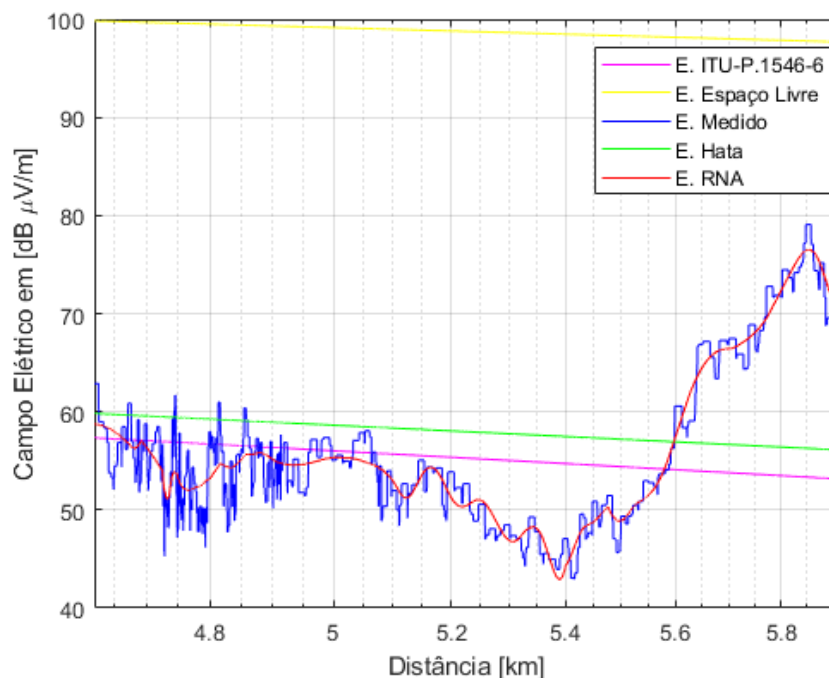
Analisando os gráficos das Figuras 95 até 100 pode-se concluir que os campos elétricos dados em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf Gaussina.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

### 6.4.3 Comparação dos modelos de propagação na região Lagoinha

Com o intuito de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico medido em relação aos modelos de propagação de ondas, na cidade de Uberlândia, calculou-se o campo elétrico nas 9000 amostras da região Lagoinha para cada um dos modelos de propagação definidos. A figura 101 mostra o comportamento do sinal UHF (campo medido) em relação aos modelos de propagação espaço livre, Hata, ITU-R P.1546, interpolado e RNA gerada.

Figura 101 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Lagoinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 25, apresenta os resultados da análise estatística dos modelos de propagação na região Lagoinha.

Tabela 25 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Lagoinha

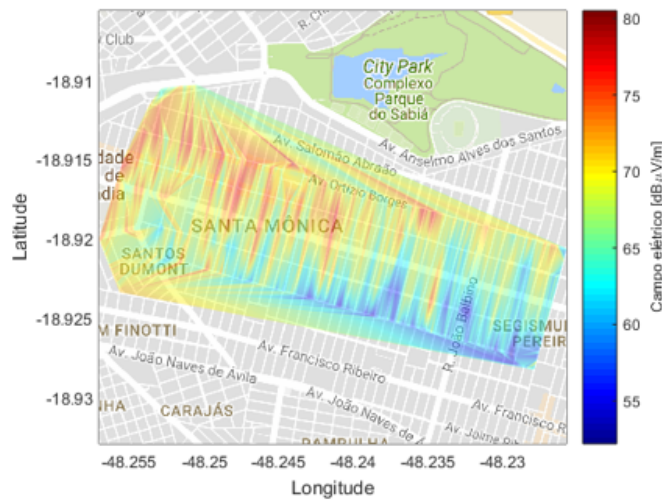
Modelo	Média	Erro médio	Erro RMS	Desvio Padrão
ITU-R P.1546-6	55,17	-0,20	9,88	7,75
Espaço Livre	97,93	42,55	44,5	7,54
Hata	57,79	2,41	10,28	7,04
RNA	54,77	-0,60	6,64	6,14

Nota-se pela a Figura 101 que visualmente o modelo que mais se comportou com o





Figura 103 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Santa Mônica

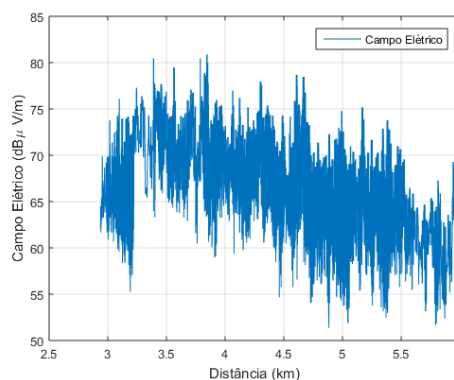


Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na mancha da intensidade do sinal elétrico na figura 103 a predominância da cor cian, de acordo com a legenda do colobar dessa região a faixa de frequência que representa a cor cian é de 55 a 60  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , onde obtém uma média da intensidade do campo elétrico de 55,38  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e constata-se que o campo elétrico máximo e mínimo são 80,86 e 51,36  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , respectivamente.

Na sequência as 71000 amostras são submetidas ao teste de normalidade *Kolmogorov-Smirnov* A fim de verificar se as amostras resultam de uma distribuição normal. O teste de normalidade para a região Santa Mônica apresentou que as amostras não provém de uma distribuição normal. As 71000 amostras de campo elétrico da região Santa Mônica em relação a distância do transmissor são plotadas, conforme apresentado pela a figura 104.

Figura 104 – Campo elétrico da região Santa Mônica

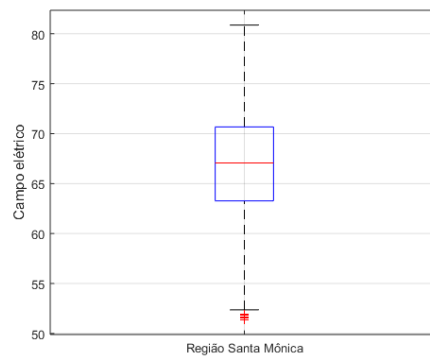


Fonte: Elaborada pelo autor.

Observar-se que na figura 104, apresenta o comportamento da intensidade do sinal ao

longo do percurso da região Santa Mônica das 71000 amostras. Essas amostras estão a uma faixa de 2,93 a 5,97 km do transmissor. Para retratar a variação do campo elétrico utiliza-se a ferramenta gráfica boxplot, que representa a alteração do campo elétrico por meio de quartis.

Figura 105 – Boxplot da região Santa Mônica



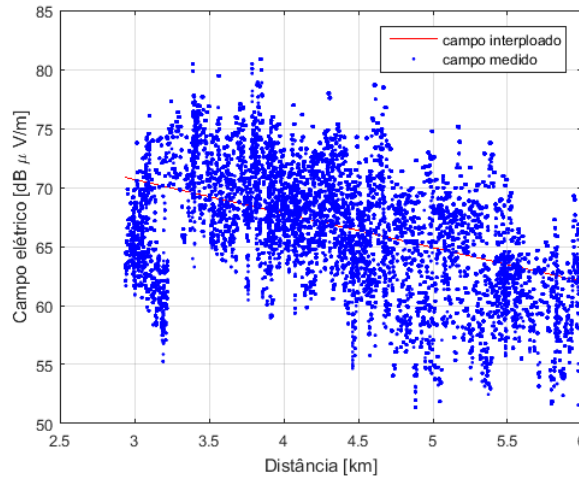
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na figura 105, apresenta o gráfico boxplot do campo elétrico da região central. O qual apresenta 85 outliers (medidas discrepantes), o limite superior de  $80,8679 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , e o Terceiro quartil Q3 (75%)  $70,6679$ , segundo quartil Q2 (mediana)  $67,0679$ , primeiro quartil Q1 (25%)  $63,2679$  e limite inferior  $52,3679$ .

### 6.5.1 Interpolação linear da região Santa Mônica

Na interpolação linear são realizadas três análises. A primeira análise é a geração de um modelo de regressão linear polinomial. Com o intuito de conceber um modelo de regressão linear polinomial das 71000 amostras coletadas, ordenou-se as amostras em ordem crescente de acordo com a distância e através da regressão linear encontrou-se o polinômio de grau 1. O qual é representado na figura 106 por uma reta em vermelho. A equação dessa reta da figura 32 e expressa por  $y = -2,8828x + 79,3217$ .

Figura 106 – Regressão linear polinomial do campo elétrico na região Santa Mônica

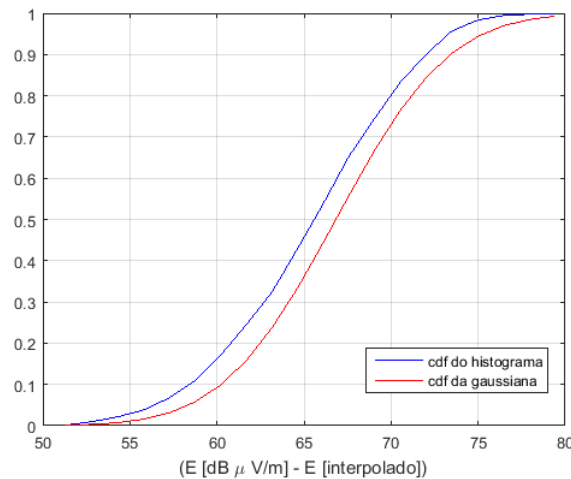


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência calcula-se a diferença das amostras de campo elétrico medido com o polinômio gerado da região Santa Mônica em cada ponto do espaço amostral. Assim encontra-se o erro em cada amostra e analisa o comportamento do erro interpolado com as funções distribuição de probabilidade cdf e exponencial.

Na distribuição cdf normalizada, com os erros calculados, gera-se um histograma normalizado desses erros e calcula-se a soma cumulativa. Na sequência, com a média (66,8284) e o desvio padrão (5,1285) dos erros da intensidade de campo elétrico, calcula-se a função distribuição cumulativa normal (cdf). Com os valores calculados, o próximo passo é produzir o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico com a cdf normalizada do erro, apresentado na figura 107.

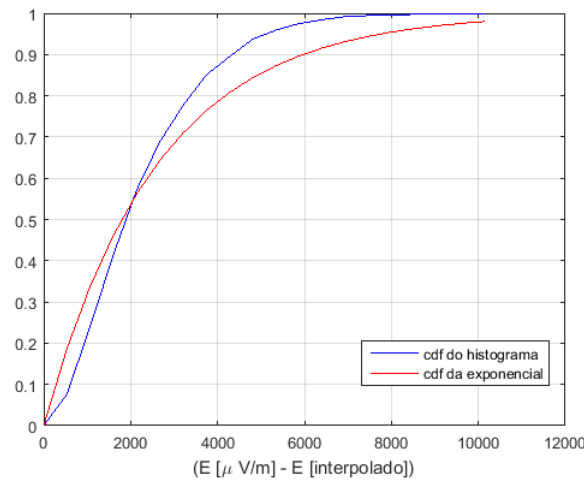
Figura 107 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Santa Mônica



Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima análise a ser realizada é a função distribuição cumulativa exponencial. Primeiramente converte os valores de campo elétrico para dBm e em seguida normaliza-os. Gera-se o histograma e calcula os valores de média ( $2,5903e+03$ ) e desvio padrão ( $1,5056e+03$ ). A partir da média encontrada do campo elétrico em dbm, calcula-se a função distribuição cumulativa exponencial (expcdf). Em sequência gera-se o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em dbm com a expcdf, apresentada na figura 108.

Figura 108 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Santa Mônica



Fonte: Elaborada pelo autor.

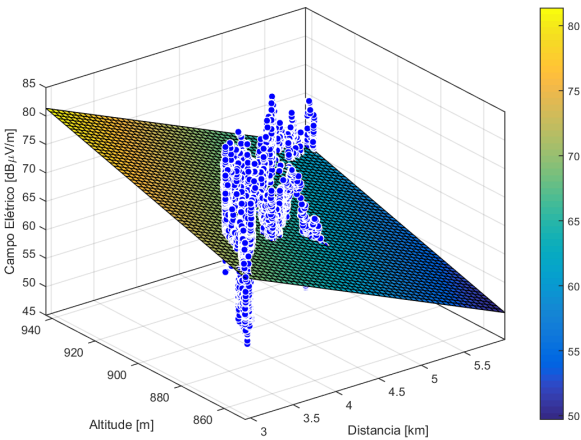
Analisando os gráficos das figuras 107 e 108 podemos concluir que os erros interpolados dos campos em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa normal.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa exponencial.

### 6.5.2 Interpolação bidimensional da região Santa Mônica

A interpolação do campo bidimensional da região Santa Mônica consiste em seis análises. A primeira análise realizada é a interpolação linear do campo elétrico em uma superfície em relação às variáveis altitude e distância com o campo elétrico medido, representada pela 109.

Figura 109 – Intensidade do campo elétrico em relação a altitude e distância da região Santa Mônica



Fonte: Elaborada pelo autor.

A superfície gerada é representada pela expressão  $E = -16 - 6,632 x + 0,1239 y$ . Onde E representa o campo elétrico, x a distância e y a altitude. Os coeficientes do polinômio de interpolação com 95% de intervalo de confiança são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Polinômios de interpolação da região Santa Mônica

p00	p10	p01
-16	-6.632	0.1239
(-19.51, -12.49)	(-6.776, -6.488)	(0.1194, 0.1285)

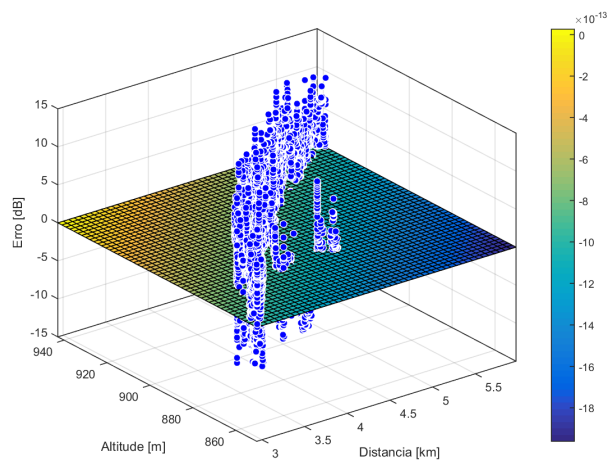
Com os dados (campo elétrico, altitude do terreno e distância do transmissor), realizou-se análises estatísticas para as 71000 amostras da região Santa Mônica. A tabela 27 apresenta os resultados da região Santa Mônica.

Tabela 27 – Análises estatísticas da região Santa Mônica

	Campo elétrico	Altitude	Distância
Valor mínimo	51,36	850,23	2,93
Valor máximo	80,86	942,90	5,97
Media	66,82	900,37	4,33
Mediana	67,06	902,26	4,27
Desvio padrão	5,12	25,55	0,81
Variância	26,30	652,98	0,65

A segunda análise tem como o intuito demonstrar o comportamento do erro do campo elétrico em uma superfície com às variáveis altitude e distância. Com isso realiza-se a interpolação da diferença da intensidade de campo elétrico medido em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e com o valor interpolado. A Figura 110 apresenta o plano de interpolação e a diferença (erro) do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado.

Figura 110 – Intensidade do erro na região Santa Mônica



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise estatística encontrada para o erro do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado e mostrado na Tabela 28.

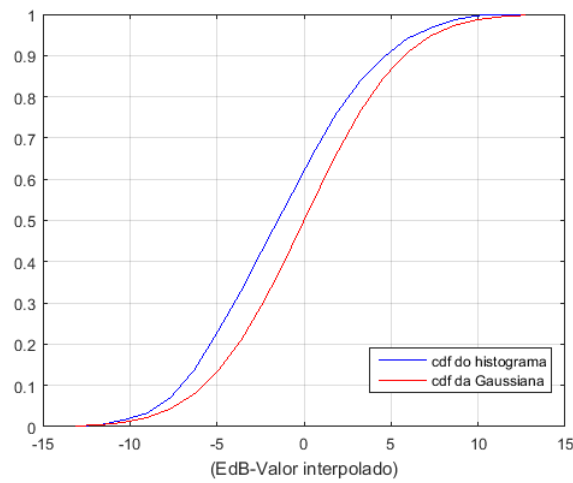
Tabela 28 – Análise estatística do erro da região Santa Mônica

Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Medio	Mediana	Desvio Padrão	variância
-13,08	14,06	-8,8824e-13	-0,1615	4,47	20,04

As análises subsequentes foram realizadas para a comparação: do erro do campo elétrico com as funções de distribuição gaussiana; função densidade de probabilidade (pdf) normalizada com o histograma do erro; com uma distribuição exponencial e um histograma do erro com a pdf.

A Figura 111 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo elétrico em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo elétrico e a Gaussiana com o média de  $-8.8824\text{e-}13$  e desvio padrão de 4.4773.

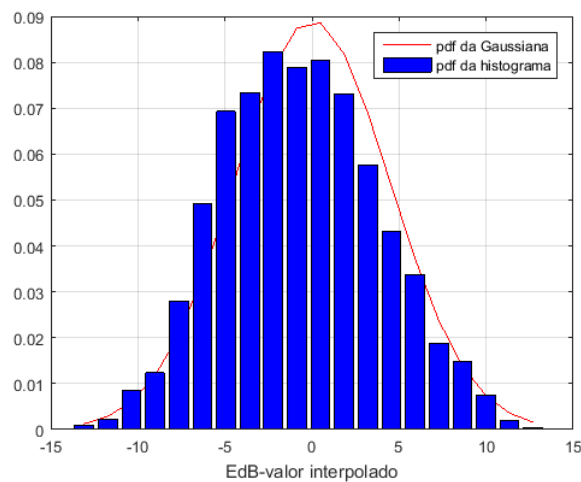
Figura 111 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Santa Mônica



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 112 apresenta a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a Gaussiana com média de  $-8.8824\text{e-}13$  e desvio padrão de 4.4773.

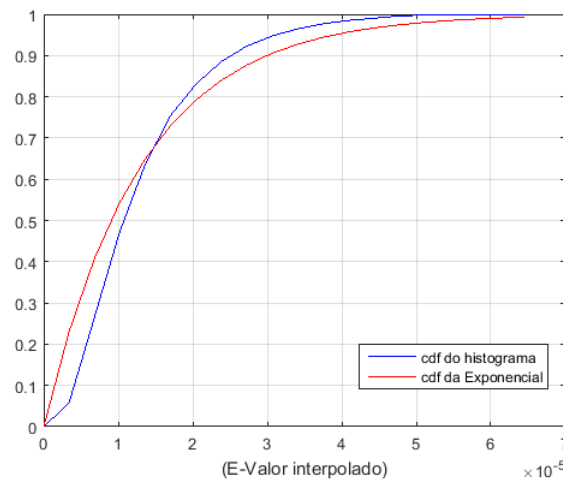
Figura 112 – pdf do histograma de Edb e pdf da gaussiana da região Santa Mônica



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 113 retrata a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $1.2999\text{e-}05$  e desvio padrão de  $8.9404\text{e-}06$ .

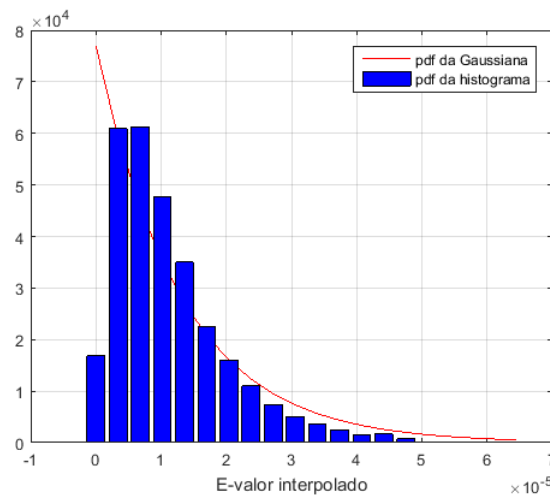
Figura 113 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Santa Mônica



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 114 demonstra a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $1.2999\text{e-}05$  e desvio padrão de  $8.9404\text{e-}06$ .

Figura 114 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Santa Mônica

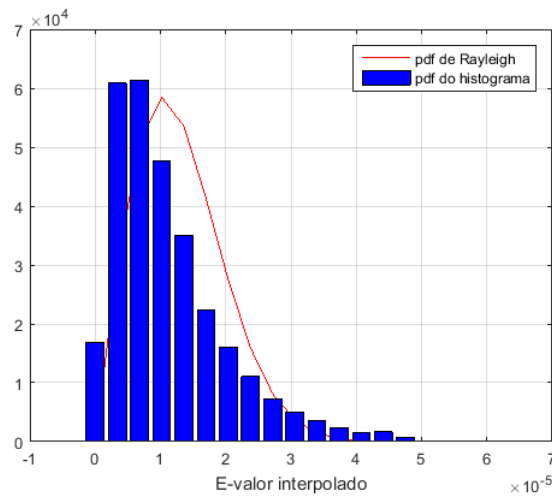


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 115 representa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $1.2999\text{e-}05$  e desvio padrão de  $8.9404\text{e-}06$ .



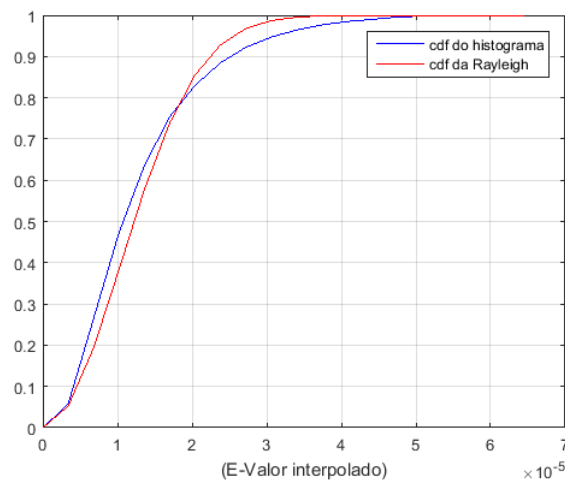
Figura 115 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Santa Mônica



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 116 expressa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $1.2999\text{e-}05$  e desvio padrão de  $8.9404\text{e-}06$ .

Figura 116 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Santa Mônica



Fonte: Elaborada pelo autor.

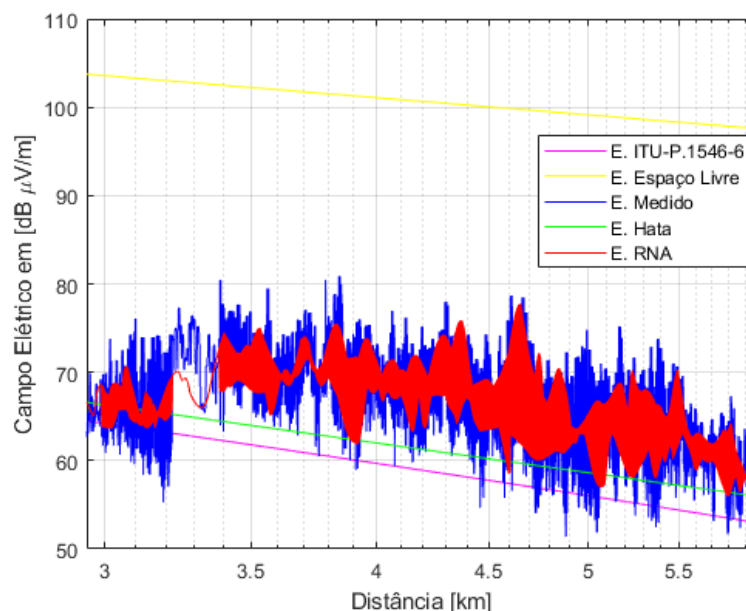
Analisando os gráficos das Figuras 111 até 116 pode-se concluir que os campos elétricos dados em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf Gaussiana.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

### 6.5.3 Comparação dos modelos de propagação na região do Santa Mônica

Com o intuito de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico medido em relação aos modelos de propagação de ondas, na cidade de Uberlândia, calculou-se o campo elétrico nas 71000 amostras da região Santa Mônica para cada um dos modelos de propagação definidos. A figura 117 mostra o comportamento do sinal UHF (campo medido) em relação aos modelos de propagação espaço livre, Hata, ITU-R P.1546, interpolado e RNA gerada

Figura 117 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Santa Mônica



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 29, apresenta os resultados da análise estatística dos modelos de propagação na região Santa Mônica.

Tabela 29 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Santa Mônica

Modelo	Média	Erro médio	Erro RMS	Desvio Padrão
ITU-R P.1546-6	58,52	-8,29	9,75	4,77
Espaço Livre	100,39	33,56	34,08	4,79
Hata	60,95	-5,87	7,80	4,33
RNA	66,60	-0,22	3,98	3,02

Nota-se pela a Figura 117 que visualmente o modelo que mais se comportou com o sinal medido do campo elétrico foi a RNA. E pela a Tabela 29 o modelo que apresentou o menor erro RMS foi a RNA.

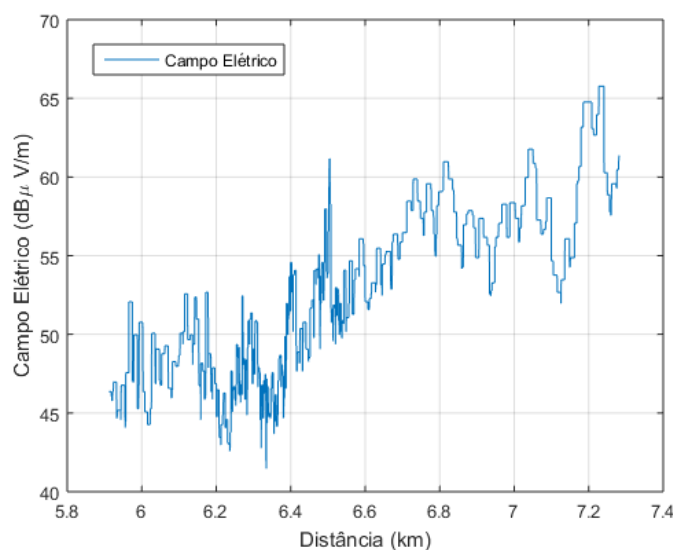


Nota-se na mancha da intensidade do sinal elétrico na figura 119 a predominância da cor azul, de acordo com a legenda do colobar dessa região a faixa de frequência que representa a cor azul é de 44 a 52 dB $\mu$ V/m, onde obtém uma média da intensidade do campo elétrico de 51,92 dB $\mu$ V/m e constata-se que o campo elétrico máximo e mínimo são 65,76 e 41,46 dB $\mu$ V/m, respectivamente.

Na sequência as 7722 amostras são submetidas ao teste de normalidade *Kolmogorov-Smirnov* A fim de verificar se as amostras resultam de uma distribuição normal. O teste de normalidade para a região Cidade Jardim apresentou que as amostras não provém de uma distribuição normal.

As 7722 amostras de campo elétrico da região Cidade Jardim em relação a distância do transmissor são plotadas, conforme apresentado pela a figura 120.

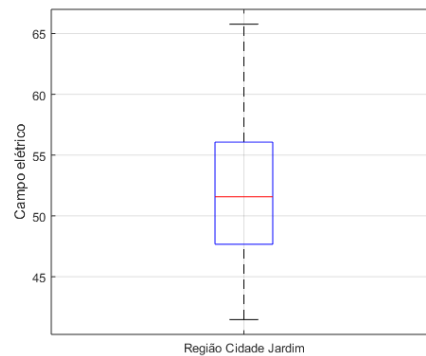
Figura 120 – Campo elétrico da região Cidade Jardim



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observar-se que na figura 120, apresenta o comportamento da intensidade do sinal ao longo do percurso da região central das 7722 amostras. Essas amostras estão a uma faixa de 5,91 a 7,28 km do transmissor. Para retratar a variação do campo elétrico utiliza-se a ferramenta gráfica boxplot, que representa a alteração do campo elétrico por meio de quartis.

Figura 121 – Boxplot da região Cidade Jardim



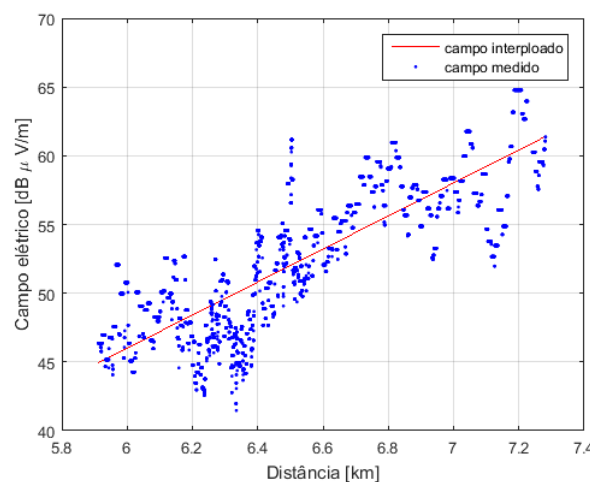
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na figura 121, apresenta o gráfico boxplot do campo elétrico da região central. O qual apresenta 0 outliers (medidas discrepantes), o limite superior de 65,7679  $dB\mu V/m$ , e o Terceiro quartil Q3 (75%) 56,0679, segundo quartil Q2 (mediana) 51,5679, primeiro quartil Q1 (25%) 47,6679 e limite inferior 41,4679.

### 6.6.1 Interpolação linear da região Cidade Jardim

Na interpolação linear são realizadas três análises. A primeira análise é a geração de um modelo de regressão linear polinomial. Com o intuito de conceber um modelo de regressão linear polinomial das 7722 amostras coletadas, ordenou-se as amostras em ordem crescente de acordo com a distância e através da regressão linear encontrou-se o polinômio de grau 1. O qual é representado na figura 122 por uma reta em vermelho. A equação dessa reta da figura 122 é expressa por  $y=12,0135x-26,0734$ .

Figura 122 – Regressão linear polinomial do campo elétrico da região Cidade Jardim

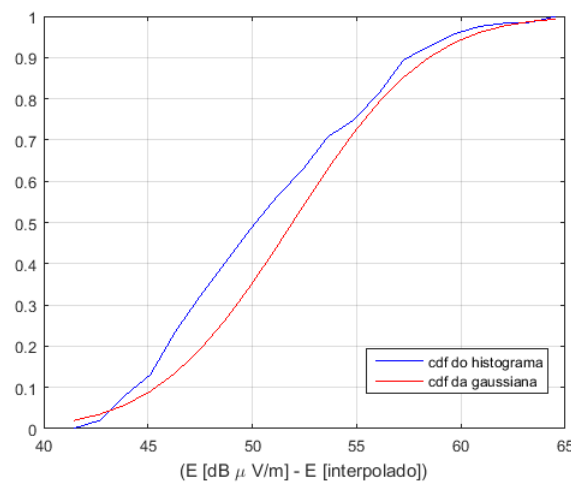


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência calcula-se a diferença das amostras de campo elétrico medido com o polinômio gerado da região em cada ponto do espaço amostral. Assim encontra-se o erro em cada amostra e analisa o comportamento do erro interpolado com as funções distribuição de probabilidade cdf e exponencial.

Na distribuição cdf, com os erros calculados, gera-se um histograma normalizado desses erros e calcula-se a soma cumulativa. Na sequência, com a média (51,9266) e o desvio padrão (5,0952) dos erros da intensidade de campo elétrico, calcula-se a função distribuição cumulativa normal (cdf). Com os valores calculados, o próximo passo é produzir o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico com a cdf normalizada do erro, apresentado na figura 123.

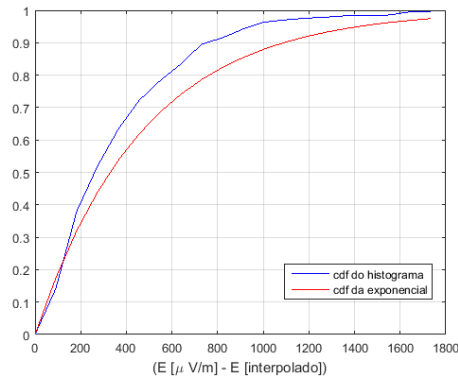
Figura 123 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Cidade Jardim



Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima análise a ser realizada é a função distribuição cumulativa exponencial. Primeiramente converte os valores de campo elétrico para dBm e em seguida normaliza-os. Gera-se o histograma e calcula os valores de média (472,9413) e desvio padrão (313,4060). A partir da média encontrada do campo elétrico em dbm, calcula-se a função distribuição cumulativa exponencial (expcdf). Em sequência gera-se o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em dbm com a expcdf, apresentada na figura 124.

Figura 124 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Cidade Jardim



Fonte: Elaborada pelo autor.

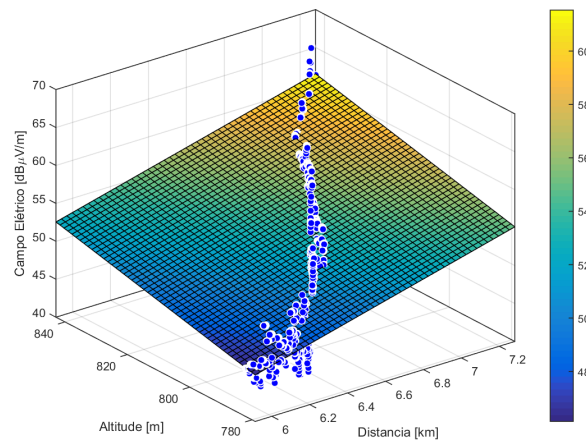
Analisando os gráficos das figuras 123 e 124 podemos concluir que os erros interpolados dos campos em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa normal.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa exponencial.

### 6.6.2 Interpolação bidimensional da região Cidade Jardim

A interpolação do campo bidimensional da região Cidade Jardim consiste em seis análises. A primeira análise realizada é a interpolação linear do campo elétrico em uma superfície em relação às variáveis altitude e distância com o campo elétrico medido, representada pela Figura 125.

Figura 125 – Intensidade do campo elétrico em relação a altitude e distância da região Cidade Jardim



Fonte: Elaborada pelo autor.

A superfície gerada é representada pela expressão  $E = -70,98 + 6,553x + 0,1006y$ . Onde  $E$  representa o campo elétrico,  $x$  a distância e  $y$  a altitude. Os coeficientes do polinômio de interpolação com 95% de intervalo de confiança são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 – Polinômios de interpolação da região Cidade Jardim

p00	p10	p01
-70.98	6.553	0.1006
(-78.76, -63.21)	(5.601, 7.505)	(0.08343, 0.1178)

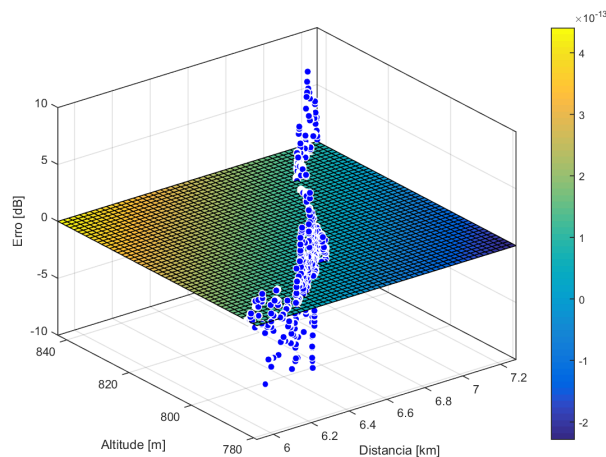
Com os dados (campo elétrico, altitude do terreno e distância do transmissor), realizou-se análises estatísticas para as 7722 amostras da região Cidade Jardim. A tabela 31 apresenta os resultados da região Cidade Jardim.

Tabela 31 – Análises estatísticas da região Cidade Jardim

	Campo elétrico	Altitude	Distância
Valor mínimo	41,46	779	5,91
Valor máximo	65,76	842,88	7,28
Media	51,92	798,80	6,42
Mediana	51,56	791,56	6,42
Desvio padrão	5,09	19	0,34
Variância	25,96	361,13	0,11

A segunda análise tem como o intuito demonstrar o comportamento do erro do campo elétrico em uma superfície com às variáveis altitude e distância. Com isso realiza-se a interpolação da diferença da intensidade de campo elétrico medido em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e com o valor interpolado. A Figura 126 apresenta o plano de interpolação e a diferença (erro) do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado.

Figura 126 – Intensidade do erro na região Cidade Jardim



Fonte: Elaborada pelo autor.



A análise estatística encontrada para o erro do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado da região Cidade Jardim e mostrado na Tabela 32.

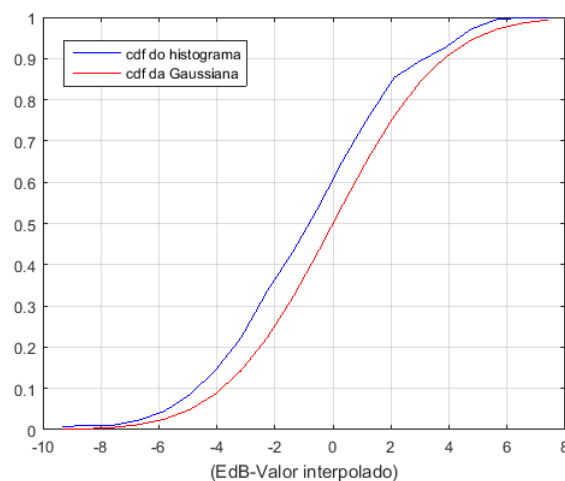
Tabela 32 – Análise estatística do erro da região Cidade Jardim

Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Medio	Mediana	Desvio Padrão	variância
-9,34	8,28	7,4037e-14	0,1067	2,97	8,84

As análises subsequentes foram realizadas para a comparação: do erro do campo elétrico com as funções de distribuição gaussiana; função densidade de probabilidade (pdf) normalizada com o histograma do erro; com uma distribuição exponencial e um histograma do erro com a pdf.

A Figura 127 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo elétrico em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo elétrico e a Gaussiana com o média de  $7.4037\text{e-}14$  e desvio padrão de  $2.9746$ .

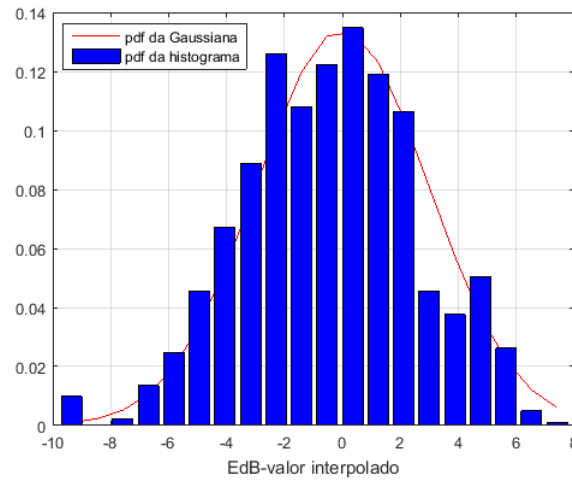
Figura 127 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Cidade Jardim



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 128 apresenta a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a Gaussiana com média de  $7.4037\text{e-}14$  e desvio padrão de  $2.9746$ .

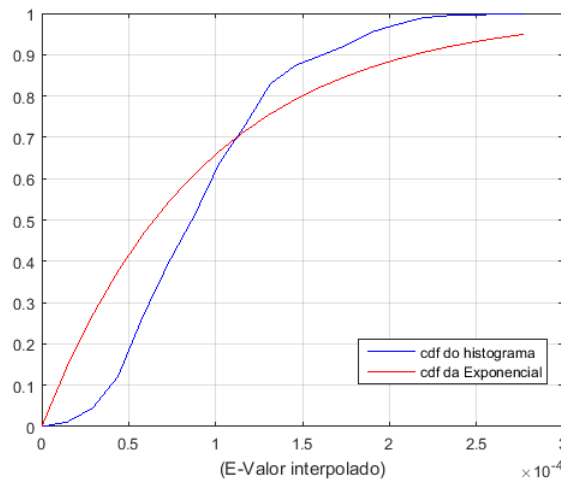
Figura 128 – pdf do histograma de EdB e pdf da gaussiana da região Cidade Jardim



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 129 retrata a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $9.3043\text{e-}05$  e desvio padrão de  $4.7144\text{e-}05$ .

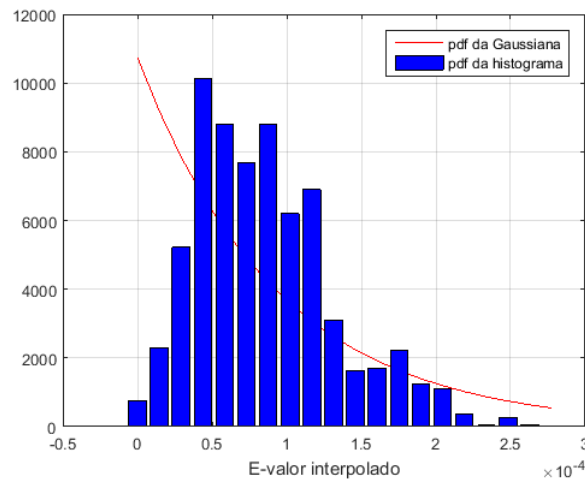
Figura 129 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Cidade Jardim



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 130 demonstra a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $9.3043\text{e-}05$  e desvio padrão de  $4.7144\text{e-}05$ .

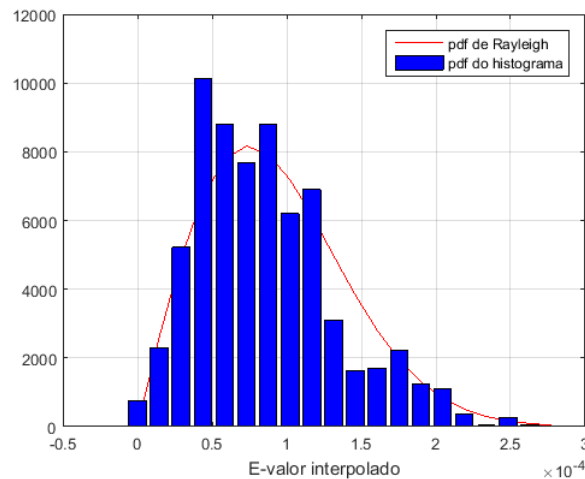
Figura 130 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Cidade Jardim



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 131 representa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $9.3043\text{e-}05$  e desvio padrão de  $4.7144\text{e-}05$ .

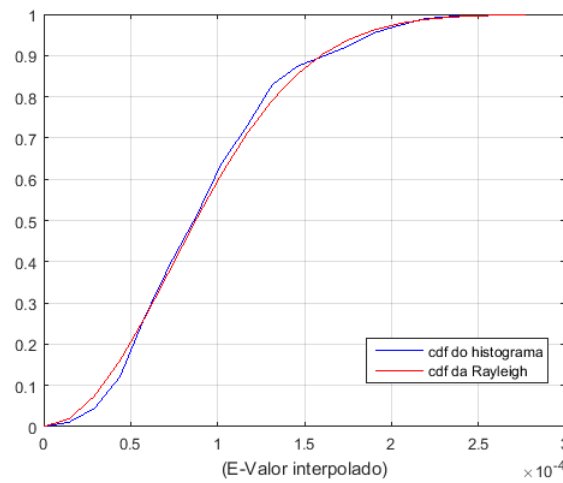
Figura 131 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Cidade Jardim



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 132 epressa a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $9.3043\text{e-}05$  e desvio padrão de  $4.7144\text{e-}05$ .

Figura 132 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Cidade Jardim



Fonte: Elaborada pelo autor.

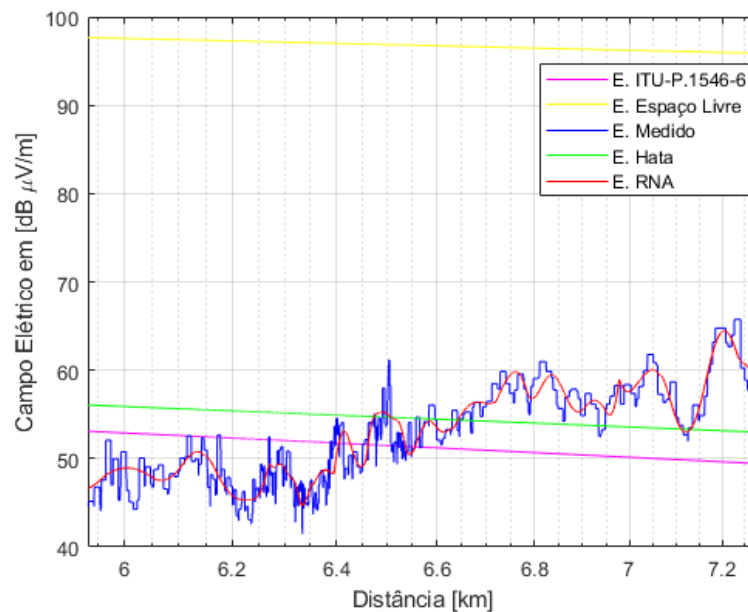
Analisando os gráficos das Figuras 127 até 132 pode-se concluir que os campos elétricos dados em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf Gaussiana.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

### 6.6.3 Comparação dos modelos de propagação da região Cidade Jardim

Com o intuito de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico medido em relação aos modelos de propagação de ondas, na cidade de Uberlândia, calculouse o campo elétrico nas 7722 amostras da região Cidade Jardim para cada um dos modelos de propagação definidos. A figura 133 mostra o comportamento do sinal UHF (campo medido) em relação aos modelos de propagação espaço livre, Hata, ITU-R P.1546, interpolado e RNA gerada.

Figura 133 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Cidade Jardim



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 33, apresenta os resultados da análise estatística dos modelos de propagação na região Cidade Jardim.

Tabela 33 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Cidade Jardim

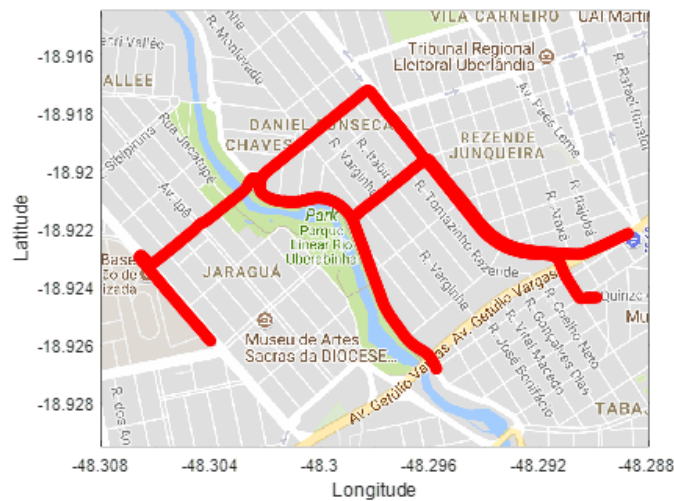
Modelo	Média	Erro médio	Erro RMS	Desvio Padrão
ITU-R P.1546-6	50,84	-1,08	5,46	0,0745
Espaço Livre	95,63	43,70	45,22	5,42
Hata	54	2,08	8,21	5,65
RNA	51,33	-0,59	5,62	5,19

Nota-se pela a Figura 133 que visualmente o modelo que mais se comportou com o sinal medido do campo elétrico foi a RNA. E pela a Tabela 33 o modelo que apresentou o menor erro RMS foi a RNA.

## 6.7 Região Daniel Fonseca

A Região Daniel Fonseca é demonstrada na figura 134, sendo composta por 26002 pontos de medição. Constatou-se que a região é composta por casas residenciais e poucos prédios de 3 pavimentos. Sua arborização é de densidade média e a altitude média do terreno é 799,70 m.

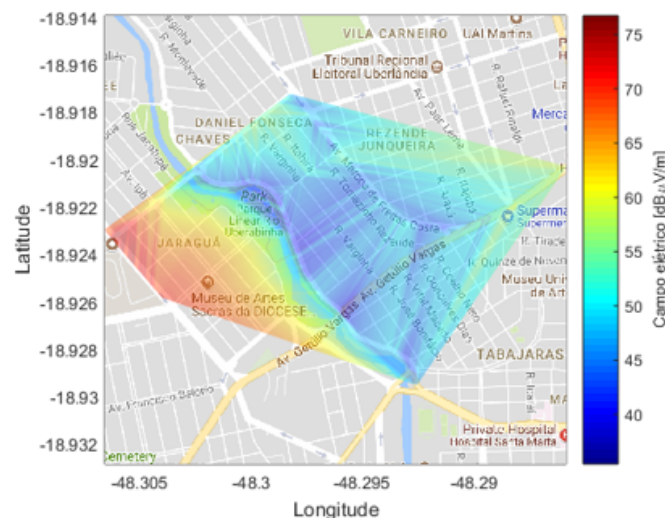
Figura 134 – Região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a medição do campo elétrico no percurso da figura 134, o próximo passo a ser realizado é gerar uma mancha da intensidade do sinal do campo elétrico na região Daniel Fonseca. A figura 135 representa a mancha da intensidade do campo elétrico na região Daniel Fonseca.

Figura 135 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Daniel Fonseca



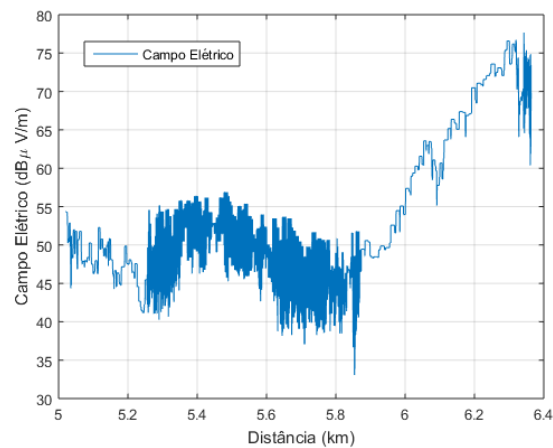
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na mancha da intensidade do sinal elétrico na figura 135 a predominância da cor cian, de acordo com a legenda do colobar dessa região a faixa de frequência que representa a cor cian é de 45 a 55 dBμV/m, onde obtém uma média da intensidade do campo elétrico de 50,89 dBμV/m e constata-se que o campo elétrico máximo e mínimo são 77,66 e 33,06 dBμV/m, respectivamente.

Na sequência as 26002 amostras são submetidas ao teste de normalidade *Kolmogorov-Smirnov* A fim de verificar se as amostras resultam de uma distribuição normal. O teste de normalidade para a região Daniel Fonseca apresentou que as amostras não provém de uma distribuição normal.

As 26002 amostras de campo elétrico da região Daniel Fonseca em relação a distância do transmissor são plotadas, conforme apresentado pela a figura 136.

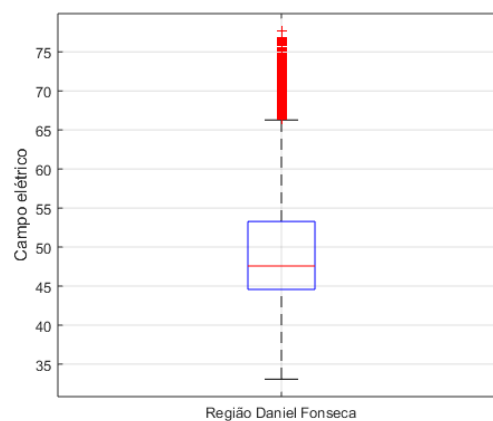
Figura 136 – Campo elétrico da região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observar-se que na figura 40, apresenta o comportamento da intensidade do sinal ao longo do percurso da região Daniel Fonseca das 26002 amostras. Essas amostras estão a uma faixa de 5,01 a 6,36 km do transmissor. Para retratar a variação do campo elétrico utiliza-se a ferramenta gráfica boxplot, que representa a alteração do campo elétrico por meio de quartis.

Figura 137 – Boxplot da região Daniel Fonseca



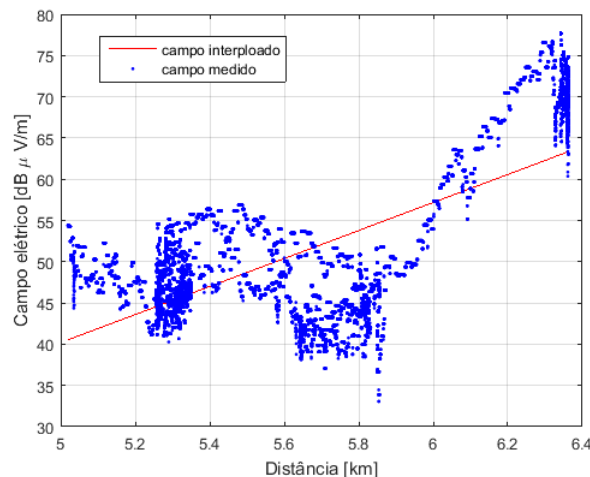
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na figura 137, apresenta o gráfico boxplot do campo elétrico da região Daniel Fonseca. O qual apresenta 3731 outliers (medidas discrepantes), o limite superior de 66,2679  $dB\mu V/m$ , e o Terceiro quartil Q3 (75%) 53,2679, segundo quartil Q2 (mediana) 47,5679, primeiro quartil Q1 (25%) 44,5679 e limite inferior 33,0679.

### 6.7.1 Interpolação linear da região Daniel Fonseca

Na interpolação linear são realizadas três análises. A primeira análise é a geração de um modelo de regressão linear polinomial. Com o intuito de conceber um modelo de regressão linear polinomial das 26002 amostras coletadas, ordenou-se as amostras em ordem crescente de acordo com a distância e através da regressão linear encontrou-se o polinômio de grau 1. O qual é representado na figura 138 por uma reta em vermelho. A equação dessa reta da figura 32 e expressa por  $y=16,9815x-44,7050$ .

Figura 138 – Regressão linear polinomial do campo elétrico na região Daniel Fonseca



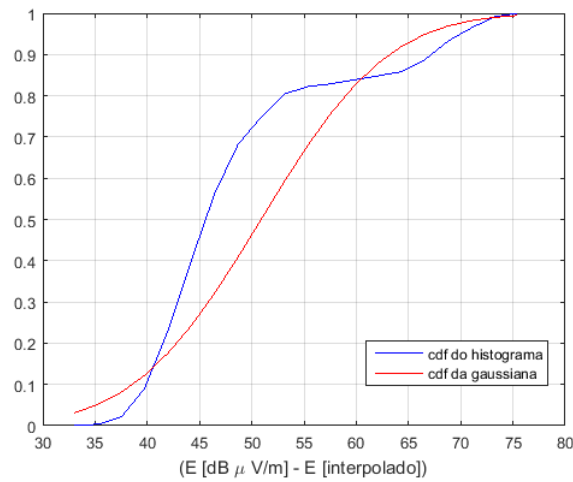
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência calcula-se a diferença das amostras de campo elétrico medido com o polinômio gerado da região Daniel Fonseca em cada ponto do espaço amostral. Assim encontra-se o erro em cada amostra e analisa o comportamento do erro interpolado com as funções distribuição de probabilidade cdf e exponencial.

Na distribuição cdf normalizada, com os erros calculados, gera-se um histograma normalizado desses erros e calcula-se a soma cumulativa. Na sequência, com a média (50,8904) e o desvio padrão (9,5759) dos erros da intensidade de campo elétrico, calcula-se a função distribuição cumulativa normal (cdf). Com os valores calculados, o próximo passo é produzir o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico com a cdf normalizada do erro, apresentado na figura 139.



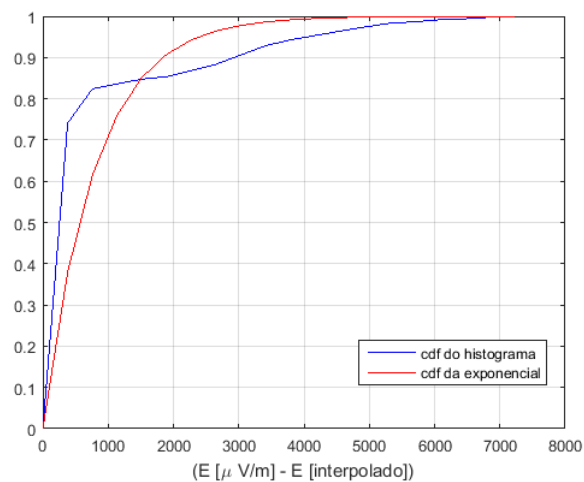
Figura 139 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima análise a ser realizada é a função distribuição cumulativa exponencial. Primeiramente converte os valores de campo elétrico para dBm e em seguida normaliza-os. Gera-se o histograma e calcula os valores de média (795,4017) e desvio padrão ( $1,3422e+03$ ). A partir da média encontrada do campo elétrico em dbm, calcula-se a função distribuição cumulativa exponencial (expcdf). Em sequência gera-se o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em dbm com a expcdf, apresentada na figura 140.

Figura 140 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os gráficos das figuras 139 e 140 podemos concluir que os erros interpolados

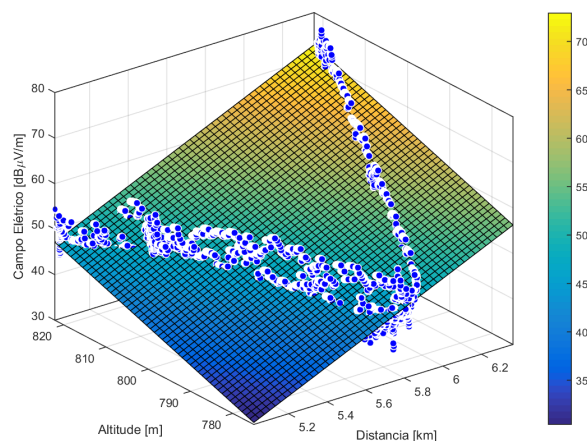
dos campos em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa normal.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa exponencial.

### 6.7.2 Interpolação bidimensional da região Daniel Fonseca

A interpolação do campo bidimensional da região Daniel Fonseca consiste em seis análises. A primeira análise realizada é a interpolação linear do campo elétrico em uma superfície em relação às variáveis altitude e distância com o campo elétrico medido, representada pela Figura 141.

Figura 141 – Intensidade do campo elétrico em relação altitude e distância da região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A superfície gerada é representada pela expressão  $E = -340,8 + 19,2 x + 0,3546 y$ . Onde  $E$  representa o campo elétrico,  $x$  a distância e  $y$  a altitude. Os coeficientes do polinômio de interpolação com 95% de intervalo de confiança são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Polinômios de interpolação da região Daniel Fonseca

p00	p10	p01
-340.8	19.2	0.3546
(-343.4, -338.1)	(19.07, 19.33)	(0.3516, 0.3576)

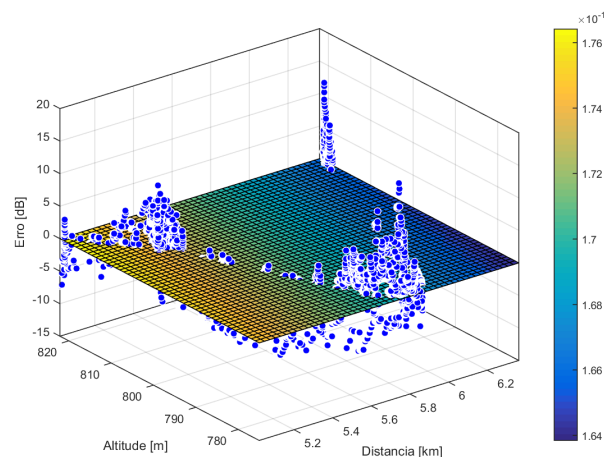
Com os dados (campo elétrico, altitude do terreno e distância do transmissor), realizou-se análises estatísticas para as 26002 amostras da região Daniel Fonseca. A tabela 35 apresenta os resultados da região Daniel Fonseca.

Tabela 35 – Análises estatísticas da região Daniel Fonseca

	Campo elétrico	Altitude	Distância
Valor mínimo	33,06	775,02	5,01
Valor máximo	77,66	822,09	6,36
Media	50,89	799,70	5,62
Mediana	47,56	808,76	5,60
Desvio padrão	9,57	16,50	0,38
Variância	91,69	272,46	0,14

A segunda análise tem como o intuito demonstrar o comportamento do erro do campo elétrico em uma superfície com às variáveis altitude e distância. Com isso realiza-se a interpolação da diferença da intensidade de campo elétrico medido em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e com o valor interpolado. A Figura 142 apresenta o plano de interpolação e a diferença (erro) do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado.

Figura 142 – Intensidade do erro na região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise estatística encontrada para o erro do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado e mostrado na Tabela 36.

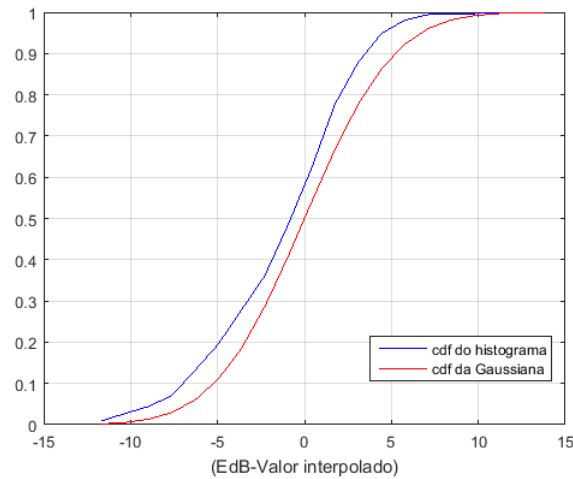
Tabela 36 – Análise estatística do erro da região Daniel Fonseca

Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Medio	Mediana	Desvio Padrão	variância
-11,67	15,17	1,7096e-12	0,58	4,04	16,38

As análises subsequentes foram realizadas para a comparação: do erro do campo elétrico com as funções de distribuição gaussiana; função densidade de probabilidade (pdf) normalizada com o histograma do erro; com uma distribuição exponencial e um histograma do erro com a pdf.

A Figura 143 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo elétrico em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo elétrico e a Gaussiana com o média de  $1.7096\text{e-}12$  e desvio padrão de  $4.0480$ .

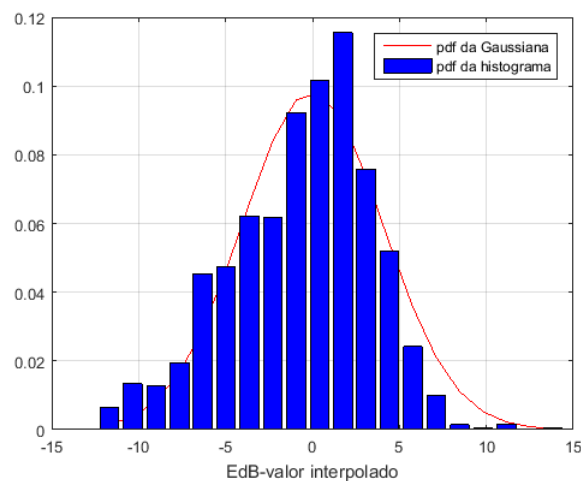
Figura 143 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 144 apresenta a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a Gaussiana com média de  $1.7096\text{e-}12$  e desvio padrão de  $4.0480$ .

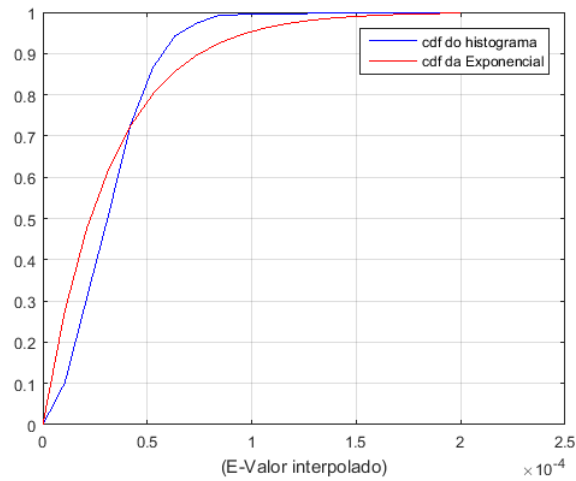
Figura 144 – pdf do histograma de EdB e pdf da gaussiana da região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 145 retrata a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $3.2558\text{e-}05$  e desvio padrão de  $1.9037\text{e-}05$ .

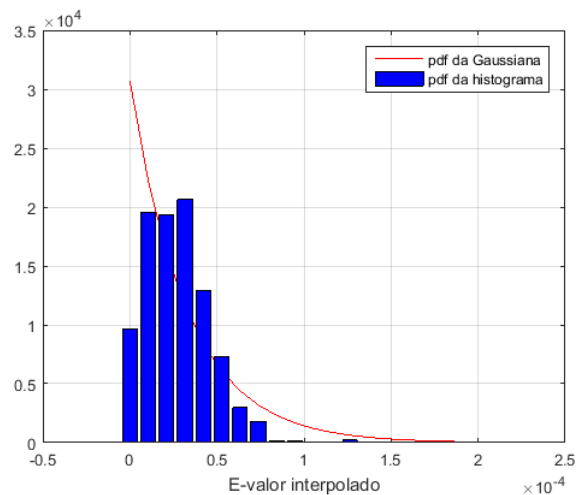
Figura 145 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 146 mostra a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $3.2558\text{e-}05$  e desvio padrão  $1.9037\text{e-}05$ .

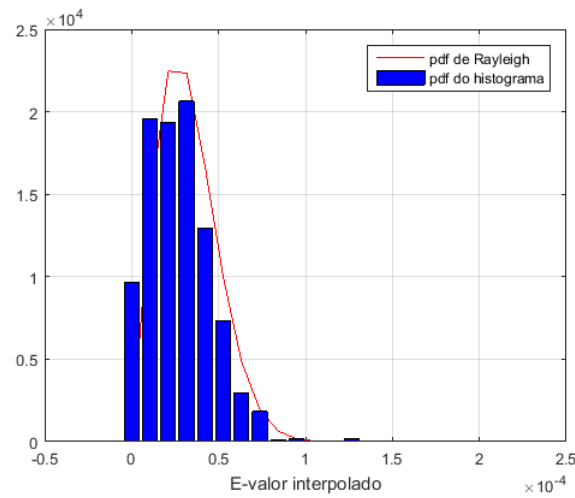
Figura 146 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 147 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $3.2558\text{e-}05$  e desvio padrão de  $1.9037\text{e-}05$ .

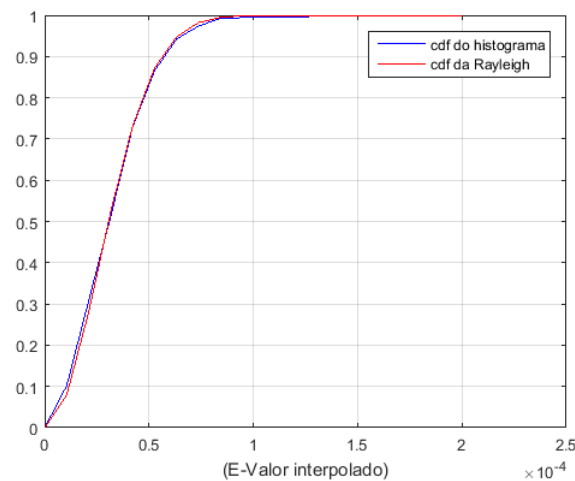
Figura 147 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 148 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $3.2558\text{e-}05$  e desvio padrão de  $1.9037\text{e-}05$ .

Figura 148 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

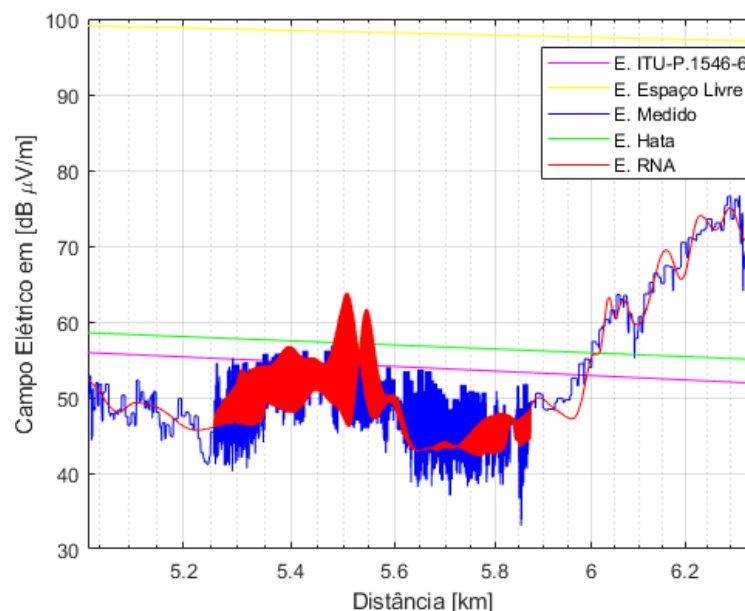
Analisando os gráficos das Figuras 143 até 148 pode-se concluir que os campos elétricos dados em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf Gaussina.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

### 6.7.3 Comparação dos modelos de propagação na região Daniel Fonseca

Com o intuito de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico medido em relação aos modelos de propagação de ondas, na cidade de Uberlândia, calculou-se o campo elétrico nas 26002 amostras da região Daniel Fonseca para cada um dos modelos de propagação definidos. A figura 149 mostra o comportamento do sinal UHF (campo medido) em relação aos modelos de propagação espaço livre, Hata, ITU-R P.1546, interpolado e RNA gerada.

Figura 149 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Daniel Fonseca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 37, apresenta os resultados da análise estatística dos modelos de propagação na região Daniel Fonseca.

Tabela 37 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Daniel Fonseca

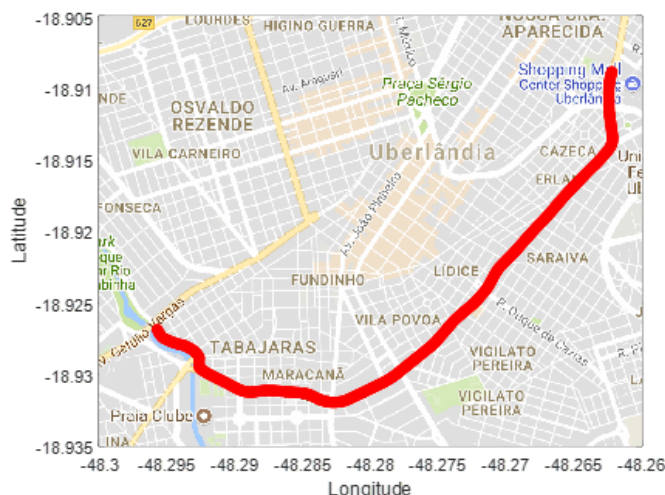
Modelo	Média	Erro médio	Erro RMS	Desvio Padrão
ITU-R P.1546-6	53,82	2,93	11,32	6
Espaço Livre	97,75	46,86	48,31	9,97
Hata	56,66	5,77	12,32	5,03
RNA	50,87	-0,0143	4,47	3,73

Nota-se pela a Figura 149 que visualmente o modelo que mais se comportou com o sinal medido do campo elétrico foi a RNA. E pela a Tabela 37 o modelo que apresentou o menor erro RMS foi a RNA.

## 6.8 Região Rondon Pacheco

A Região Rondon Pacheco é demonstrada na figura 150, sendo composta por 18999 pontos de medição. A Região Rondon Pacheco está localizada em um vale e ao seu entorno são observados prédios de 3 a 15 pavimentos. Sua arborização é de densidade rarefeita e a altitude média do terreno de 809,23 m.

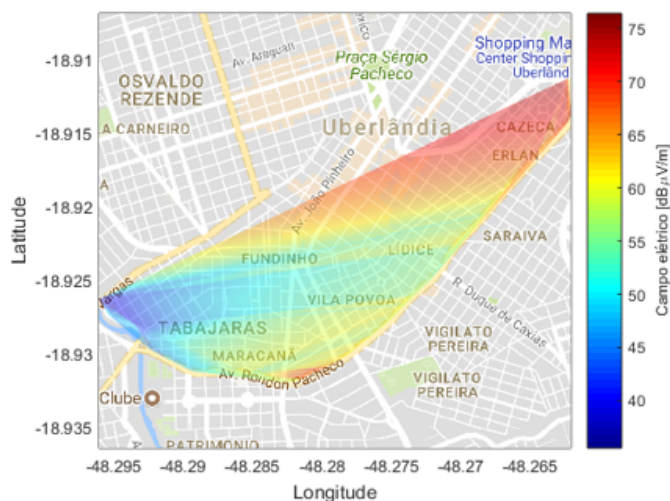
Figura 150 – Região Rondon Pacheco



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a medição do campo elétrico no percurso da figura 38, o próximo passo a ser realizado é gerar uma mancha da intensidade do sinal do campo elétrico na região. A figura 151 representa a mancha da intensidade do campo elétrico na região Rondon Pacheco.

Figura 151 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Rondon Pacheco



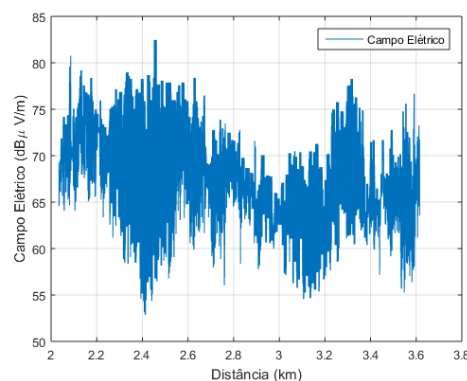
Fonte: Elaborada pelo autor.



Nota-se na mancha da intensidade do sinal elétrico na figura 151 a predominância da cor cian, de acordo com a legenda do colobar dessa região a faixa de frequência que representa a cor cian é de 55 a 60 dB $\mu$ V/m, onde obtém uma média da intensidade do campo elétrico de 58,49 dB $\mu$ V/m e constata-se que o campo elétrico máximo e mínimo são 79,96 e 40,36 dB $\mu$ V/m, respectivamente.

Na sequência as 18999 amostras são submetidas ao teste de normalidade *Kolmogov-Smirnov* A fim de verificar se as amostras resultam de uma distribuição normal. O teste de normalidade para a região Rondon Pacheco apresentou que as amostras não provém de uma distribuição normal. As 18999 amostras de campo elétrico da região Rondon Pacheco em relação a distância do transmissor são plotadas, conforme apresentado pela a figura 152.

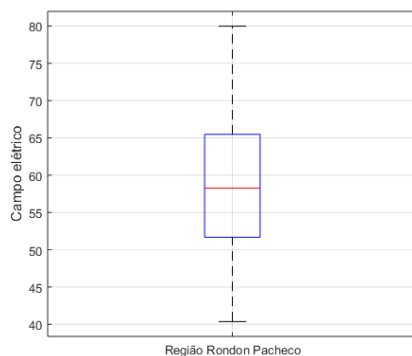
Figura 152 – Campo elétrico da região Rondon Pacheco



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observar-se que na figura 152, apresenta o comportamento da intensidade do sinal ao longo do percurso da região Rondon Pacheco das 18999 amostras. Essas amostras estão a uma faixa de 2,66 a 5,93 km do transmissor. Para retratar a variação do campo elétrico utiliza-se a ferramenta gráfica boxplot, que representa a alteração do campo elétrico por meio de quartis.

Figura 153 – Boxplot região Rondon Pacheco



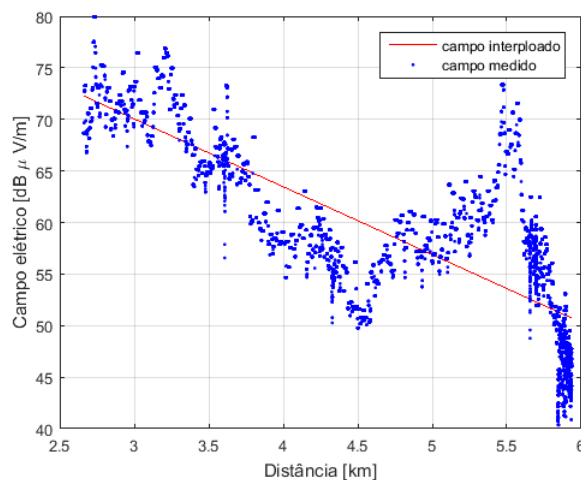
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na figura 153, apresenta o gráfico boxplot do campo elétrico da região Rondon Pacheco. O qual apresenta 0 outliers (medidas discrepantes), o limite superior de 79,9679  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , e o Terceiro quartil Q3 (75%) 65,4679, segundo quartil Q2 (mediana) 58,2679, primeiro quartil Q1 (25%) 51,6679 e limite inferior 40,3679.

### 6.8.1 Interpolação linear da região Rondon Pacheco

Na interpolação linear são realizadas três análises. A primeira análise é a geração de um modelo de regressão linear polinomial. Com o intuito de conceber um modelo de regressão linear polinomial das 18999 amostras coletadas, ordenou-se as amostras em ordem crescente de acordo com a distância e através da regressão linear encontrou-se o polinômio de grau 1. O qual é representado na figura 154 por uma reta em vermelho. A equação dessa reta da figura 154 e expressa por  $y = -6,5814x + 89,7877$ .

Figura 154 – Regressão linear polinomial do campo elétrico da região Rondon Pacheco



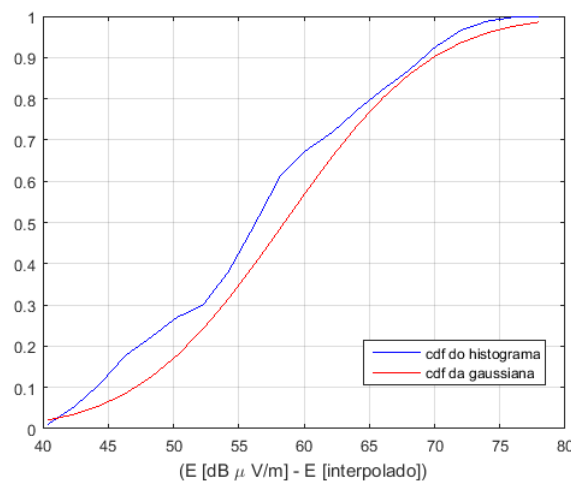
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se pela a figura 154 entre as distâncias de 5 a 5.5 km a intensidade do campo elétrico tem o comportamento de aumentar a sua intensidade do sinal. Esse aumento ocorre devido ao *gap-filler* que encontra-se nessa região.

Na sequência calcula-se a diferença das amostras de campo elétrico medido com o polinômio gerado da região Rondon Pacheco em cada ponto do espaço amostral. Assim encontra-se o erro em cada amostra e analisa o comportamento do erro interpolado com as funções distribuição de probabilidade cdf e exponencial.

Na distribuição cdf normalizada, com os erros calculados, gera-se um histograma normalizado desses erros e calcula-se a soma cumulativa. Na sequência, com a média (58,4960) e o desvio padrão (8,8817) dos erros da intensidade de campo elétrico, calcula-se a função distribuição cumulativa normal (cdf). Com os valores calculados, o próximo passo é produzir o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico com a cdf normalizada do erro, apresentado na figura 155.

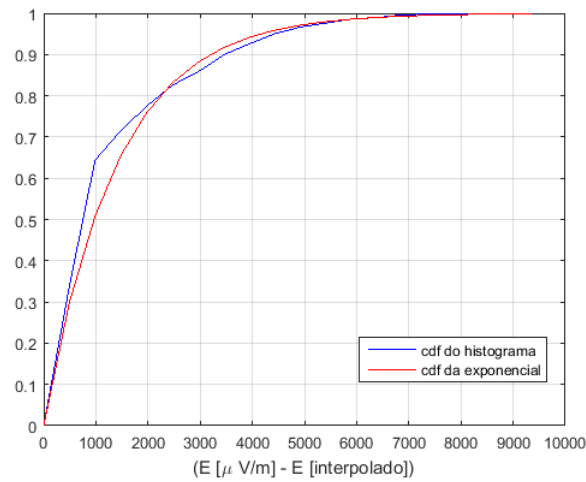
Figura 155 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Rondon Pacheco



Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima análise a ser realizada é a função distribuição cumulativa exponencial. Primeiramente converte os valores de campo elétrico para dBm e em seguida normaliza-os. Gera-se o histograma e calcula os valores de média ( $1,3874e+03$ ) e desvio padrão ( $1,4691e+03$ ). A partir da média encontrada do campo elétrico em dbm, calcula-se a função distribuição cumulativa exponencial (expcdf). Em sequência gera-se o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em dbm com a expcdf, apresentada na figura 156.

Figura 156 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Rondon Pacheco



Fonte: Elaborada pelo autor.

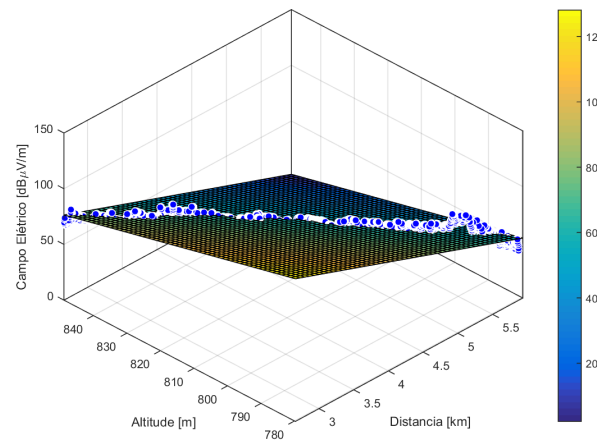
Analisando os gráficos das figuras 155 e 156 podemos concluir que os erros interpolados dos campos em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V/m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa normal.
- 2:  $\mu\text{V/m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa exponencial.

### 6.8.2 Interpolação bidimensional da região Rondon Pacheco

A interpolação do campo bidimensional da região Rondon Pacheco consiste em seis análises. A primeira análise realizada é a interpolação linear do campo elétrico em uma superfície em relação às variáveis altitude e distância com o campo elétrico medido, representada pela Figura 157.

Figura 157 – Intensidade do campo elétrico em relação altitude e distância na região Rondon Pacheco



Fonte: Elaborada pelo autor.

A superfície gerada é representada pela expressão  $E = 771,1 - 22,68x - 0,7474y$ . Onde  $E$  representa o campo elétrico,  $x$  a distância e  $y$  a altitude. Os coeficientes do polinômio de interpolação com 95% de intervalo de confiança são apresentados na Tabela 38.

Tabela 38 – Polinômios de interpolação da região Rondon Pacheco

p00	p10	p01
771.1	-22.68	-0.7474
(750.1, 792.2)	(-23.18, -22.18)	(-0.7704, -0.7243)

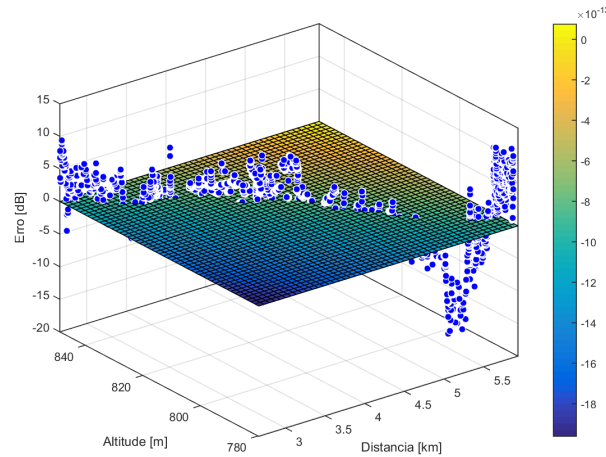
Com os dados (campo elétrico, altitude do terreno e distância do transmissor), realizou-se análises estatísticas para as 18999 amostras da região Rondon Pacheco. A tabela 39 apresenta os resultados da região Rondon Pacheco.

Tabela 39 – Análises estatísticas da região Rondon Pacheco

	Campo elétrico	Altitude	Distância
Valor mínimo	40,36	779,73	2,66
Valor máximo	79,96	848,76	5,93
Media	58,49	809,23	4,75
Mediana	58,26	804,71	5,00
Desvio padrão	8,81	23,30	1,07
Variância	78,88	542,99	1,15

A segunda análise tem como o intuito demonstrar o comportamento do erro do campo elétrico em uma superfície com às variáveis altitude e distância. Com isso realiza-se a interpolação da diferença da intensidade de campo elétrico medido em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e com o valor interpolado. A Figura 158 apresenta o plano de interpolação e a diferença (erro) do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado.

Figura 158 – Intensidade do erro na região Rondon Pacheco



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise estatística encontrada para o erro do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado e mostrado na Tabela 40.

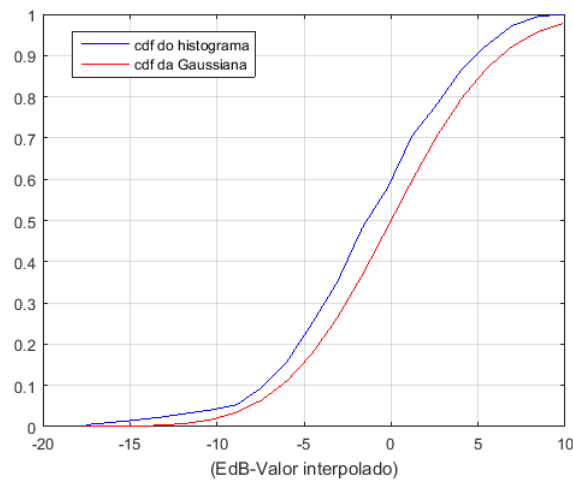
Tabela 40 – Análise estatística do erro da região Rondon Pacheco

Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Medio	Mediana	Desvio Padrão	variância
-17,49	11,30	-8,5954e-13	0,0137	4,89	23,94

As análises subsequentes foram realizadas para a comparação: do erro do campo elétrico com as funções de distribuição gaussiana; função densidade de probabilidade (pdf) normalizada com o histograma do erro; com uma distribuição exponencial e um histograma do erro com a pdf.

A Figura 159 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo elétrico em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo elétrico e a Gaussiana com o média de  $-8.5954\text{e-}13$  e desvio padrão de 4.8937.

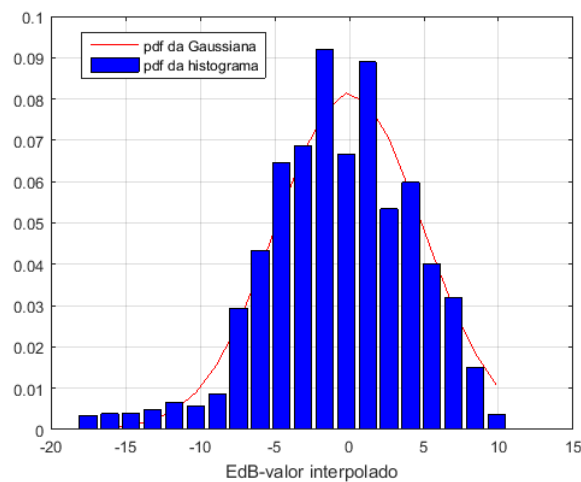
Figura 159 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Rondon Pacheco



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 160 apresenta a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a Gaussiana com média de  $-8.5954\text{e-}13$  e desvio padrão de 4.8937.

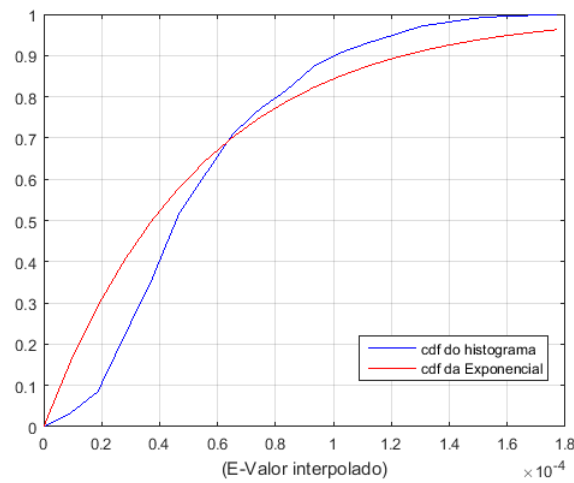
Figura 160 – pdf do histograma de Edb e pdf da gaussiana da região Rondon Pacheco



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 161 retrata a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $5.3901\text{e-}05$  e desvio padrão de  $3.2547\text{e-}05$ .

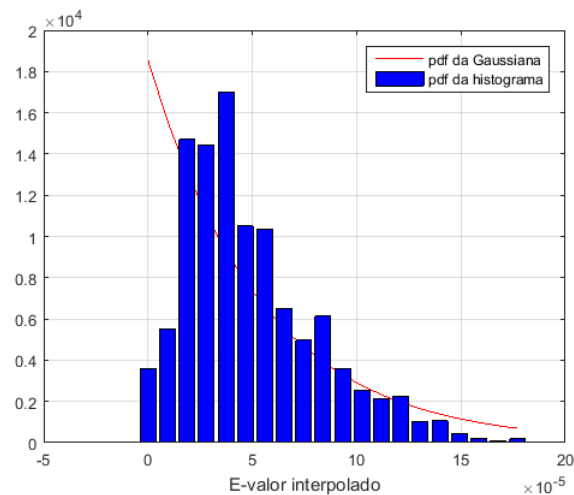
Figura 161 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Rondon Pacheco



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 162 mostra a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $5.3901\text{e-}05$  e desvio padrão de  $3.2547\text{e-}05$ .

Figura 162 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Rondon Pacheco

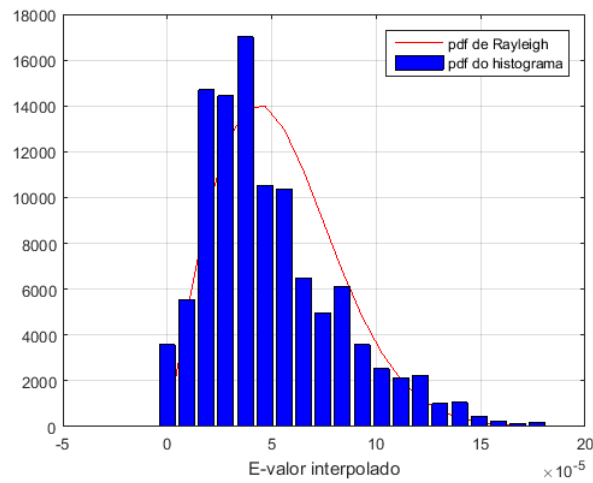


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 163 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado rayleigh com média de  $5.3901\text{e-}05$  e desvio padrão de  $3.2547\text{e-}05$ .



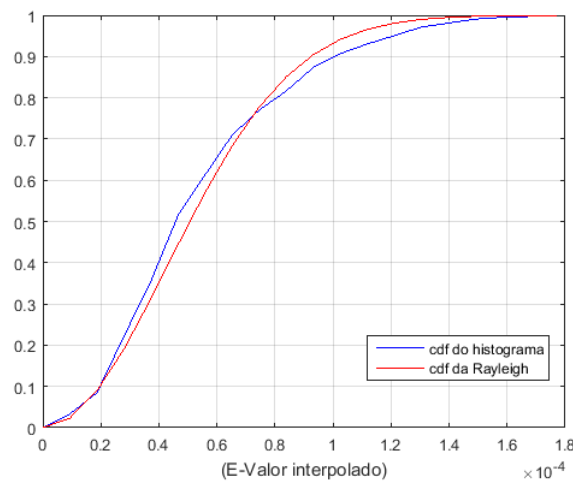
Figura 163 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Rondon Pacheco



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 164 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $5.3901\text{e-}05$  e desvio padrão de  $3.2547\text{e-}05$ .

Figura 164 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Rondon Pacheco



Fonte: Elaborada pelo autor.

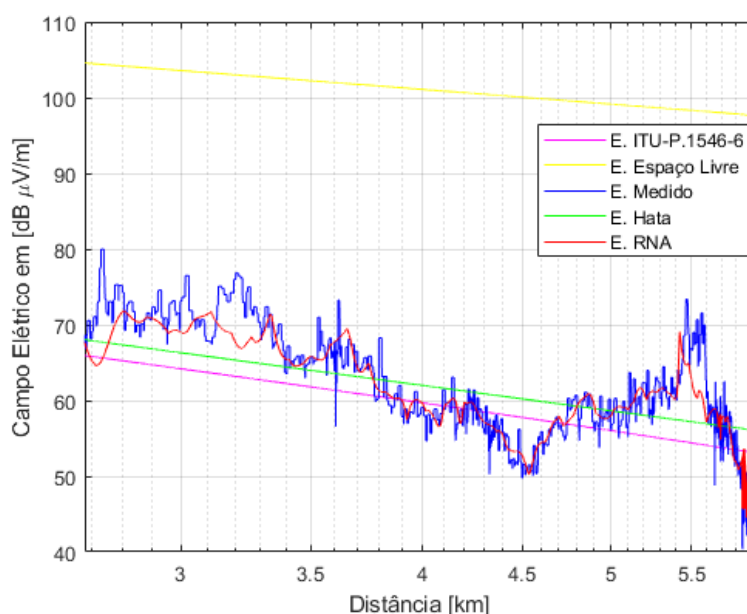
Analisando os gráficos das Figuras 159 até 164 pode-se concluir que os campos elétricos dados em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf Gaussiana.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

### 6.8.3 Comparação dos modelos de propagação na região Rondon Pacheco

Com o intuito de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico medido em relação aos modelos de propagação de ondas, na cidade de Uberlândia, calculouse o campo elétrico nas 18999 amostras da região Rondon Pacheco para cada um dos modelos de propagação definidos. A figura 165 mostra o comportamento do sinal UHF (campo medido) em relação aos modelos de propagação espaço livre, Hata, ITU-R P.1546, interpolado e RNA gerada.

Figura 165 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na região Rondon Pacheco



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 41, apresenta os resultados da análise estatística dos modelos de propagação na região Rondon Pacheco.

Tabela 41 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Rondon Pacheco

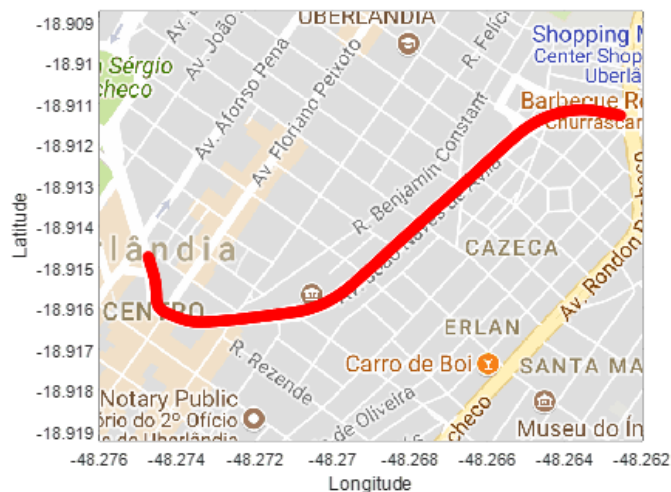
Modelo	Média	Erro médio	Erro RMS	Desvio Padrão
ITU-R P.1546-6	56,89	-1,60	8,14	5,90
Espaço Livre	99,28	40,78	42,22	7,58
Hata	59,46	0,96	8,28	6,08
RNA	57,50	-0,99	5,95	5,40

Nota-se pela a Figura 165 que visualmente o modelo que mais se comportou com o sinal medido do campo elétrico foi a RNA. E pela a Tabela 41 o modelo que apresentou o menor erro RMS foi a RNA.

## 6.9 Região Cazeca

A Região Cazeca e demonstrada na figura 166 essa região contém 5931 pontos de medição. Composta por casas e prédios de 3 a 15 pavimentos espalhados pela região. Sua arborização é de densidade média e a altitude média do terreno é 865,63 m.

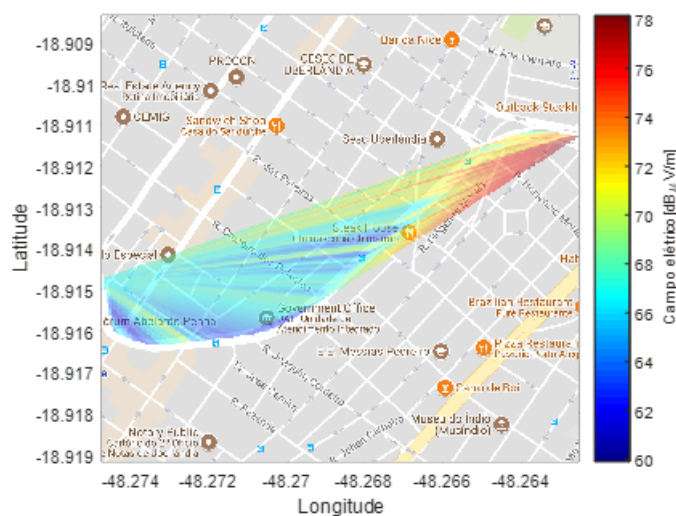
Figura 166 – Região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a medição do campo elétrico no percurso da figura 166, o próximo passo a ser realizado é gerar uma mancha da intensidade do sinal do campo elétrico na região Cazeca. A figura 167 representa a mancha da intensidade do campo elétrico na região cazeca.

Figura 167 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

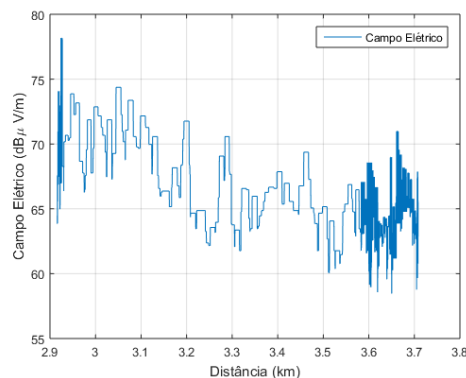
Nota-se na mancha da intensidade do sinal elétrico na figura 119 a predominância da cor cian, de acordo com a legenda do colobar dessa região a faixa de frequência que

representa a cor cian é de 55 a 60  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , onde obtém uma média da intensidade do campo elétrico de 66,39  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e constata-se que o campo elétrico máximo e mínimo são 78,16 e 58,46  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , respectivamente.

Na sequência as 5931 amostras são submetidas ao teste de normalidade *Kolmogorov-Smirnov*, a fim de verificar se as amostras resultam de uma distribuição normal. O teste de normalidade para a região Cazeca apresentou que as amostras não provêm de uma distribuição normal.

As 5931 amostras de campo elétrico da região Cazeca em relação a distância do transmissor são plotadas, conforme apresentado pela a figura 168.

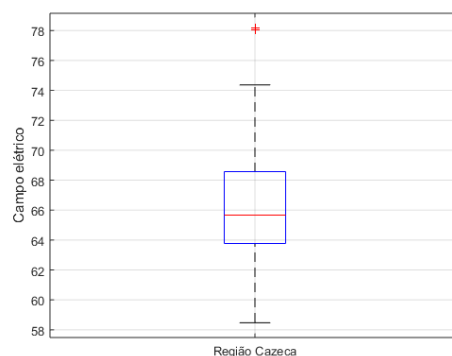
Figura 168 – Campo elétrico da região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observar-se que na figura 168, apresenta o comportamento da intensidade do sinal ao longo do percurso da região Cazeca das 5931 amostras. Essas amostras estão a uma faixa de 2,91 a 3,70 km do transmissor. Para retratar a variação do campo elétrico utiliza-se a ferramenta gráfica boxplot, que representa a alteração do campo elétrico por meio de quartis.

Figura 169 – Boxplot da região Cazeca



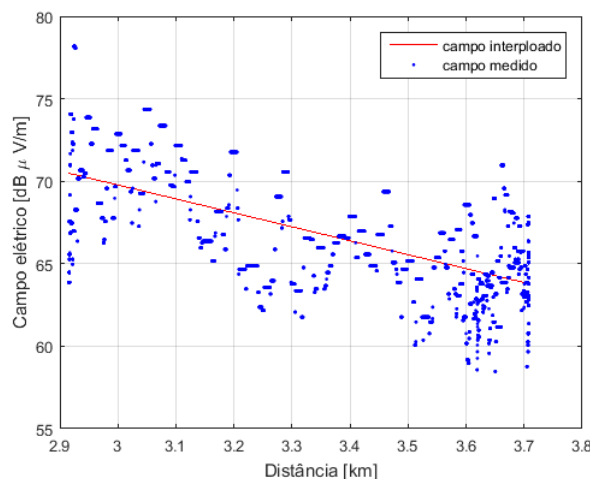
Fonte: Elaborada pelo autor.

A figura 169, apresenta o gráfico boxplot do campo elétrico da região Cazeca. O qual apresenta 56 outliers (medidas discrepantes), o limite superior de 74,3679  $dB\mu V/m$ , e o Terceiro quartil Q3 (75%) 68,5679, segundo quartil Q2 (mediana) 65,6679, primeiro quartil Q1 (25%) 63,7679 e limite inferior 58,4679.

### 6.9.1 Interpolação linear da região Cazeca

Na interpolação linear são realizadas três análises. A primeira análise é a geração de um modelo de regressão linear polinomial. Com o intuito de conceber um modelo de regressão linear polinomial das 5931 amostras coletadas, ordenou-se as amostras em ordem crescente de acordo com a distância e através da regressão linear encontrou-se o polinômio de grau 1. O qual é representado na figura 170 por uma reta em vermelho. A equação dessa reta da figura 170 e expressa por  $y = -8,4527x + 95,1314$ .

Figura 170 – Regressão linear polinomial do campo elétrico na região Cazeca

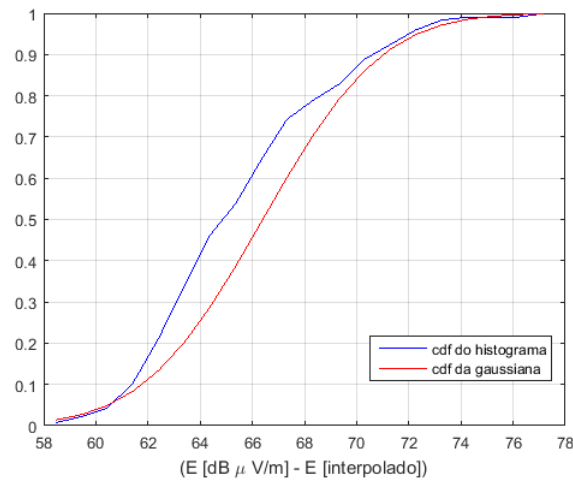


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência calcula-se a diferença das amostras de campo elétrico medido com o polinômio gerado da região em cada ponto do espaço amostral. Assim encontra-se o erro em cada amostra e analisa o comportamento do erro interpolado com as funções distribuição de probabilidade cdf e exponencial.

Na distribuição cdf normalizada, com os erros calculados, gera-se um histograma normalizado desses erros e calcula-se a soma cumulativa. Na sequência, com a média (66,3979) e o desvio padrão (3,6010) dos erros da intensidade de campo elétrico, calcula-se a função distribuição cumulativa normal (cdf). Com os valores calculados, o próximo passo é produzir o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico com a cdf normalizada do erro, apresentado na figura 171.

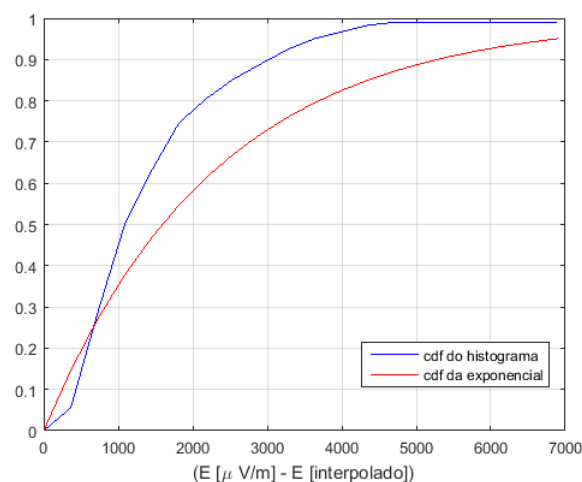
Figura 171 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima análise a ser realizada é a função distribuição cumulativa exponencial. Primeiramente converte os valores de campo elétrico para dBm e em seguida normaliza-os. Gera-se o histograma e calcula os valores de média ( $2,2929e+03$ ) e desvio padrão ( $1,1160e+03$ ). A partir da média encontrada do campo elétrico em dbm, calcula-se a função distribuição cumulativa exponencial (expcdf). Em sequência gera-se o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em dbm com a expcdf, apresentada na figura 172.

Figura 172 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os gráficos das figuras 171 e 172 podemos concluir que os erros interpolados

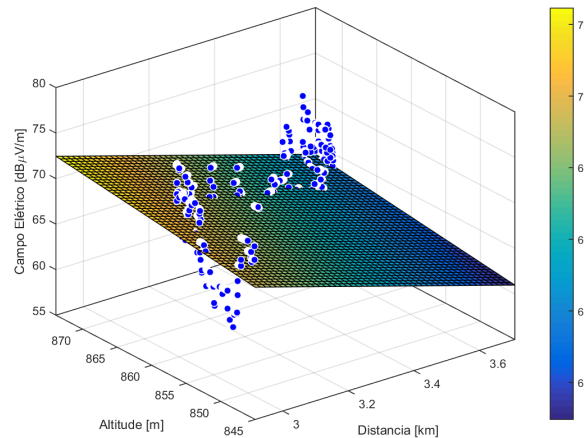
dos campos em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa normal.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa exponencial.

### 6.9.2 Interpolação bidimensional da região Cazeca

A interpolação do campo bidimensional da região Cazeca consiste em seis análises. A primeira análise realizada é a interpolação linear do campo elétrico em uma superfície em relação às variáveis altitude e distância com o campo elétrico medido, representada pela Figura 173.

Figura 173 – Intensidade do campo elétrico em relação altitude e distância da região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A superfície gerada é representada pela expressão  $E = 15,38 - 10,81 x + 0,1014 y$ . Onde  $E$  representa o campo elétrico,  $x$  a distância e  $y$  a altitude. Os coeficientes do polinômio de interpolação com 95% de intervalo de confiança são apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 – Polinômios de interpolação da região Cazeca

p00	p10	p01
15.38	-10.81	0.1014
(-2.949, 33.71)	(-11.4, -10.21)	(0.07809, 0.1246)

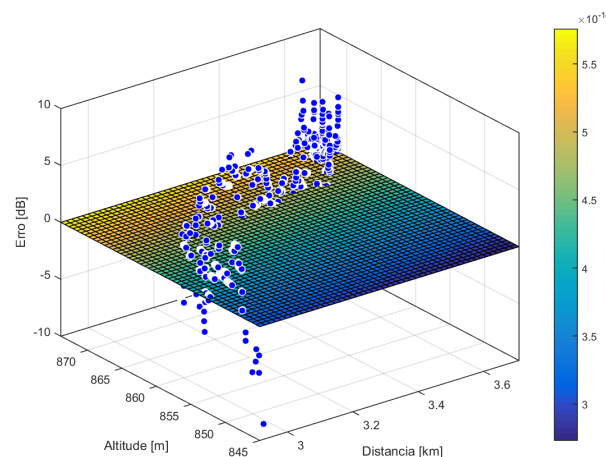
Com os dados (campo elétrico, altitude do terreno e distância do transmissor), realizou-se análises estatísticas para as 5931 amostras. A tabela 43 apresenta os resultados da região Cazeca.

Tabela 43 – Análises estatísticas da região Cazeca

	Campo elétrico	Altitude	Distância
Valor mínimo	58,46	844,99	2,91
Valor máximo	78,16	873,86	3,70
Media	66,39	865,63	3,39
Mediana	65,66	866,56	3,50
Desvio padrão	3,60	7,17	0,28
Variância	12,96	51,51	0,07

A segunda análise tem como o intuito demonstrar o comportamento do erro do campo elétrico em uma superfície com às variáveis altitude e distância. Com isso realiza-se a interpolação da diferença da intensidade de campo elétrico medido em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e com o valor interpolado. A Figura 174 apresenta o plano de interpolação e a diferença (erro) do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado.

Figura 174 – Intensidade do erro na região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise estatística encontrada para o erro do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado e mostrado na Tabela 44.

Tabela 44 – Análise estatística do erro da região Cazeca

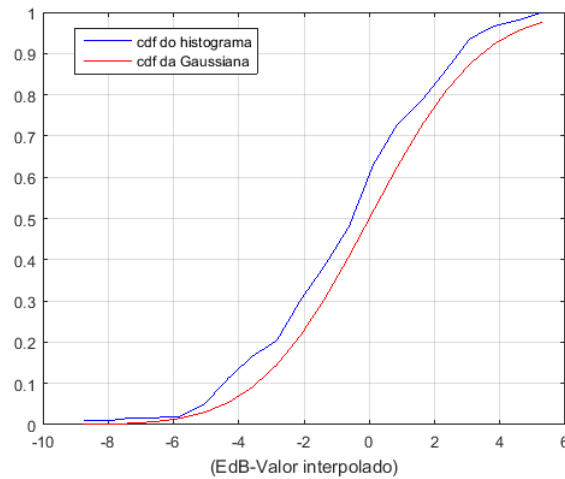
Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Medio	Mediana	Desvio Padrão	variância
-8,74	6,03	4,7798e-14	0,20	2,68	7,18

As análises subsequentes foram realizadas para a comparação: do erro do campo elétrico com as funções de distribuição gaussiana; função densidade de probabilidade (pdf) normalizada com o histograma do erro; com uma distribuição exponencial e um histograma do erro com a pdf.



A Figura 175 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo elétrico em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo elétrico e a Gaussiana com média de  $4.7798\text{e-}14$  e desvio padrão de  $2.6806$ .

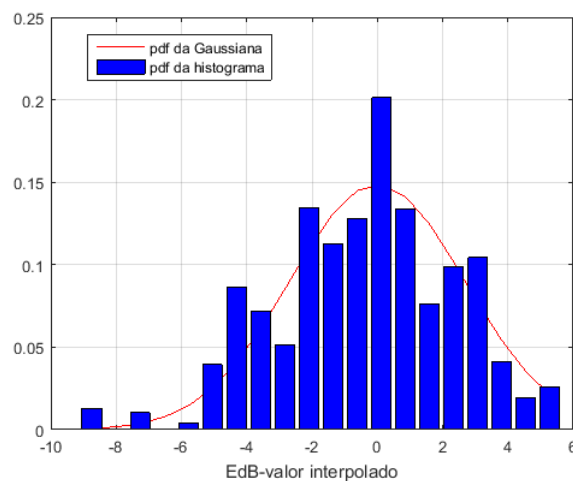
Figura 175 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 176 apresenta a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a Gaussiana com média de  $4.7798\text{e-}14$  e desvio padrão de  $2.6806$ .

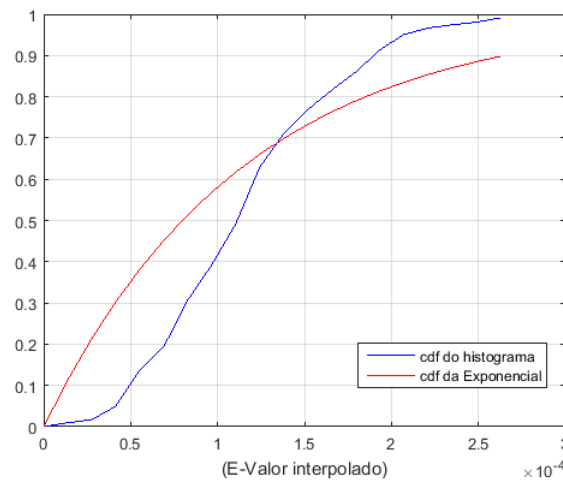
Figura 176 – pdf do histograma de EdB e pdf da gaussiana da região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 177 retrata a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $1.1498\text{e-}04$  e desvio padrão de  $5.3135\text{e-}05$ .

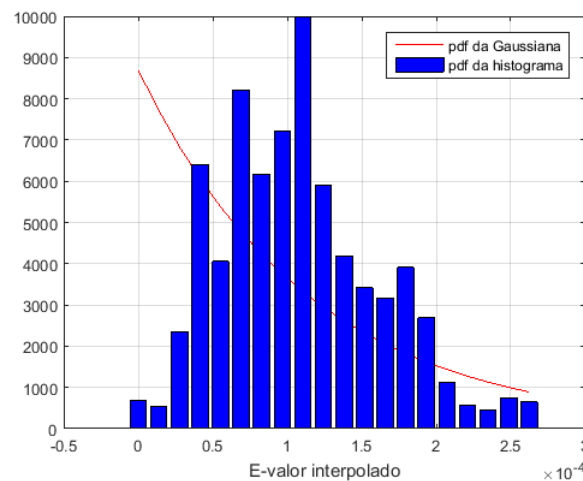
Figura 177 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 178 mostra a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $1.1498\text{e-}04$  e desvio padrão de  $5.3135\text{e-}05$ .

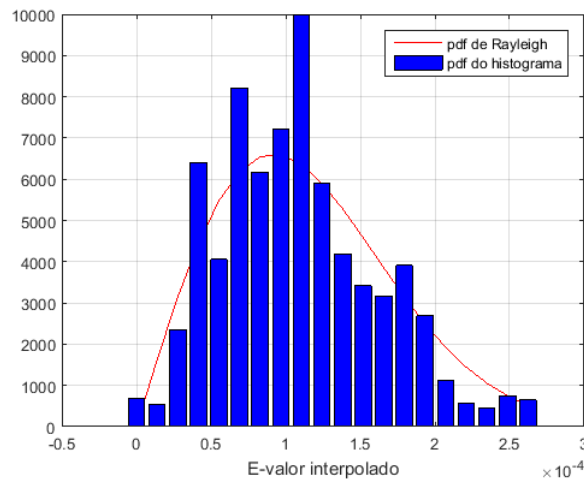
Figura 178 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 179 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $1.1498\text{e-}04$  e desvio padrão de  $5.3135\text{e-}05$ .

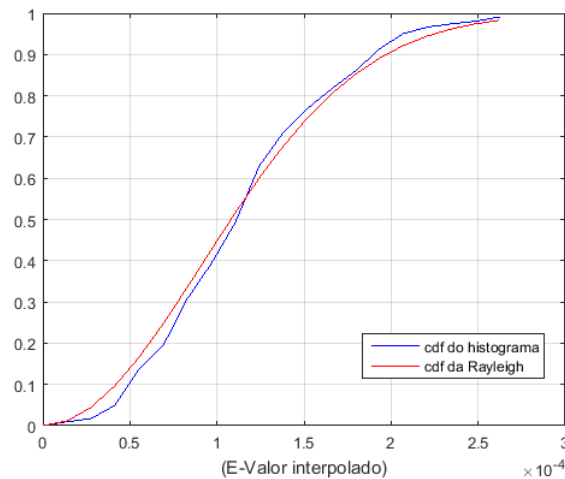
Figura 179 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 180 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $1.1498\text{e-}04$  e desvio padrão de  $5.3135\text{e-}05$ .

Figura 180 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

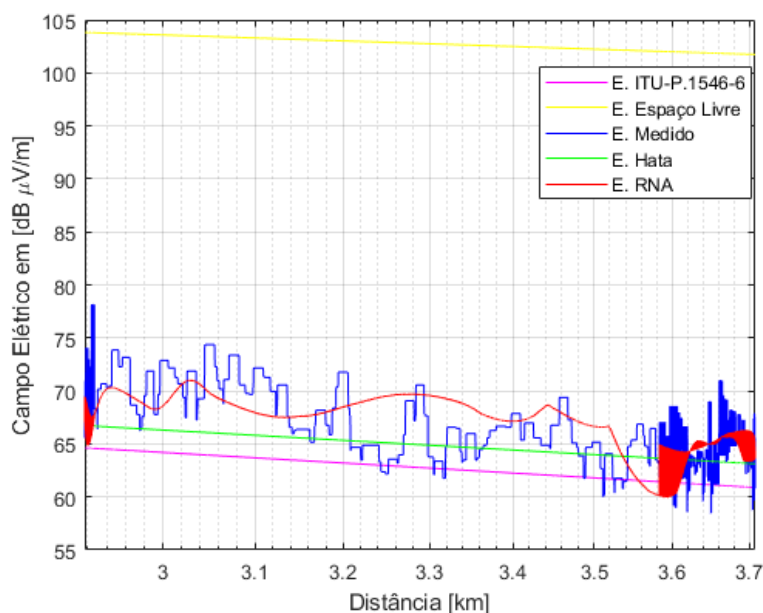
Analisando os gráficos das Figuras 175 até 180 pode-se concluir que os campos elétricos dados em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf Gaussiana.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

### 6.9.3 Comparação dos modelos de propagação na região Cazeca

Com o intuito de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico medido em relação aos modelos de propagação de ondas, na cidade de Uberlândia, calculou-se o campo elétrico nas 5931 amostras da região Cazeca para cada um dos modelos de propagação definidos. A figura 181 mostra o comportamento do sinal UHF (campo medido) em relação aos modelos de propagação espaço livre, Hata, ITU-R P.1546, interpolado e RNA gerada.

Figura 181 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na Região Cazeca



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 45, apresenta os resultados da análise estatística dos modelos de propagação na região Cazeca.

Tabela 45 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Cazeca

Modelo	Média	Erro médio	Erro RMS	Desvio Padrão
ITU-R P.1546-6	61,22	-5,17	9,81	8,28
Espaço Livre	100,79	34,39	36,89	4,88
Hata	63,36	-3,02	9,12	8,33
RNA	65,12	-1,26	9	8,28

Nota-se pela a Figura 181 que visualmente o modelo que mais se comportou com o sinal medido do campo elétrico foi a RNA. E pela a Tabela 45 o modelo que apresentou o menor erro RMS foi a RNA.

## 6.10 Região Martins

A Região Martins é demonstrada na figura 182 essa região tem 15545 pontos de medição. Ela é composta por casas e poucos prédios de 5 a 10 pavimentos espalhados pela a região. Sua arborização é de densidade média e a altitude média do terreno é de 864,04m.

Figura 182 – Região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a medição do campo elétrico no percurso da figura 182, o próximo passo a ser realizado é gerar uma mancha da intensidade do sinal do campo elétrico na região Martins. A figura 183 representa a mancha da intensidade do campo elétrico na região Martins.

Figura 183 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

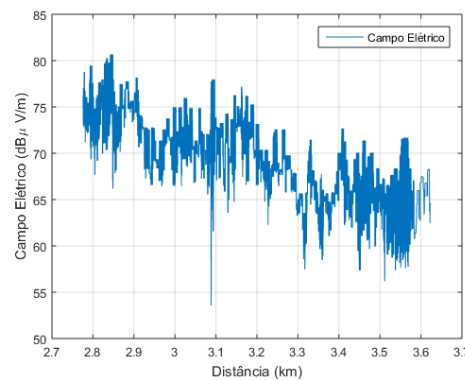
Nota-se na mancha da intensidade do sinal elétrico na figura 183 a predominância da cor cian, de acordo com a legenda do colobar dessa região a faixa de frequência que

representa a cor cian é de 65 a 69  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , onde obtém uma média da intensidade do campo elétrico de 69,67  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e constata-se que o campo elétrico máximo e mínimo são 80,66 e 53,56  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , respectivamente.

Na sequência as 15545 amostras são submetidas ao teste de normalidade *Kolmogorov-Smirnov*, a fim de verificar se as amostras resultam de uma distribuição normal. O teste de normalidade para a região Martins apresentou que as amostras não provém de uma distribuição normal.

As 15545 amostras de campo elétrico da região Martins em relação a distância do transmissor são plotadas, conforme apresentado pela a figura 184.

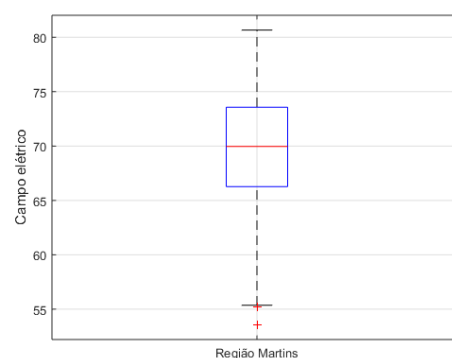
Figura 184 – Campo elétrico da região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observar-se que na figura 184, apresenta o comportamento da intensidade do sinal ao longo do percurso da região Martins das 15545 amostras. Essas amostras estão a uma faixa de 2,77 a 3,62 km do transmissor. Para retratar a variação do campo elétrico utiliza-se a ferramenta gráfica boxplot, que representa a alteração do campo elétrico por meio de quartis.

Figura 185 – Boxplot da região Martins



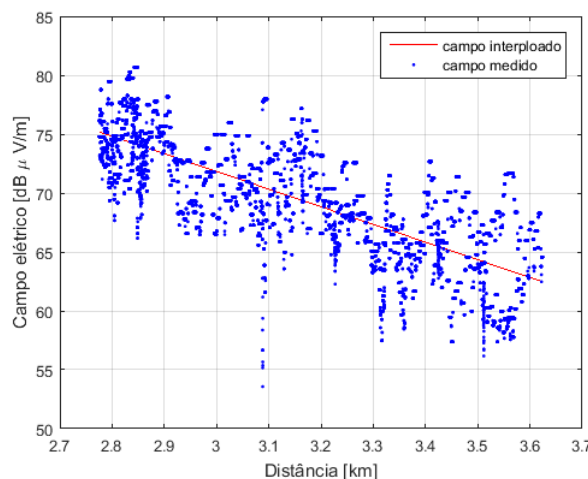
Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na figura 185, apresenta o gráfico boxplot do campo elétrico da região Martins. O qual apresenta 2 outliers (medidas discrepantes), o limite superior de  $80,6679 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , e o Terceiro quartil Q3 (75%)  $73,5679$ , segundo quartil Q2 (mediana)  $69,9679$ , primeiro quartil Q1 (25%)  $66,2679$  e limite inferior  $55,3679$ .

### 6.10.1 Interpolação linear da região Martins

Na interpolação linear são realizadas três análises. A primeira análise é a geração de um modelo de regressão linear polinomial. Com o intuito de conceber um modelo de regressão linear polinomial das 15545 amostras coletadas, ordenou-se as amostras em ordem crescente de acordo com a distância e através da regressão linear encontrou-se o polinômio de grau 1. O qual é representado na figura 186 por uma reta em vermelho. A equação dessa reta da figura 186 e expressa por  $y = -14,9912x + 116,8042$ .

Figura 186 – Regressão linear polinomial do campo elétrico na região Martins

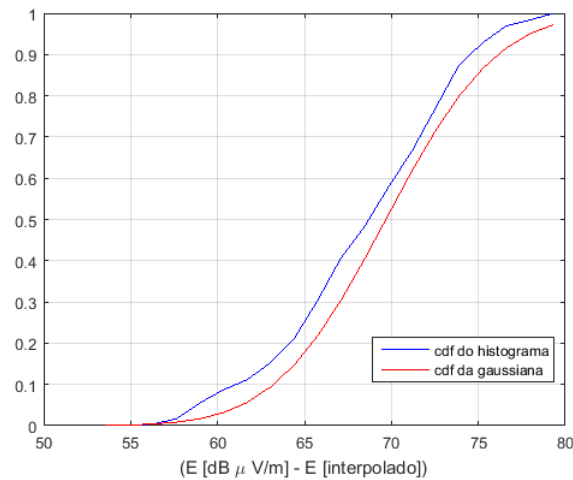


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência calcula-se a diferença das amostras de campo elétrico medido com o polinômio gerado da região Martins em cada ponto do espaço amostral. Assim encontra-se o erro em cada amostra e analisa o comportamento do erro interpolado com as funções distribuição de probabilidade cdf e exponencial.

Na distribuição cdf normalizada, com os erros calculados, gera-se um histograma normalizado desses erros e calcula-se a soma cumulativa. Na sequência, com a média ( $69,6755$ ) e o desvio padrão ( $5,0276$ ) dos erros da intensidade de campo elétrico, calcula-se a função distribuição cumulativa normal (cdf). Com os valores calculados, o próximo passo é produzir o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico com a cdf normalizada do erro, apresentado na figura 187.

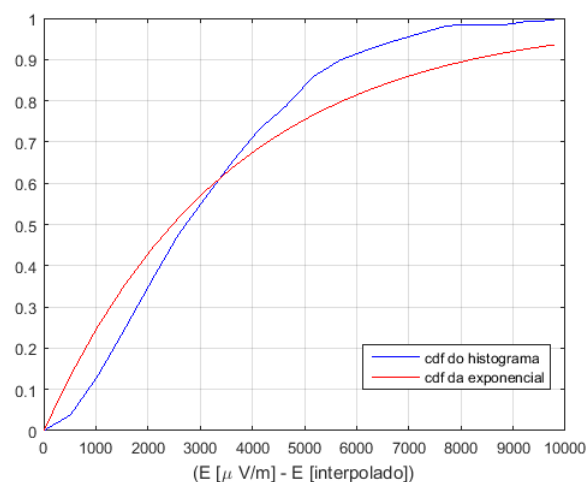
Figura 187 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima análise a ser realizada é a função distribuição cumulativa exponencial. Primeiramente converte os valores de campo elétrico para dBm e em seguida normaliza-os. Gera-se o histograma e calcula os valores de média ( $3,5616e+03$ ) e desvio padrão ( $1,9508e+03$ ). A partir da média encontrada do campo elétrico em dbm, calcula-se a função distribuição cumulativa exponencial (expcdf). Em sequência gera-se o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em dbm com a expcdf, apresentada na figura 188.

Figura 188 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os gráficos das figuras 187 e 188 podemos concluir que os erros interpolados



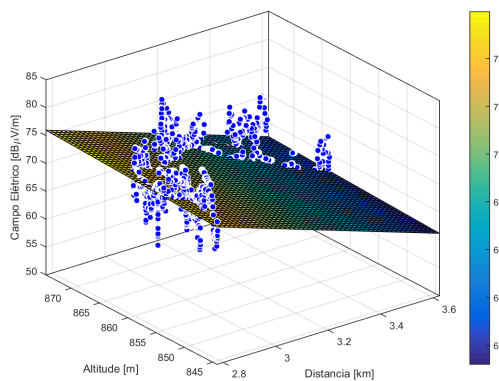
dos campos em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa normal.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa exponencial.

### 6.10.2 Interpolação bidimensional da região Martins

A interpolação do campo bidimensional da região Martins consiste em seis análises. A primeira análise realizada é a interpolação linear do campo elétrico em uma superfície em relação às variáveis altitude e distância com o campo elétrico medido, representada pela Figura 189.

Figura 189 – Intensidade do campo elétrico em relação altitude e distância na região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

A superfície gerada é representada pela expressão  $E = 81,77 - 15,86 x + 0,0437 y$ . Onde  $E$  representa o campo elétrico,  $x$  a distância e  $y$  a altitude. Os coeficientes do polinômio de interpolação com 95% de intervalo de confiança são apresentados na Tabela 46.

Tabela 46 – Polinômios de interpolação da região Martins

p00	p10	p01
81.77	-15.86	0.0437
(74.49, 89.05)	(-16.12, -15.59)	(0.03465, 0.05275)

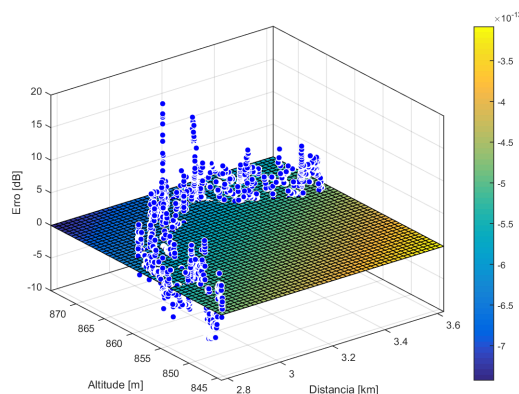
Com os dados (campo elétrico, altitude do terreno e distância do transmissor), realizou-se análises estatísticas para as 15545 amostras. A tabela 47 apresenta os resultados da região Martins.

Tabela 47 – Análises estatísticas da região Martins

	Campo elétrico	Altitude	Distância
Valor mínimo	53,56	844,26	2,77
Valor máximo	80,66	874,45	3,62
Media	69,67	864,04	3,14
Mediana	69,96	865,65	3,12
Desvio padrão	5,02	7,53	0,26
Variância	25,27	56,72	0,06

A segunda análise tem como o intuito demonstrar o comportamento do erro do campo elétrico em uma superfície com às variáveis altitude e distância. Com isso realiza-se a interpolação da diferença da intensidade de campo elétrico medido em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e com o valor interpolado. A Figura 190 apresenta o plano de interpolação e a diferença (erro) do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado.

Figura 190 – Intensidade do erro na região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise estatística encontrada para o erro do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado e mostrado na Tabela 48.

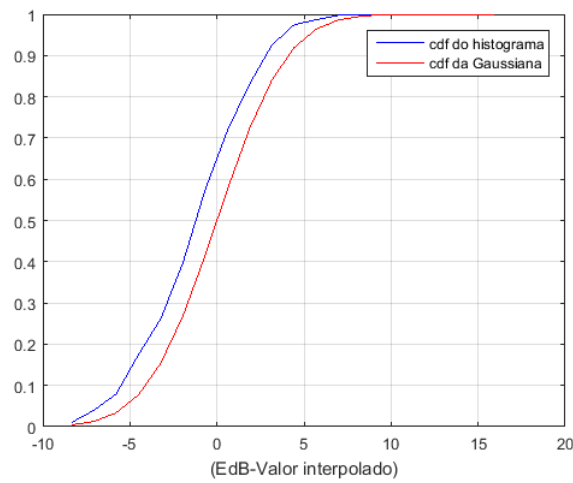
Tabela 48 – Análise estatística do erro da região Martins

Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Medio	Mediana	Desvio Padrão	variância
-8,34	17,21	-5,7674e-13	0,1305	3,1641	10,01

As análises subsequentes foram realizadas para a comparação: do erro do campo elétrico com as funções de distribuição gaussiana; função densidade de probabilidade (pdf) normalizada com o histograma do erro; com uma distribuição exponencial e um histograma do erro com a pdf.

A Figura 191 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo elétrico em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo elétrico e a Gaussiana com o média de  $-5.7674\text{e-}13$  e desvio padrão de 3.1641.

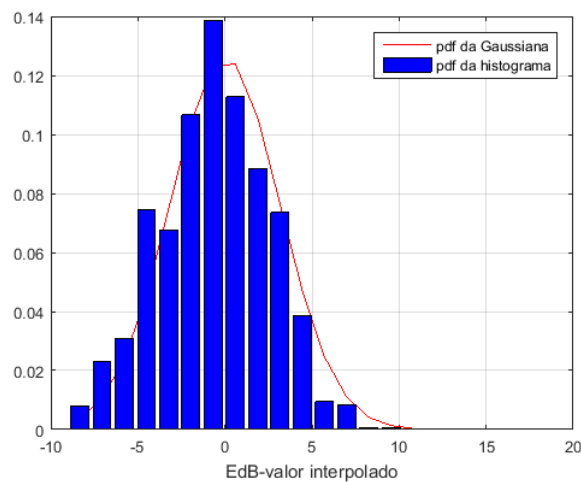
Figura 191 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 192 apresenta a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a Gaussiana com média de  $-5.7674\text{e-}13$  e desvio padrão de 3.1641.

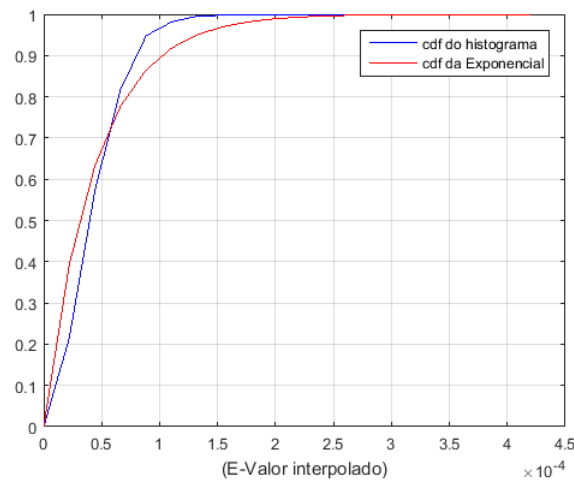
Figura 192 – pdf do histograma de Edb e pdf da gaussiana da região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 193 retrata a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $4.4116\text{e-}05$  e desvio padrão de  $2.5998\text{e-}05$ .

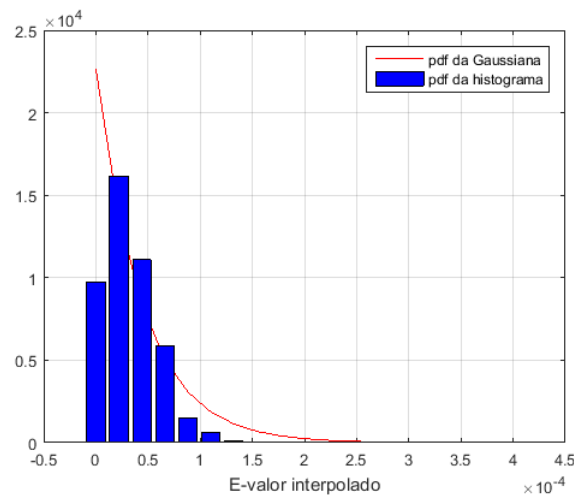
Figura 193 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 194 mostra a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $4.4116\text{e-}05$  e desvio padrão de  $2.5998\text{e-}05$ .

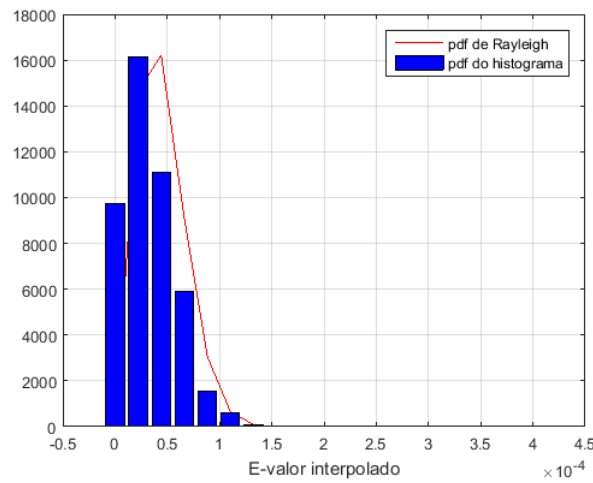
Figura 194 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 195 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $4.4116\text{e-}05$  e desvio padrão de  $2.5998\text{e-}05$ .

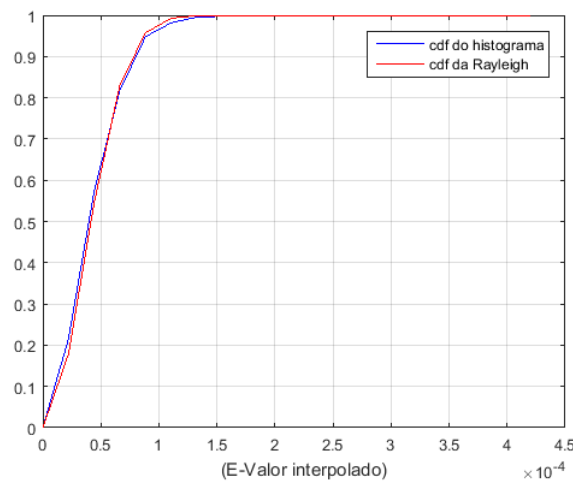
Figura 195 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 196 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $4.4116\text{e-}05$  e desvio padrão de  $2.5998\text{e-}05$ .

Figura 196 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

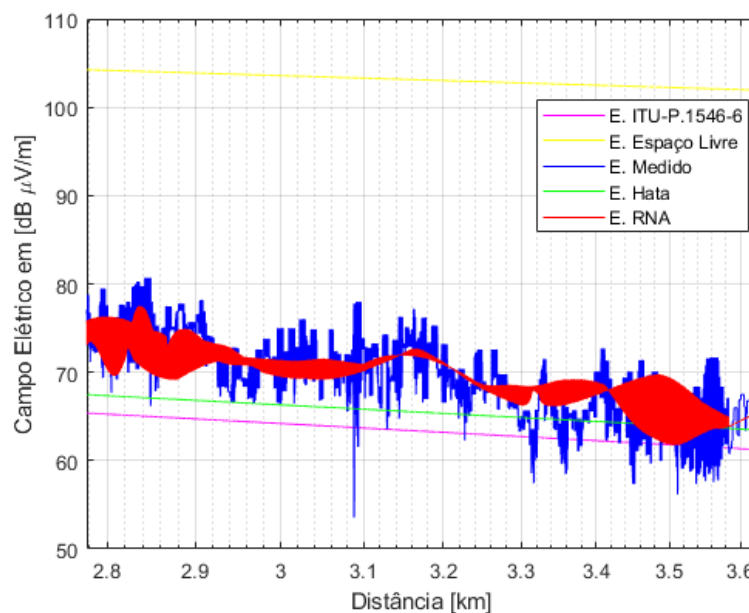
Analisando os gráficos das Figuras 191 até 196 pode-se concluir que os campos elétricos dados em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf Gaussiana.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

### 6.10.3 Comparação dos modelos de propagação na região Martins

Com o intuito de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico medido em relação aos modelos de propagação de ondas, na cidade de Uberlândia, calculou-se o campo elétrico nas 15545 amostras da região Martins para cada um dos modelos de propagação definidos. A figura 197 mostra o comportamento do sinal UHF (campo medido) em relação aos modelos de propagação espaço livre, Hata, ITU-R P.1546, interpolado e RNA gerada.

Figura 197 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na Região Martins



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 49, apresenta os resultados da análise estatística dos modelos de propagação na região Martins.

Tabela 49 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Martins

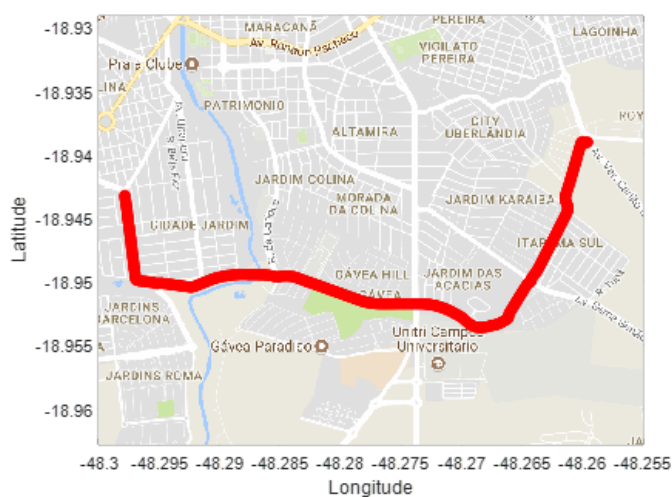
Modelo	Média	Erro médio	Erro RMS	Desvio Padrão
ITU-R P.1546-6	63,10	-6,57	9,51	6,51
Espaço Livre	102,53	32,86	34,28	5,58
Hata	65,22	-4,45	8,31	6,38
RNA	69,48	-0,18	6,72	6,10

Nota-se pela a Figura 197 que visualmente o modelo que mais se comportou com o sinal medido do campo elétrico foi a RNA. E pela a Tabela 49 o modelo que apresentou o menor erro RMS foi a RNA.

## 6.11 Região Gávea

A Região Gávea e demonstrada na figura 198, sendo composta por 22908 pontos de medição. Constatou-se que nessa região ela é composta por casas de 2 pavimentos e poucos prédios de até 15 pavimentos. Sua arborização é de densidade alta e a altitude média do terreno é 831,16 m.

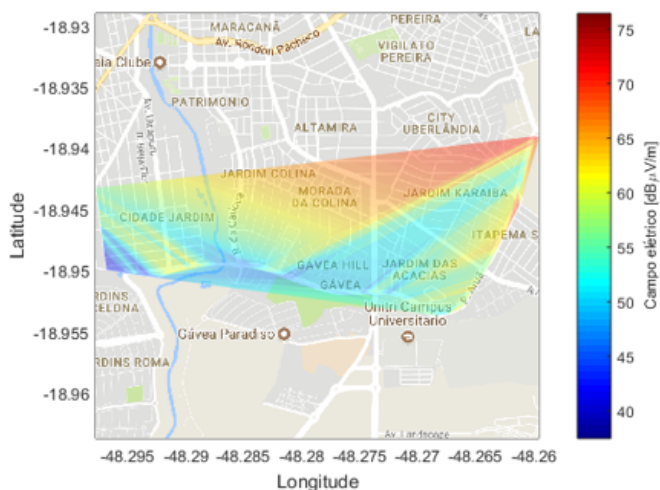
Figura 198 – Região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a medição do campo elétrico no percurso da figura 198, o próximo passo a ser realizado é gerar uma mancha da intensidade do sinal do campo elétrico na região Gávea. A figura 199 representa a mancha da intensidade do campo elétrico na região Gávea.

Figura 199 – Mancha da intensidade do campo elétrico na região Gávea.

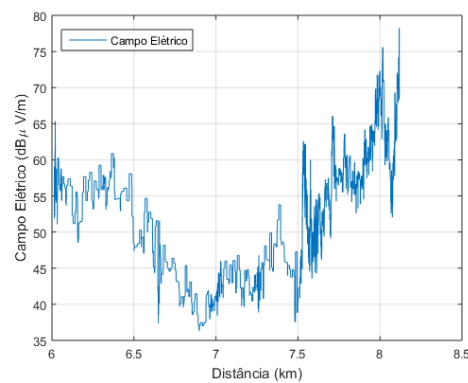


Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se na mancha da intensidade do sinal elétrico na figura 199 a predominância da cor cian, de acordo com a legenda do colobar dessa região a faixa de frequência que representa a cor cian é de 47 a 57 dB $\mu$ V/m, onde obtém uma média da intensidade do campo elétrico de 53,92 dB $\mu$ V/m e constata-se que o campo elétrico máximo e mínimo são 78,26 e 36,36 dB $\mu$ V/m, respectivamente.

Na sequência as 22908 amostras são submetidas ao teste de normalidade *Kolmogorov-Smirnov*, a fim de verificar se as amostras resultam de uma distribuição normal. O teste de normalidade para a região Gávea apresentou que as amostras não provém de uma distribuição normal. As 22908 amostras de campo elétrico da região Gávea em relação a distância do transmissor são plotadas, conforme apresentado pela a figura 200.

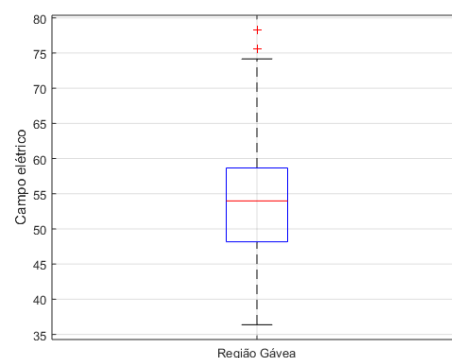
Figura 200 – Campo elétrico região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observar-se que na figura 200, apresenta o comportamento da intensidade do sinal ao longo do percurso da região Gávea das 22908 amostras. Essas amostras estão a uma faixa de 6 a 8,16 km do transmissor. Para retratar a variação do campo elétrico utiliza-se a ferramenta gráfica boxplot, que representa a alteração do campo elétrico por meio de quartis.

Figura 201 – Boxplot da região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

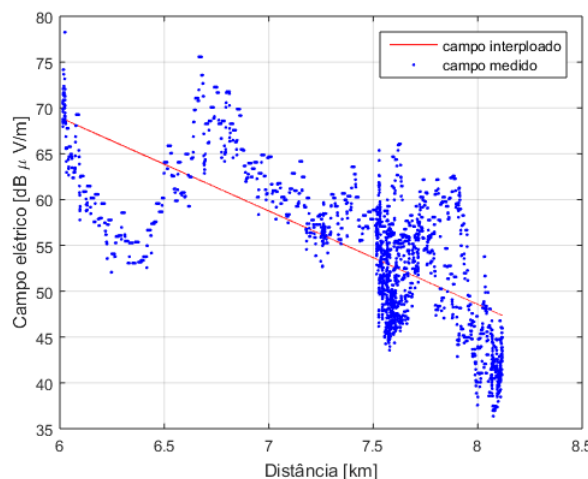


Nota-se na figura 201, apresenta o gráfico boxplot do campo elétrico da região central. O qual apresenta 89 outliers (medidas discrepantes), o limite superior de  $74,1679 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ , e o Terceiro quartil Q3 (75%)  $58,6679$ , segundo quartil Q2 (mediana)  $53,9679$ , primeiro quartil Q1 (25%)  $48,1679$  e limite inferior  $36,3679$ .

### 6.11.1 Interpolação linear da região Gávea

Na interpolação linear são realizadas três análises. A primeira análise é a geração de um modelo de regressão linear polinomial. Com o intuito de conceber um modelo de regressão linear polinomial das 22908 amostras coletadas, ordenou-se as amostras em ordem crescente de acordo com a distância e através da regressão linear encontrou-se o polinômio de grau 1. O qual é representado na figura 202 por uma reta em vermelho. A equação dessa reta da figura 202 e expressa por  $y = -10,1954x + 130,1237$ .

Figura 202 – Regressão linear polinomial do campo elétrico na região Gávea

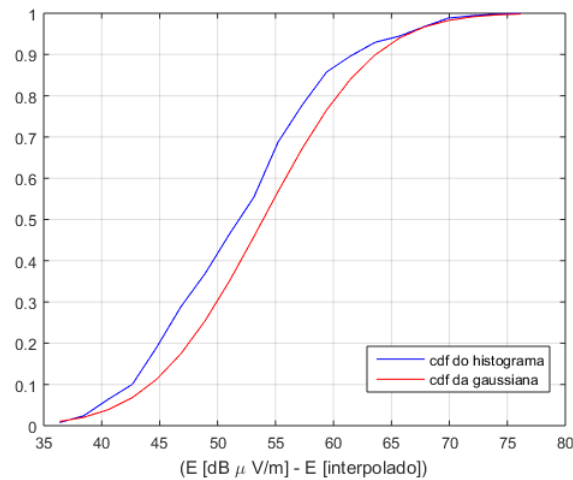


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência calcula-se a diferença das amostras de campo elétrico medido com o polinômio gerado da região em cada ponto do espaço amostral. Assim encontra-se o erro em cada amostra e analisa o comportamento do erro interpolado com as funções distribuição de probabilidade cdf e exponencial.

Na distribuição cdf, com os erros calculados, gera-se um histograma normalizado desses erros e calcula-se a soma cumulativa. Na sequência, com a média ( $53,9247$ ) e o desvio padrão ( $7,5688$ ) dos erros da intensidade de campo elétrico, calcula-se a função distribuição cumulativa normal (cdf). Com os valores calculados, o próximo passo é produzir o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico com a cdf normalizada do erro, apresentado na figura 203.

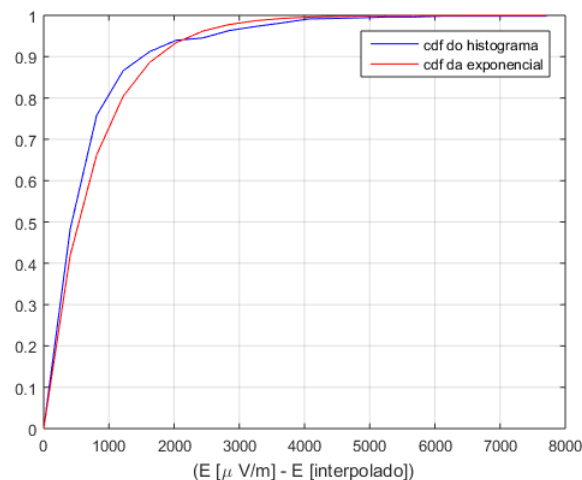
Figura 203 – cdf do histograma normalizado e cdf da gaussiana do campo elétrico da região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

A próxima análise a ser realizada é a função distribuição cumulativa exponencial. Primeiramente converte os valores de campo elétrico para dBm e em seguida normaliza-os. Gera-se o histograma e calcula os valores de média (747,5443) e desvio padrão (856,3903). A partir da média encontrada do campo elétrico em dbm, calcula-se a função distribuição cumulativa exponencial (expcdf). Em sequência gera-se o gráfico comparativo da cumulativa do erro do campo elétrico em dbm com a expcdf, apresentada na figura 204.

Figura 204 – cdf do histograma normalizado e cdf da exponencial do campo elétrico da região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

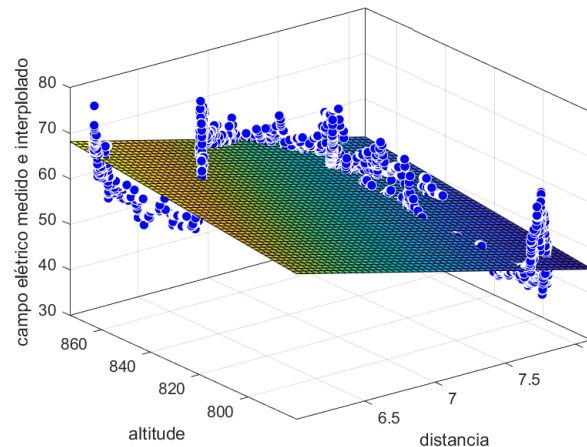
Analisando os gráficos das figuras 203 e 204 podemos concluir que os erros interpolados dos campos em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa normal.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma função distribuição cumulativa exponencial.

### 6.11.2 Interpolação bidimensional da região Gávea

A interpolação do campo bidimensional da região Gávea consiste em seis análises. A primeira análise realizada é a interpolação linear do campo elétrico em uma superfície em relação às variáveis altitude e distância com o campo elétrico medido, representada pela Figura 205.

Figura 205 – Intensidade do campo elétrico em relação altitude e distância da região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

A superfície gerada é representada pela expressão  $E = 57,62 - 7,866 x + 0,06628 y$ . Onde  $E$  representa o campo elétrico,  $x$  a distância e  $y$  a altitude. Os coeficientes do polinômio de interpolação com 95% de intervalo de confiança são apresentados na Tabela 50.

Tabela 50 – Polinômios de interpolação da região Gávea

p00	p10	p01
57.62	-7.866	0.06628
(54.18, 61.07)	(-8.031, -7.701)	(0.06325, 0.06931)

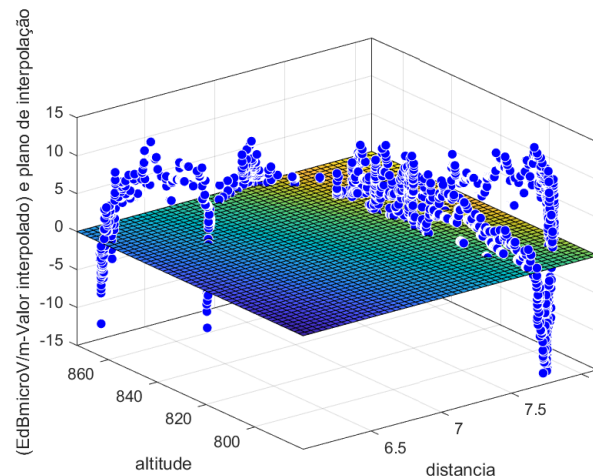
Com os dados (campo elétrico, altitude do terreno e distância do transmissor), realizou-se análises estatísticas para as 22908 amostras. A tabela 51 apresenta os resultados da região Gávea.

Tabela 51 – Análises estatísticas da região Gávea

Análise estatística	Campo elétrico	Altitude	Distância
Valor mínimo	36,36	780	6,01
Valor máximo	78,26	872,82	8,11
Media	53,92	831,16	7,47
Mediana	53,96	836,32	836,32
Desvio padrão	7,56	28,71	0,52
Variância	57,28	824,51	0,27

A segunda análise tem como o intuito demonstrar o comportamento do erro do campo elétrico em uma superfície com às variáveis altitude e distância. Com isso realiza-se a interpolação da diferença da intensidade de campo elétrico medido em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  e com o valor interpolado. A Figura 206 apresenta o plano de interpolação e a diferença (erro) do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado.

Figura 206 – Intensidade do erro na região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise estatística encontrada para o erro do campo elétrico medido com o campo elétrico interpolado e mostrado na Tabela 52.

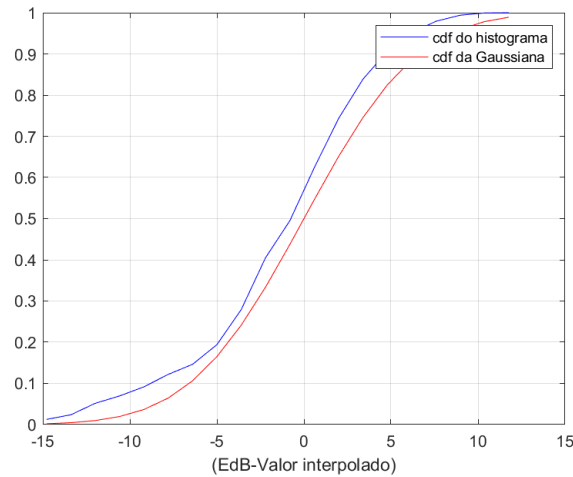
Tabela 52 – Análise estatística do erro da região Gávea

Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Medio	Mediana	Desvio Padrão	variância
-14,78	13,16	1,28468e-13	0,6650	5,13	26,32

As análises subsequentes foram realizadas para a comparação: do erro do campo elétrico com as funções de distribuição gaussiana; função densidade de probabilidade (pdf) normalizada com o histograma do erro; com uma distribuição exponencial e um histograma do erro com a pdf.

A Figura 207 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo elétrico em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo elétrico e a Gaussiana com média de  $1,2847\text{e-}13$  e desvio padrão de  $5.1311$ .

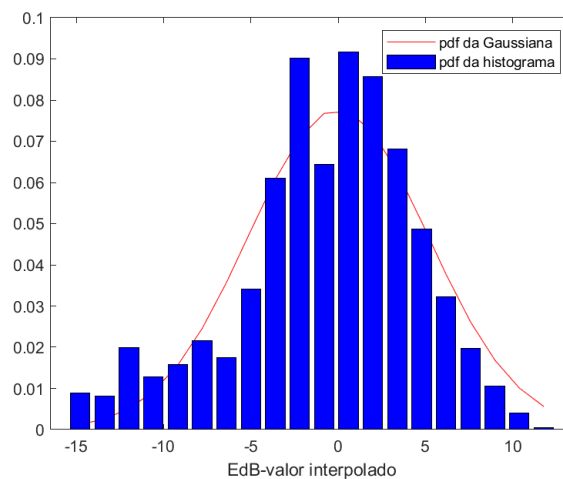
Figura 207 – cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da gaussiana da região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 208 apresenta a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a Gaussiana com média de  $1,2847\text{e-}13$  e desvio padrão de  $5.1311$ .

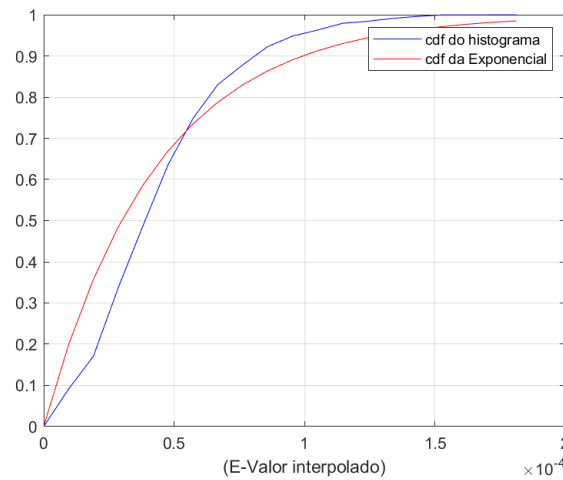
Figura 208 – pdf do histograma de EdB e pdf da gaussiana da região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 209 retrata a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $4.3103\text{e-}05$  e desvio padrão de  $2.7689\text{e-}05$ .

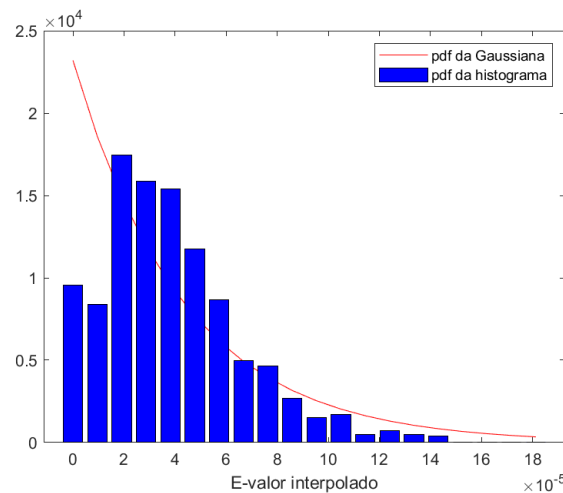
Figura 209 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da exponencial da região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 210 mostra a pdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado do campo e a exponencial com média de  $4.3103\text{e-}05$  e desvio padrão de  $2.7689\text{e-}05$ .

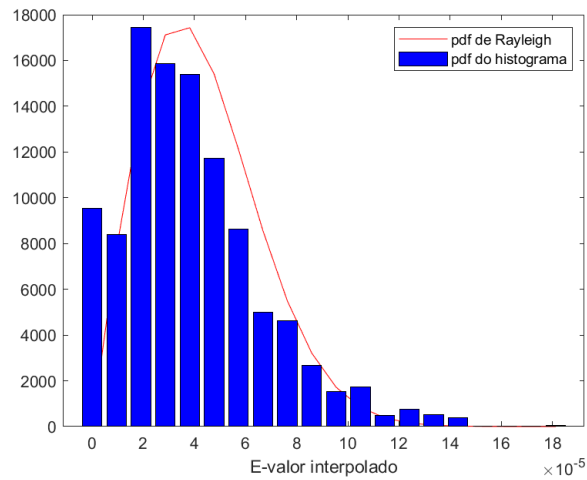
Figura 210 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial da região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 211 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $4.3103\text{e-}05$  e desvio padrão de  $2.7689\text{e-}05$ .

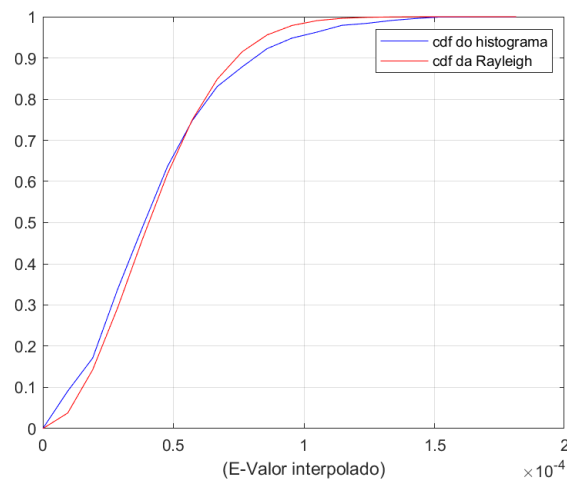
Figura 211 – pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da rayleigh da região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 212 mostra a cdf do histograma normalizado da diferença do campo em  $\mu\text{V}/\text{m}$  com o valor interpolado Rayleigh com média de  $4.3103\text{e-}05$  e desvio padrão de  $2.7689\text{e-}05$ .

Figura 212 – cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da rayleigh da região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

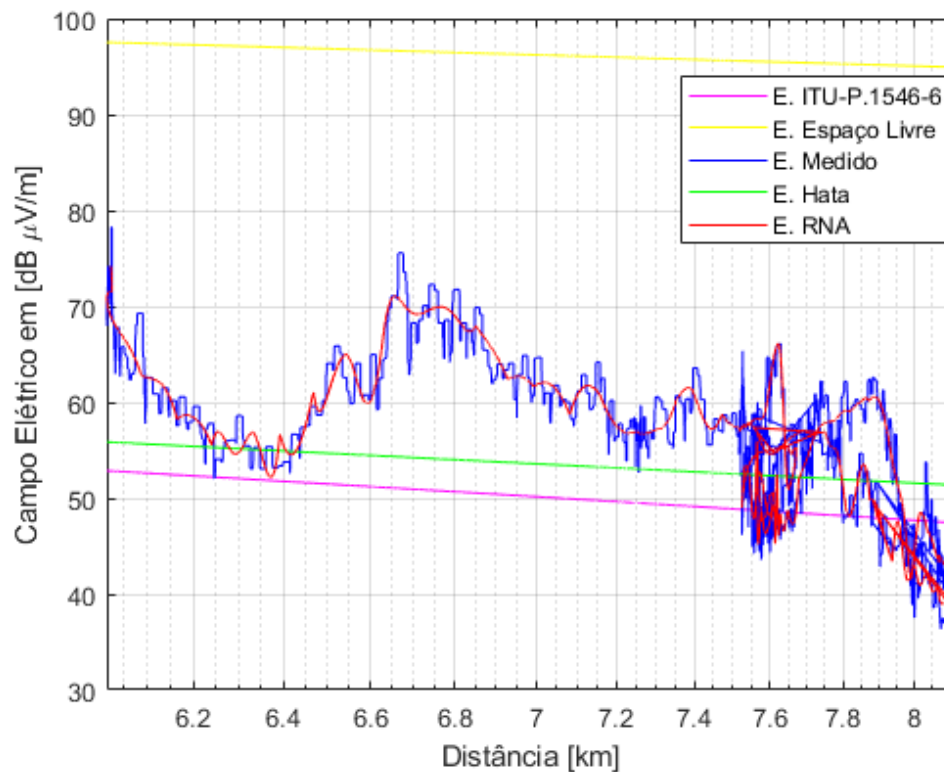
Analisando os gráficos das Figuras 207 até 212 pode-se concluir que os campos elétricos dados em:

- 1:  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf Gaussiana.
- 2:  $\mu\text{V}/\text{m}$  se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

### 6.11.3 Comparação dos modelos de propagação da região Gávea

Com o intuito de verificar o comportamento da intensidade do campo elétrico medido em relação aos modelos de propagação de ondas, na cidade de Uberlândia, calculou-se o campo elétrico nas 22908 amostras da região Gávea para cada um dos modelos de propagação definidos. A figura 213 mostra o comportamento do sinal UHF (campo medido) em relação aos modelos de propagação espaço livre, Hata, ITU-R P.1546, interpolado e RNA gerada.

Figura 213 – Comportamento do campo elétrico medido com os modelos de propagação na Região Gávea



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 53, apresenta os resultados da análise estatística dos modelos de propagação na região Gávea.

Tabela 53 – Análise estatística dos modelos de propagação na região Gávea

Modelo	Média	Erro médio	Erro RMS	Desvio Padrão
ITU-R P.1546-6	48,77	-5,14	9,06	5,95
Espaço Livre	95,26	41,33	42,42	7,18
Hata	52,40	-1,51	7,84	5,19
RNA	53,67	-0,25	4,17	3,74



Nota-se pela a Figura 213 que visualmente o modelo que mais se comportou com o sinal medido do campo elétrico foi a RNA. E pela a Tabela 53 o modelo que apresentou o menor erro RMS foi a RNA.

## 6.12 Análise do desvanecimento do campo elétrico nos viadutos das Regiões

Para a realização do desvanecimento dos viadutos, foi realizado um levantamento nas regiões, onde foram coletadas as amostras dos sinais UHF, ao final dessa verificação, foi encontrado sete viadutos em três regiões, como pode observar na tabela 54.

Tabela 54 – Localização dos Viadutos

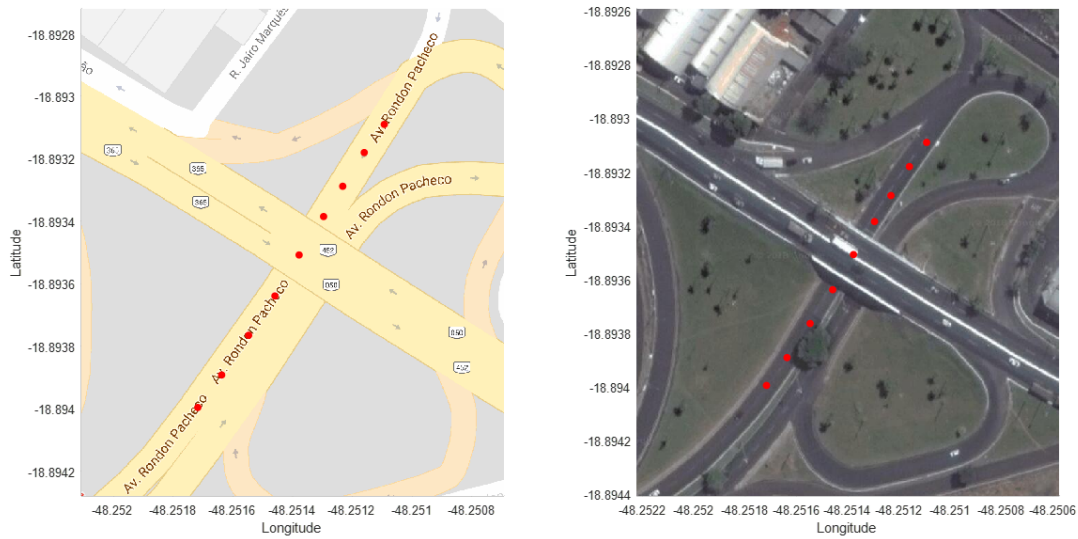
Viaduto	Latitude	Longitude	Região
1	-18,893474	-48,251353	Brasil
2	-18,911416	-48,262354	Rondon Pacheco
3	-18,918913	-48,26682	Rondon Pacheco
4	-18,9243	-48,271566	Rondon Pacheco
5	-18,925055	-48,272276	Rondon Pacheco
6	-18,929818	-48,277748	Rondon Pacheco
7	-18,926568	-48,295872	Daniel Fonseca

A partir de ter realizado a filtragem das rotas para verificar a quantidade de viadutos existente nelas. O próximo passo a ser realizado foi coletar o sinal de campo elétrico se aproximando do viaduto a 40, 30, 20 e 10 metros de distância, e essas mesmas distâncias foram coletadas ao se distanciando do viaduto. Com os dados coletados o próximo passo a ser realizado e uma análise do desvanecimento do sinal em relação ao viaduto. Para ter desvanecimento em determinado ponto analisado o valor encontrado da subtração deverá ser positivo, caso o valor encontrado na subtração do campo elétrico debaixo do viaduto com o ponto analisado for negativo o ponto analisado não tem desvanecimento.

### 6.12.1 Viaduto 1

A figura 214 ilustra os pontos que foram analisados para o desvanecimento do primeiro viaduto. Este viaduto se encontra a uma distância de 1,42 Km do transmissor.

Figura 214 – Viaduto 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 55 mostra o resultado dos desvanecimentos do viaduto 1 para todas as distâncias, o valor do campo elétrico embaixo do viaduto é  $76,1678 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ .

Tabela 55 – Desvanecimentos Viaduto 1

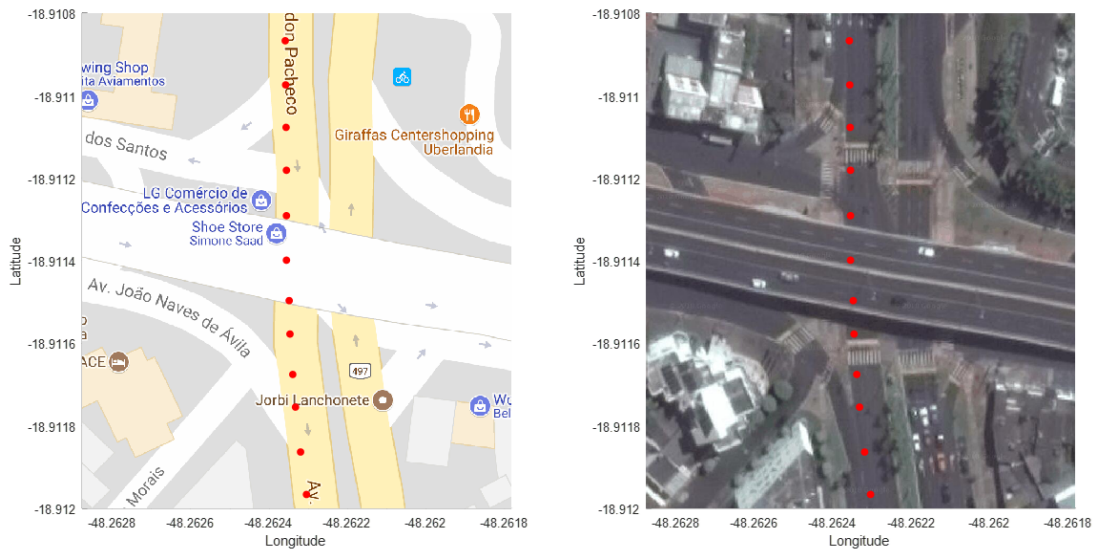
Distância	Latitude	Longitude	Campo Elétrico	Desvanecimento
40	-18,8931	-48,2511	89,1678	13
30	-18,8932	-48,2512	86,1678	10
20	-18,8933	-48,2512	80,1678	4
10	-18,8934	-48,2513	81,1678	5
Viaduto	-18,8935	-48,2514	76,1678	-
10	-18,8936	-48,2515	77,1678	1
20	-18,8938	-48,2515	84,1678	8
30	-18,8939	-48,2516	85,1678	9
40	-18,894	-48,2517	89,1678	13

No primeiro viaduto conseguimos observar a partir da tabela 55 que todas as distâncias têm desvanecimento.

### 6.12.2 Viaduto 2

A figura 215 ilustra os pontos que foram analisados para o desvanecimento do segundo viaduto. Este viaduto se encontra a uma distância de 2,90 Km do transmissor.

Figura 215 – Viaduto 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que pela a figura 215 temos três amostras/pontos embaixo do viaduto, para a análise do desvanecimento foi realizado uma média dos sinais que estão embaixo do viaduto e adotou-se como padrão para realizar os cálculos. A tabela 56 mostra o resultado dos desvanecimentos do viaduto 2 para todas as distâncias, o valor do campo elétrico embaixo do viaduto é 72,4178 dB $\mu$ V/m.

Tabela 56 – Desvanecimentos Viaduto 2

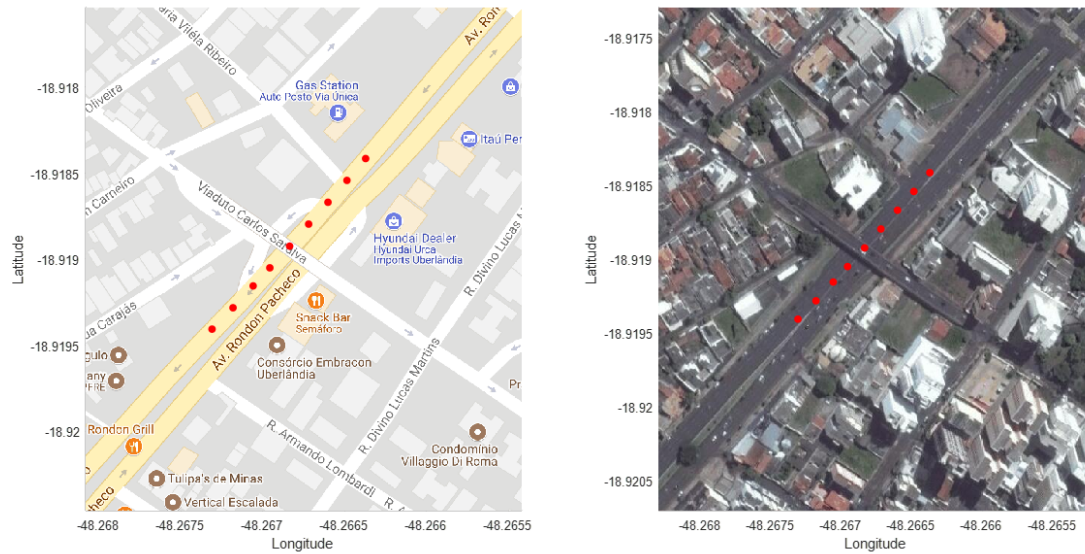
Distância	Latitude	Longitude	Campo Elétrico	Desvanecimento
40	-18,910868	-48,2624	71,1678	-1,25
30	-18,910975	-48,2624	72,1678	-0,25
20	-18,911078	-48,2624	73,1678	0,75
10	-18,911182	-48,2624	72,1678	-0,25
Viaduto	-18,911292	-48,2624	72,4178	-
10	-18,911677	-48,2623	73,1678	0,75
20	-18,911756	-48,2623	72,1678	-0,25
30	-18,911865	-48,2623	74,1678	1,75
40	-18,911968	-48,2623	71,1678	-1,25

Nota-se pela a tabela 56 que para o segundo viaduto apenas temos três desvanecimentos, ao se aproximando do viaduto a 20 m de distância e saindo em 10 e 30 metros. Nos outros pontos analisados não obtivemos desvanecimento.

### 6.12.3 Viaduto 3

A figura 216 ilustra os pontos que foram analisados para o desvanecimento do terceiro viaduto. Este viaduto se encontra a uma distância de 3,77 Km do transmissor.

Figura 216 – Viaduto 3



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 57 mostra o resultado dos desvanecimentos do viaduto 3 para todas as distâncias, o valor do campo elétrico embaixo do viaduto é 63,1678 dB $\mu$ V/m.

Tabela 57 – Desvanecimentos Viaduto 3

Distância	Latitude	Longitude	Campo Elétrico	Desvanecimento
40	-18,9184	-48,2664	64,1678	1
30	-18,9185	-48,2665	65,1678	2
20	-18,9187	-48,2666	61,1678	-2
10	-18,9188	-48,2667	61,1678	-2
Viaduto	-18,9189	-48,2668	63,1678	-
10	-18,9191	-48,267	64,1678	1
20	-18,9192	-48,2671	60,1678	-3
30	-18,9193	-48,2672	59,1678	-4
40	-18,9194	-48,2673	61,1678	-2

Já no terceiro viaduto observa-se pela a tabela 57 que temos apenas três desvanecimentos, ao se aproximar do viaduto em 40 e 30 metros de distância e ao sair do viaduto a 10 metros. Já nas outras distâncias não tivemos desvanecimentos.

#### 6.12.4 Viaduto 4

A figura 217 ilustra os pontos que foram analisados para o desvanecimento do quarto viaduto. Este viaduto se encontra a uma distância de 4,46 Km do transmissor.

Figura 217 – Viaduto 4



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 58 mostra o resultado dos desvanecimentos do viaduto 4 para todas as distâncias, o valor do campo elétrico embaixo do viaduto é 52,1678 dB $\mu$ V/m.

Tabela 58 – Desvanecimentos Viaduto 4

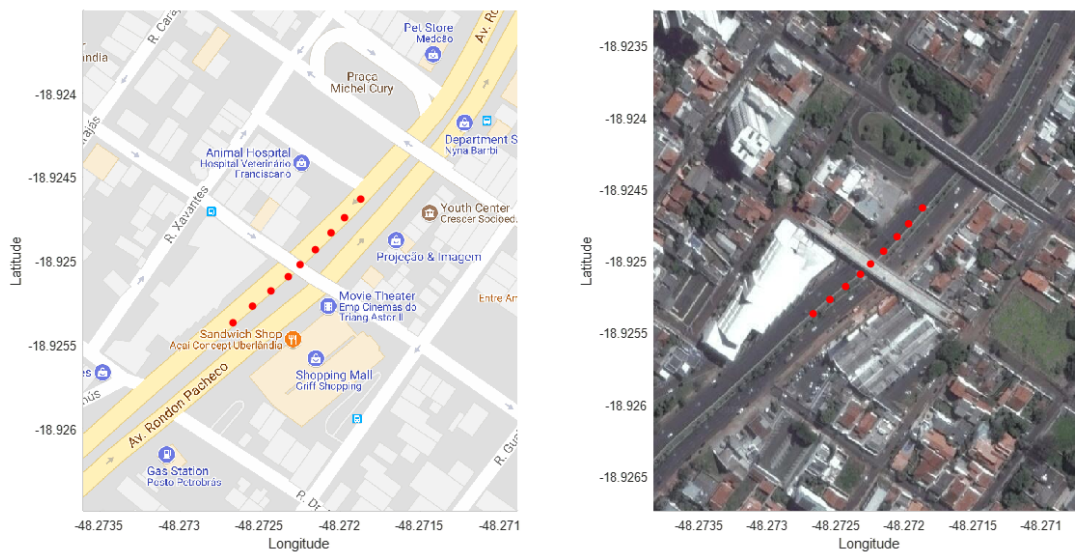
Distância	Latitude	Longitude	Campo Elétrico	Desvanecimento
40	-18,9239	-48,2713	53,1678	1
30	-18,924	-48,2713	53,1678	1
20	-18,9241	-48,2714	52,1678	0
10	-18,9242	-48,2715	56,1678	4
Viaduto	-18,9243	-48,2716	52,1678	-
10	-18,9244	-48,2717	52,1678	0
20	-18,9245	-48,2718	51,1678	-1
30	-18,9246	-48,2719	54,1678	2
40	-18,9247	-48,272	51,1678	-1

Observa-se que na tabela 58 o quarto viaduto temos ao se aproximando do viaduto temos desvanecimento nas distâncias analisadas e ao sair encontramos desvanecimento apenas a 30 metros de distância. Nota-se que ao sair do viaduto a 10 metros o valor do desvanecimento é nulo e 20 e 40 metros não temos desvanecimento.

6.12.5 Viaduto 5

A figura 218 ilustra os pontos que foram analisados para o desvanecimento do quinto viaduto. Este viaduto se encontra a uma distância de 4,55 Km do transmissor.

Figura 218 – Viaduto 5



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 59 mostra o resultado dos desvanecimentos do viaduto 5 para todas as distâncias, o valor do campo elétrico embaixo do viaduto é 56,1678 dB $\mu$ V/m.

Tabela 59 – Desvanecimentos Viaduto 5

Distância	Latitude	Longitude	Campo Elétrico	Desvanecimento
40	-18,9246	-48,2719	54,1678	-2
30	-18,9247	-48,272	51,1678	-5
20	-18,9248	-48,2721	54,1678	-2
10	-18,9249	-48,2722	51,1678	-5
Viaduto	-18,925	-48,2722	56,1678	-
10	-18,9251	-48,2723	55,1678	-1
20	-18,9252	-48,2724	56,1678	0
30	-18,9253	-48,2725	55,1678	-1
40	-18,9254	-48,2727	54,1678	-2

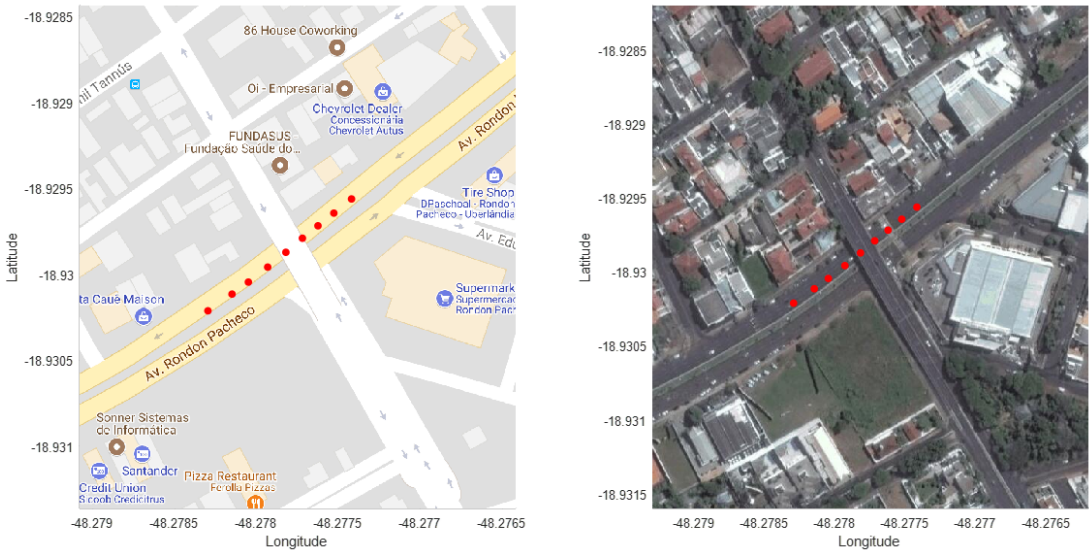
Para o quinto viaduto nota-se que não tivemos desvanecimento em nenhuma direção, apenas ao sair do viaduto a 20 metros o valor do desvanecimento é nulo.

### 6.12.6 Viaduto 6

A figura 219 ilustra os pontos que foram analisados para o desvanecimento do sexto viaduto. Este viaduto se encontra a uma distância de 5,23 Km do transmissor.



Figura 219 – Viaduto 6



Fonte: Elaborada pelo autor.

A tabela 60 mostra o resultado dos desvanecimentos do viaduto 6 para todas as distâncias, o valor do campo elétrico embaixo do viaduto é 62,1678 dB $\mu$ V/m.

Tabela 60 – Desvanecimentos Viaduto 6

Distância	Latitude	Longitude	Campo Elétrico	Desvanecimento
40	-18,9296	-48,2774	64,1678	2
30	-18,9296	-48,2775	59,1678	-3
20	-18,9297	-48,2776	58,1678	-4
10	-18,9298	-48,2777	61,1678	-1
Viaduto	-18,9299	-48,2778	62,1678	-
10	-18,93	-48,2779	63,1678	1
20	-18,93	-48,278	63,1678	1
30	-18,9301	-48,2781	61,1678	-1
40	-18,9302	-48,2783	65,1678	3

Para o sexto viaduto, temos desvanecimentos a 40 metros do viaduto ao se aproximar e ao sair temos a 10, 20 e 40 metros. Nas outras distâncias analisadas não temos desvanecimento.

### 6.12.7 Viaduto 7

A figura 220 ilustra os pontos que foram analisados para o desvanecimento do sétimo viaduto. Este viaduto se encontra a uma distância de 5,83 Km do transmissor.

Figura 220 – Viaduto 7



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que pela a figura 220 temos dois pontos/amostras embaixo do viaduto, para a análise do desvanecimento foi realizado uma média dos sinais que estão embaixo do viaduto e adotou-se como padrão para realizar os cálculos. A tabela 61 mostra o resultado dos desvanecimentos do viaduto 7 para todas as distâncias, o valor do campo elétrico embaixo do viaduto é  $37,6678 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ .

Tabela 61 – Desvanecimentos Viaduto 7

Distância	Latitude	Longitude	Campo Elétrico	Desvanecimento
40	-18,927029	-48,2956	51,1678	13,5
30	-18,926939	-48,2957	49,1678	11,5
20	-18,92683	-48,2957	47,1678	9,5
10	-18,92672	-48,2958	41,1678	3,5
Viaduto	-18,926514	-48,2959	37,6678	-
10	-18,926405	-48,296	37,1678	-0,5
20	-18,926352	-48,2961	40,1678	2,5
30	-18,926275	-48,2961	42,1678	4,5
40	-18,926225	-48,2962	43,1678	5,5

No sétimo viaduto apenas não temos desvanecimento ao sair do viaduto a 10 metros, nas outras distâncias temos desvanecimentos.

### 6.12.8 Correlação dos viadutos

A tabela 62 temos os desvanecimentos de todos os setes viadutos analisados anteriormente, nota-se que os valores positivos são os pontos onde temos desvanecimentos, já os valores negativos não temos desvanecimento e o valor 0 temos um desvanecimento nulo.



Para podermos definir uma correlação da análise desses viadutos, encontrou-se a média de cada valor de campo elétrico em determinada distância como pode-se observar na tabela 62. Observar-se com a média dos desvanecimentos dos viadutos todas as distâncias tem o desvanecimento.

Tabela 62 – Desvanecimento dos sete viadutos

Distância	1	2	3	4	5	6	7	Média
40	13	-1,25	1	1	-2	2	13,5	3,89
30	10	-0,25	2	1	-5	-3	11,5	2,32
20	4	0,75	-2	0	-2	-4	9,5	0,89
10	5	-0,25	-2	4	-5	-1	3,5	0,60
Viaduto								
10	1	0,75	1	0	-1	1	-0,5	0,32
20	8	-0,25	-3	-1	0	1	2,5	1,03
30	9	1,75	-4	2	-1	-1	4,5	1,60
40	13	-1,25	-2	-1	-2	3	5,5	2,17

Pela a tabela 63 temos os valores dos desvanecimentos aproximando e saindo do viaduto nas distâncias de 10, 20, 30 e 40 metros.

Tabela 63 – Desvanecimentos dos Viadutos pela a distância

Distância	Aproximando	Saindo	Desvanecimento
40	3,89	2,17	3,03
30	2,32	1,60	1,96
20	0,89	1,03	0,96
10	0,60	0,32	0,92

A partir da análise realizada nos sete viadutos, podemos concluir-se que o desvanecimento dos viadutos nas distâncias de 10, 20, 30 e 40 metros do viaduto são 0.92, 0.96, 1.96 e 3.03 dB $\mu$ V/m.

## 6.13 Correlação das Regiões

### 6.13.1 Boxplot das regiões

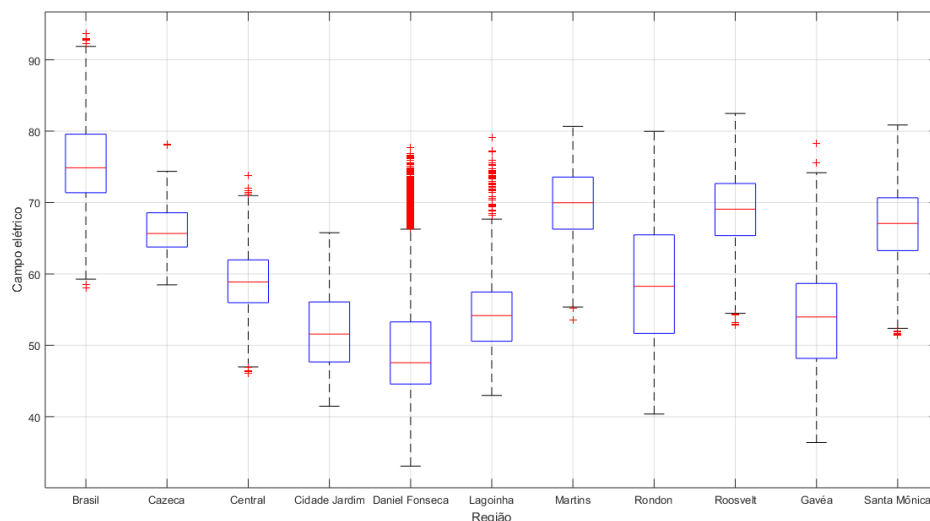
Após realizar as análises individuais das onzes regiões, o próximo passo a ser realizado é apresentar as correlações das regiões através do gráfico boxplot. Com o gráfico boxplot é possível avaliar visualmente a distribuição empírica do dados, através da mediana, *outliers*, limite superior e inferior, 1º e 3º quartil.

A partir dos boxplots encontrados nas análises realizadas, agrupou-se os bloxplots das onzes regiões examinadas, com o intuito de comparar e analisar o desempenho da variabilidade da intensidade do campo elétrico nas regiões. É possível perceber visualmente que para cada região a mediana (Q2) da intensidade do campo elétrico são completamente

diferentes umas das outras ao observar o boxplot da comparação das regiões da figura 221.

Elaborando uma escala de ordem de grandeza da maior a menor intensidade de campo elétrico das regiões, temos que as regiões Brasil, Martins, Roosevelt, Santa Mônica, Cazeca, Rondon, Central, Gávea, Lagoinha, Cidade Jardim e Daniel Fonseca.

Figura 221 – Comparação boxplot das regiões



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 64 apresenta os resultados encontrados no gráfico do boxplot de cada uma das onzes regiões analisadas e apresenta o valor médio de cada parâmetro do gráfico boxplot.

Tabela 64 – Resultados dos parâmetros do boxplot das regiões de Uberlândia

Região	Outliers	superior	Q3	mediana (Q2)	Q1	inferior
Brasil	211	91,86	79,56	74,86	71,36	59,26
Cazeca	56	74,36	68,56	65,66	63,76	58,46
Central	177	73,76	61,96	58,86	55,96	46,06
Cidade Jardim	0	65,76	56,06	51,56	47,66	41,46
Daniel Fonseca	3731	66,26	53,26	47,56	44,56	33,06
Lagoinha	789	67,66	54,46	54,16	50,56	42,96
Martins	2	80,66	73,56	69,96	66,26	55,36
Rondon Pacheco	0	79,96	65,46	58,26	51,66	40,36
Roosevelt	45	82,46	72,66	69,06	65,36	54,46
Gávea	89	74,16	58,66	53,96	48,16	36,36
Santa Mônica	85	80,86	70,66	67,06	63,26	53,36
Média	471,36	70,70	64,98	60,99	57,14	47,37

E notório pela figura 221 que apenas as regiões Rondon e Cidade Jardim não apresentaram nenhum outliers, já as demais regiões identificaram medidas discrepantes em suas

regiões. A Tabela 64 apresenta os valores discrepantes de cada amostra. Observar que na região Daniel Fonseca possui 3731 outliers, seguindo da região Lagoinha com 789. Na tabela 64 apresenta os valores médio de cada indicador do boxplot da cidade de Uberlândia. Na qual a média das amostras de campo elétrico discrepantes são de 471,36. O valor médio do limite superior é de 70,70 dB $\mu$ V/m. E os terceiro, segundo e primeiro quartil são respectivamente 64,98; 60,99 e 57,14 dB $\mu$ V/m. E o valor médio do limite inferior é de 47,37 dB $\mu$ V/m.

Nota-se que a maior intensidade do campo elétrico na Cidade de Uberlândia encontra-se na região Brasil e a menor intensidade do campo elétrico situa-se na região Daniel Fonseca, conforme demonstrado pela figura 221 e Tabela 64. Realizando uma análise comparativa do perfil urbanístico entre as duas regiões, pode-se perceber melhor os resultados encontrados nessas regiões. A região do Bairro Brasil tem um altitude média do terreno de 883,43 m, a intensidade media do campo elétrico é de 75,84 dB $\mu$ V/m e a distância da região ao transmissor é na faixa de 0,90 a 2,66 km. Já região Daniel Fonseca a altitude média do terreno é de 799,70 m, a intensidade do campoo elétrico média é de 50,89 dB $\mu$ V/m e a distância da região ao transmissor está em uma faixa de 5,01 a 6,36 km. A partir dos perfis urbanístico, pode-se constatar que o perfil de elevação do terreno intervem bastante com a baixa e alta intensidade do campo elétrico na região.

O boxplot demonstrou o comportamento das regiões em termos de mediana e quartis. Contudo, é importante realizar uma comparação entre os campos medidos nessas regiões a fim de verificar se os mesmos são estatisticamente diferentes. Sendo assim, optou-se por utilizar o teste estatístico *Mann Whitney*, o qual é um teste de comparação não paramétrico, uma vez que os dados não são classificados como normais, com hipótese nula de que os dados são estatisticamente iguais. A taxa de significância desse teste foi de 95% portanto, índices de valores  $p$  menores que 5% indicam que as regiões comparadas são significativamente distintas.

Após a realização do teste *Mann Whitney* para as regiões o resultado demonstrou que todas as comparações das onze regiões são estatiscamente distintas (valor  $p < 0,05$ ;  $\alpha = 95\%$ ), ou seja as regiões são estatisticamente diferentes.

Com a análise da comparação do boxplot e do teste de comparação *Mann Whitney* das regiões, ambos comprovam que os dados das onze regiões são diferentes, ou seja, possuem um comportamento estatístico diferente.

### 6.13.2 Análises estatísticas das regiões

Durante o decorrer do trabalho foram colhidos amostras de campo elétrico com o intuito de realizar a análise da comparação do valor teórico com o aferido.

Dessa forma, para melhor visualização e entendimento, apresenta-se a seguir os resultados de Erro RMS e desvio padrão das análises comparativas em relação aos modelos de

propagação ITU-R P.1546-6, Espaço Livre, Hata e RNA, apresentados pelas as Tabelas 65 e 66.

Na Tabela 65 são apresentados os valores dos erros RMS das regiões analisadas. Nota-se que o modelo de RNA foi o modelo que melhor apresentou o menor erro RMS para todas as regiões analisadas.

Tabela 65 – Erro RMS das regiões de Uberlândia

	ITU-R P.156-6	Espaço Livre	Hata	RNA
Brasil	8,12	34,46	8,01	6,05
Cazeca	9,81	36,89	9,12	9
Central	4,32	41,60	4,67	3,72
Cidade Jardim	7,86	45,22	8,21	5,62
Daniel Fonseca	11,32	48,31	12,32	4,47
Lagoinha	9,88	44,50	10,28	6,64
Martins	9,51	34,28	8,31	6,72
Rondon Pacheco	8,14	42,22	8,28	5,95
Roosevelt	6,73	36,13	6,082	4,75
Gávea 3	5,95	7,18	5,19	3,74
Santa Mônica	9,75	34,08	7,80	3,98
Média	8,31	36,81	8,03	5,51

Realizando uma análise desconsiderando a RNA o modelo de propagação Hata obteve um melhor resultado em seis regiões (Brasil, Cazeca, Gávea, Martins, Roosevelt e Santa Mônica) e o ITU-R P.1546-6 apresentou um melhor resultado em cinco regiões (Central, Cidade Jardim, Daniel Fonseca, Lagoinha, Rondon), conforme demonstrado na Tabela 65.

Em sequência, analisa-se o desvio padrão encontrado para cada uma das regiões analisadas. Na Tabela 66 são apresentados os valores encontrado do desvio padrão para cada uma das onze regiões.

Tabela 66 – Desvios padrões das regiões de Uberlândia

	ITU-R P.156-6	Espaço Livre	Hata	RNA
Brasil	6,35	6,60	6,12	5,52
Cazeca	8,28	4,88	8,33	8,28
Central	3,11	3,89	3,20	2,88
Cidade Jardim	5,65	5,42	5,65	5,19
Daniel Fonseca	6	9,97	5,03	3,73
Lagoinha	7,75	7,54	7,04	6,14
Martins	6,51	5,58	6,38	6,10
Rondon	5,90	7,58	6,08	5,40
Roosevelt	4,70	5,07	4,50	4,04
Gávea	5,95	7,18	5,19	3,74
Santa Mônica	4,77	4,79	4,33	3,02
Média	5,91	6,23	5,62	4,91

Nota-se que o modelo de RNA foi o modelo que melhor apresentou o menor desvio padrão para as regiões analisadas.

Os valores médios de desvio padrão encontrados para os modelos de propagação analisados foram os seguintes: ITU-R P.1546-6 5.91, Espaço Livre 6.23, Hata 5.62 e RNA 4.91.

Realizando uma análise desconsiderando a RNA o modelo de propagação Hata obteve um melhor resultado em seis regiões (Brasil, Daniel Fonseca, Lagoinha, Roosevelt e Santa Mônica) e o ITU-R P.1546-6 apresentou um melhor resultado em duas regiões (Central e Rondon), já o modelo Espaço Livre demonstrou um melhor desempenho de desvio padrão em três regiões (Cazeca, Cidade Jardim e Martins), conforme demonstrado na Tabela 66.

Verificando os resultados das Tabelas 65 e 66, observar-se que as seis regiões apresentaram os melhores erros RMS e desvio padrão nos mesmos modelos de propagação. As seis regiões que apresentaram esses resultados foram Brasil, Central, Gávea, Rondon, Roosevelt e Santa Mônica. Dessas seis regiões a região Central e Rondon mostraram o menor Erro RMS e Desvio padrão no modelo de propagação ITU-R P.1546-6. Já as Regiões Brasil, Gávea, Roosevelt e Santa Mônica demonstraram o menor erro RMS e Desvio padrão no modelo de propagação Hata.

## 6.14 Considerações finais deste capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados das onze regiões analisadas. O qual expôs os resultados da análise detalhada da variabilidade do sinal eletromagnético transmitido pelo canal de rádio propagação na cidade de Uberlândia.

Na sequência observou-se o comportamento do campo elétrico com uma interpolação linear e bidimensional para cada uma das onze regiões definidas nesse trabalho.

E por fim, realizou a comparação dos modelos de propagação ITU-R P.1546-6, Espaço Livre, Hata e RNA gerada.



## Conclusão

Nesse trabalho de pesquisa foram analisados a variabilidade do sinal do campo elétrico na cidade de Uberlândia-MG. Ao todo foram explorada onzes regiões com perfis urbanísticos diferentes.

Por meio da avaliação da distribuição empírica dos dados de campo elétrico pelo boxplot, constatou-se pela a figura 221 e Tabela 64, que das onzes regiões apenas as regiões Cidade Jardim e Rondon Pacheco não possuem medidas discrepantes (outliers) de campo elétrico. E as regiões Daniel Fonseca e Lagoinha possuem a maior quantidade de outliers, sendo Daniel Fonseca com 3731 outliers e Lagoinha com 789 medidas discrepantes do campo elétrico. Analisando os boxplot de cada uma das onzes regiões pela a Figura 221, observar que a variabilidade do sinal do campo elétrico na região Daniel Fonseca as amostras de campo elétrico são as menores, já a região Brasil apresenta os maiores valores de amostras de campo elétrico das onzes regiões.

Os valores medios encontrados para as onzes regiões do boxplot são 471,36 outliers, 70,70 dB $\mu$ V/m limite superior, 64,98 dB $\mu$ V/m para o terceiro quartil (Q3), 60,99 dB $\mu$ V/m para o segundo quartil/mediana (Q2), 57,14 dB $\mu$ V/m para o primeiro quartil (Q1) e 47,37 dB $\mu$ V/m para o limite superior.

Os resultados obtidos para a avaliação da interpolação linear das onzes regiões são que os erros interpolados dos campos em dB $\mu$ V/m se ajustam a uma função distribuição cumulativa normal e os erros interpolados dos campos elétricos em  $\mu$ V/m se ajustam a uma função distribuição cumulativa exponencial.

Já os resultados encontrados para a avaliação da interpolação bidimensional das onzes regiões são que os campos elétricos dados em dB $\mu$ V/m se ajustam a uma pdf Gaussina e os campos em  $\mu$ V/m se ajustam a uma pdf de Rayleigh.

Por fim, a análise dos modelos de propagação (ITU-R P.1546-6, Espaço livre, Hata e RNA) nas onzes regiões, concedeu através da realização da comparação do valor teórico com o valor aferido do campo elétrico em cada uma das regiões.

A partir das métricas erro RMS e desvio padrão, pode se avaliar cada um dos modelos de propagação definidos em cada uma das onzes regiões. O erro RMS médio para o

modelo ITU-R P.1546-6 foi de 8,31 dB $\mu$ V/m, já o espaço livre foi de 36,81 dB $\mu$ V/m, Hata apresentou um erro RMS de 8,03 dB $\mu$ V/m e o modelo gerado através de uma RNA foi de 5,51 dB $\mu$ V/m. Com isso, o melhor modelo que apresentou um menor erro RMS foi o RNA seguido dos modelos Hata, ITU-R P.1546-6 e espaço Livre.

Levando em consideração a metrica desvio padrão, constatou-se que os valores medios dos modelos de propagação das onzes regiões foram 5,91 dB $\mu$ V/m para o modelo ITU-R P.1546-6, 6,23 dB $\mu$ V/m para o espaço livre, 5,62 dB $\mu$ V/m ao modelo Hata e 4,91 dB $\mu$ V/m para RNA. Desse modo o modelo RNA expôs o menor desvio padrão seguidos dos modelos Hata, ITU-R P.1546-6, espaço livre.

Conforme os resultados indicados no presente trabalho, conclui-se que o propósito da pesquisa de analisar o comportamento do campo elétrico em determinadas regiões com perfis urbanísticos diferentes na cidade de Uberlândia-MG foi atigindo.

## 7.1 Principais contribuições

As principais contribuições deste trabalho são:

- 1) Constatar a partir do teste da normalidade (*Kolmogorov-Smirnov*) que as amostras coletadas não resultam em uma distribuição normal.
- 2) Viabilizar a compreensão do comportamento do campo elétrico para cada região da cidade de Uberlândia, comparando a variabilidade das amostras do campo elétrico.
- 3) Apurar que os erros interpolados dos campos em dB $\mu$ V/m se ajustam a uma função distribuição cumulativa normal e os erros em  $\mu$ V/m se ajustam a uma função distribuição cumulativa exponencial.
- 4) Constatar que os campos elétricos dados em dB $\mu$ V/m se ajustam a uma pdf Gaussiana e os campos em  $\mu$ V/m se ajustam a uma pdf de Rayleigh.
- 5) Comprovar que as onzes regiões são estatisticamente distintas através do teste *Mann Whitney*.
- 6) Identificar o melhor modelo de propagação para cada região analisada.
- 7) Validar o melhor desempenho da RNA gerada com os modelos de propagação.
- 8) Emissoras de Televisão planejarem melhor a sua transmissão em cada região da Cidade de Uberlândia.

## 7.2 Trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros:

- 1) Realizar novas campanhas de medições de campo elétrico com o intuito de comparar o campo elétrico em cada estação do ano.
- 2) Análisar os outliers de cada região.



- 
- 3) Identificar as principais interferências de perda de propagação para cada uma das regiões.
  - 4) Analisar o campo elétrico em outras faixas de frequência.
  - 5) Inserir mais parâmetros de entradas na RNA, como por exemplo a altura média dos prédios e a densidade de construção de cada região.
  - 6) Recriar o trabalho de Okumura para a Cidade de Uberlândia.
  - 7) Testar as amostras com a distribuição de Rice.



---

## Referências

- ALENCAR, M. S. d.; QUEIROZ, W. J. L. d. Ondas eletromagnéticas e teoria de antenas. **São Paulo. Érica**, 2010.
- CARRIJO, G. A. **Apostila de Antenas e propagação**. [S.l.]: Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- CASELLA, I. R. S.; PEREIRA, A. L. A bioinspired propagation model for brazilian digital tv system based on mlp and rbf networks. **IEEE Latin America Transactions**, IEEE, v. 14, n. 9, p. 3941–3948, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7785916>>.
- CAVALCANTE, G. A. **Otimização de modelos de predição da perda de propagação aplicáveis em 3, 5GHZ utilizando algoritmos genéticos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- ESPERANTE, P. G.; AKAMINE, C.; BEDICKS, G. Comparison of terrestrial dtv systems: Isdb-tb and dvb-t2 in 6 mhz. **IEEE Latin America Transactions**, IEEE, v. 14, n. 1, p. 45–56, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TLA.2016.7430060>>.
- FRIIS, H. T. A note on a simple transmission formula. **Proceedings of the IRE**, IEEE, v. 34, n. 5, p. 254–256, 1946. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/JRPROC.1946.234568>>.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física, volume 4: Óptica e física moderna. **Halliday, Resnick, Jearl Walker**, 2016.
- ITU-R, R. P. 1546-4 method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30–300 mhz. **International Telecommunication Union, Geneva**, 2009.
- JACKSON, J. D. **Classical electrodynamics**. [S.l.]: American Association of Physics Teachers, 1999.
- JR, W. H. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. [S.l.]: Bookman Editora, 2013.
- MEDEIROS, J. C. d. O. **Princípios de telecomunicações: teoria e prática**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2005.

- MINISTERIO DAS COMUNICAÇÕES DO BRASIL. **Portaria nº 1.714, de 27 de Abril de 2016**. Brasília, 2016. 4 p.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES DO BRASIL. **Portaria nº 3.493, de 26 de Agosto de 2016**. Brasília, 2016. 4 p.
- MINISTÉRIO DAS COMUNICAÇÕES DO BRASIL. **Portaria nº 378, de 22 de Janeiro de 2016**. Brasília, 2016. 4 p.
- MIYOSHI, E. M.; SANCHEZ, C. A. **Projetos de sistemas rádio**. [S.l.]: Érica, 2002.
- MUNIZ, C. D. **Ondas Eletromagnéticas**. 2018. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/ondas-eletromagneticas/>>.
- PARSONS, J. D. **The mobile radio propagation channel**. Wiley, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/0470841524>>.
- PIAU, D. d. B. et al. Projeto de dimensionamento de enlace de rádio associado a atenuações devido à chuva utilizando celplan e pathloss. Universidade Federal de Uberlândia, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.14393/19834071.2014.27371>>.
- POZAR, D. M. **Microwave engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio: princípios e práticas**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009.
- RIBEIRO, J. A. J. Engenharia de antenas: fundamentos, projetos e aplicações. **São Paulo: Érica**, p. 5, 2012.
- SADIKU, M. N. **Elementos de Eletromagnetismo, terceira edição**. [S.l.]: editora Bookman, Brasil, 2004.
- SANTOS, T. N. et al. Análise da qualidade da propagação do sinal uhf na cidade de uberlândia, utilizando os modelos de propagação itu-r p. 1546, okumura-hata e log distância. Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- SILVA, J. C. da. **Influência da Vegetação no Desvanecimento e na Perda de Percurso de Enlaces de Radiocomunicação UHF na Faixa de 700 MHz**. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2014.
- VASCONCELOS, L. S. et al. Análise da propagação troposférica sobre terrenos irregulares em vhf e uhf utilizando equações parabólicas e o desenvolvimento de um novo modelo híbrido para predição de perda de percurso. Universidade Federal de Uberlândia, 2017.
- VILANOVA, A. C. et al. Otimização de um modelo de propagação com múltiplos obstáculos na troposfera utilizando algoritmo genético. Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- VITAL, G. T. D. **Projeto sustentável para a cidade: o caso de Uberlândia**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- WILLIAMS, C. D. H. **“A Brief History of Electromagnetism” University of Exeter**. 1996. Disponível em: <<http://newton.ex.ac.uk/teaching/CDHW/EM/CW960128-3.pdf>>.

ÍON, M. **Magnetismo - O irresistível poder dos ímãs**. 2018. Disponível em:  
<<http://www.educacaopublica.rj.gov.br/biblioteca/fisica/0011.html>>.



## Anexos





## Algoritmos Matlab

### A.1 Conversão de potência elétrica em dbm para campo elétrico em $\text{dB}\mu\text{Vm}$

```

dados=xlsread('Rota2.xlsx');
G1=1;
G2=1.64;
G3=3.24;
f = 569.142857 * 106;
c = 3 * 108;
lambda=c/f;
Z0=120*pi;
potmedida= dados(:,4);
potdbw=potmedida-30;
PW = 10.^(potdbw/10);
[altura,largura]=size(PW);
E = sqrt(8 * 120 * pi * PW/(1 * lambda2));
E=120+20*log10(E);
for i=1:altura
EdBuvml(i)=120+20*log10(68.82/lambda*sqrt(PW(i)/G1));
end
for i=1:altura
EdBuvml2(i)=120+20*log10(68.82/lambda*sqrt(PW(i)/G2));
end
for i=1:altura
EdBuvml3(i)=120+20*log10(68.82/lambda*sqrt(PW(i)/G3));
end
EdBuvml=EdBuvml';

```

```
EdBvm2=EdBvm2';
EdBvm3=EdBvm3';
```

## A.2 Função da RNA

```
function [y1] = rnaudicompleta(x1)
x1_step1.xoffset = [0.908838979857433; 775.023071289063];
x1_step1.gain = [0.277413765045159; 0.011913340338044];
x1_step1.ymin = -1;
b1 = [-21.761944601203712324; -24.579405746405317501; 7.9542685724416779536;
18.395421735309991362; -27.53687546543870468; 15.637650708852458337;
-23.195228690843233466; 22.716541236433926088; 29.835972772000488362;
-26.374818702883402466; -23.202660354842901569; 24.973100671708078124;
-30.526516717508545895; -19.69663379339757725; 17.451491875175449309;
-16.152709965244838486; -24.664080748794301456; -23.189254587039751954;
-14.275300547742011403; 25.896335396692503394; -14.432739624795466682;
9.0410870492174151281; -15.496968832062117727; 13.618374855332245232;
8.6341528387026311719; 20.164789963037854648; -31.594869359364381012;
-21.64857623353438143; 23.025822502486427368; 27.399443809069321532;
20.134595159260264552; -7.5468411906412082857; 11.13901089255029575;
-14.61695846687949718; 12.252809412257470001; 9.07611897858502914;
-12.061040412400094723; 7.4850934909406117157; 8.3612198733070499657;
12.297894832474465687; -16.141449492657834242; 11.36786758053069768;
12.303917222641402418; -6.5630677658646972006; -7.7045184827190844601;
-13.036887367966306428; -9.3961413825260109434; 13.262901987867465436;
5.659791512499615429; 6.2608864726300463843; -7.5017124168469466738;
-5.2368756472582456141; -4.7790217810936921339; 8.0921942124911723226;
-6.4839199449342972414; 9.5409977014211353463; -6.8768825182073332059;
2.0619375768822552075; 7.1114191576753267299; -3.5380086415364027097;
3.1520983236359847446; 3.2363727825979151653; 6.0408697552508030526;
1.8799228521597504127; 2.0871353374010683801; -0.71027714672443853505;
1.9352653121291760741; 1.5949313717193811524; -0.29798221868304475279;
0.85742040610595882111; 2.1768771264116542064; 0.16627470663611448876;
0.2198818553045516766; -1.8200381857515790518; 1.3071843834995902078;
0.23350554697099462631; 0.085107379068635788388; -0.063837619425052935518;
-0.55108120663035453646; -2.5181579832204969982; 0.59165140390408055282;
-4.6315245089472156792; -7.0710339307160987588; 0.60483782781972195153;
-0.5600317349778364262; 0.93152652620361042768; -4.0725021698681604931;
-5.1831502902567905267; -3.0522709619167245343; 7.1236820419510218372;
```

3.0987449057786915496;8.3800447646563132054;-4.4211863278863487992;  
 -11.419601951851188204;24.229841067941990218;-9.6004789309355782478;  
 -6.3638581190689649247;-5.2938236972332868291;5.2005256372803998488;  
 -12.160827083809937932;10.612261310989712371;-9.191160956954828265;  
 8.5906079119161553592;5.8660725200474690411;13.011615207340138767;  
 6.1594388300022151483;24.763607289928650346;12.426275070589730021;  
 20.543650111601724717;-9.0265091396725036788;18.019101719637166781;  
 7.701546415021907066;-22.041300560342307335;-13.630143430483169453;  
 -11.453300461743699756;7.3224088195878342944;-12.368050160472446208;  
 11.674765290349769842;24.60691840687437093;21.503232325709873862;  
 -22.07336355236157388;8.5131583223395370652;-16.62037816269998558;  
 -14.570311600301563359;-6.7302148819160558801;24.113852216441376441;  
 17.116160750669081381;11.728422070260048571;12.032415386289819992;  
 12.86429534404610564;13.30547276824277958;-25.380061714354116731;  
 -10.334514449913504208;33.488420195596816598;-13.717255778070402528;  
 54.969674621197817999;15.261190669088124494;14.851607481094015739;  
 -24.258440879204375307;26.829779843967997977;-15.143810766986636196;  
 -15.741013980276692408;-29.00377516682241108;-16.335333171015744114;  
 -27.711744347248846054;-27.703194380344648096;15.113009553102569882;  
 -17.2816050128498091;-32.226676915569086646;17.146476993285894252];  
 $IW1_1 = [1.38805469463331832 - 26.298237477204480683; 22.960518022372625069 -$   
 8.0158864796675182163;-6.5308913880689889453;-7.1727105099321404325;  
 -10.341258079016522942 -11.374950514422620174;25.813287964440270628;  
 -2.0045693315671639922;-11.109581045954026735;-11.636011406200370999;  
 -4.1061360728896287853 26.267829277431491874;-2.6527587261522826978;  
 -26.157628384080222617;-4.082469690775218929 -34.246163991254682912;  
 23.389875456571296297 -24.844435250772498591;23.513921380659937199;  
 -4.8688534601444395378;-26.8048734421786925 -2.7602290493964205531;  
 0.89399934725913154931 -38.15802686540004629;17.846029230102647745;  
 -15.406557561623399621;-14.993783970613659307 14.283966993080856156;  
 12.630807262947849168 -14.181944736187729106;1.0536763932757340356;  
 -30.418584321337128529;20.324829017764706407 -13.647924038450707229;  
 11.774228854479838802 -15.872184732437505161;9.1754928585550867837  
 37.448200929598250752;18.861280201072538887 15.131325864691588023;  
 -12.804007655189238335 -3.8256909771189220315;11.650680473581163099  
 -17.637192053314137752;-17.874628056742679405;-14.623622880543823754;  
 -5.4672422035757195502 13.469704711389152152;-33.939214321881145509  
 3.4407703427656954887;-0.8424195679656486524 45.152250708826201731;  
 27.335932444529397856 -2.894849166430312426;-1.3344877145784266315

-32.586586848808678951;-30.823261768811274663 8.994425882904693026;  
-25.474284708960741597 13.340024930265350633; 2.4851507754664812211  
-17.446340000834581474;-20.269483381057064264 5.2512067322983613238;  
25.366498048303519397 -1.9766478522162955755; -7.8116367607601846501  
22.79052158700189068;-7.0629115283502192923 -11.866849026058424954;  
25.083024888541636699 1.0476168155213858579;-12.690656758881313948  
-8.9637993196503007454;-10.99603808772614677 11.143382809582814019;  
-13.329558692836044997 -23.408862923793133604;-6.4560949915925336384  
-38.569826489219458665;-7.9832781806325412433 20.519359850032831361;  
-4.880862937307159477 -22.199512176983756007;-1.0137635369164572641  
13.948523334988518485;14.278800713721931714 14.126804333924704693;  
29.893643582060853703 22.927482657436712543;10.007500870553856842  
-20.367735379132291484;-36.662685013401123513 21.742962841641396921;  
-12.00565933233613336 12.01632823674122541;-14.252646433977423257  
11.286559449403828381;12.821252756893898095 -9.1911194553247455019;  
14.458902333109872274 15.729726028459324993;20.171149109315646086  
-26.131672999284859316;-14.482227975398929587 21.562708599184251312;  
20.428587024421094753 3.7450680365295512253;-1.7409268733846401389  
-36.142955202609961418;12.14488639561223593 -17.949135125531956447;  
-0.40273371196767132618 19.856816326786905336;-20.004270284944585256  
-21.400895617870137499;-5.3271290223959546495 9.142943690546378122;  
-5.4823734295740118583 5.9181011353740489156;-11.424027944371751175  
-16.002866675254608708;-38.375910006500660643 -20.020213084490261934;  
-1.1177064422571012514 17.806505077210022847;-28.539724153662845652  
7.2528949173559720265;3.8271504001926008876 3.8545521051335462914;  
-26.876669389768025553 6.7165571504003489522;-4.6808757290654003924  
16.425565920634973338;1.0887532838858116069 -30.495931275935607374;  
-23.795735691370239806 -26.251110627448642987;-8.3422250049414348183  
-11.131754944733657453;6.7783694535214848997 -2.1323919022728730077;  
10.900082456943430032 -17.911210237414934454;2.7699675710926960903  
-17.355744069401623619;33.945410129241452069 4.9496478373195831324;  
12.786446103780383154 -20.502401662442231611;-5.4802727994535915812  
-8.3403549946831621043;9.3000280606633456415 -57.052441066182346674;  
-13.312522787200439467 1.0991433382661885965;-13.738419009152506689  
-3.3320352316128225567;39.708582396782240664 19.633979630085779178;  
-20.914747004604976155 18.787403951133192948;-16.150247667906970861  
35.089907464574125129;13.358185338830496747 8.5261755258498244103;  
-37.333621197316595897 -18.591293407290372386;1.7213672569017601788  
7.1891126083153729098;-23.171061602387528211 -3.1909870997669584902;

-23.627370510373033596 20.8346156367347497;-15.235420316023738252  
-5.2065726473672064856;10.010869185639720058 -41.398237407458609027;  
17.363767058427249879 2.7266105686350772253;19.066556901621989795  
-24.410261369004469856;-21.235396765898236993 -7.4039998640582664891;  
-32.612045341379825913 -9.4403786886158957969;82.128686726612031066  
-46.917786397683279631;-21.833561137538033847 27.646100699280111712;  
-24.990688522117938675 4.5610721132781382181;-11.980782777028833763  
6.0058787403497451152;10.289798716417955404 -7.9930643612134142373;  
-0.93887893842799596822 -23.909022570442182598;10.045942350135343091  
30.31638670526005086;-13.858357615686994535 -23.938597306989635172;  
6.8893129856442607561 -17.97812087431997341;13.589780378908132619  
-6.1230302697678675727;17.023481341548613699 24.467626811528869979;  
13.069900058478408411 5.9031575788111911862;46.142984015765193817  
-36.826759863992961641;16.799466272813663892 23.558447625091112343;  
38.837442502793066978 9.4015017089158003927;1.2930024282681953363  
33.786072523458727801;29.043140562056947829 30.478470932014833039;  
5.9574059049460146298 -15.919310465958307788;-14.014764290666230195  
35.657420584772147265;-13.138901205914390147 -6.6438789820979859968;  
-11.287108326696010607 -11.130184298830430478;15.670206857292049207  
6.1660276852486690657;-20.504540661090231879 16.64423413434096588;  
18.897193022441427956 -4.768163010550726888;15.029720630977601914  
-40.229488584464171197;30.300771398736266349 15.817880697310711113;  
-41.869368111398379995 -10.44586445308856959;8.3003599554572886632  
-9.3300823967253911917;-27.515420652580004912 -18.134987107833641318;  
-14.690553688360683537 15.305613012647803828;-8.81673171122419852  
1.1659892673296869958;15.902615474470021439 -38.579751506045781184;  
24.136955403441334056 13.178866285959255578;15.794391123463844551  
-1.4770718734155510177;21.710170543265100207 -10.329870537668924158;  
12.434141880889212572 11.518228594110224705;10.462248332927917005  
13.172319947723112321;0.28624261447686877302 -26.009215776687597099;  
-5.7628107922350517711 12.688029020268878355;33.85704228421246853  
-16.778852920064526444;-11.212393674172478342 -12.954495112585030725;  
60.393895534598669883 -13.38026008646794196;7.3805646449760855532  
14.452462163430528364;14.526454543004485132 8.4654779638307910972;  
-19.866636266638760588 29.464944723868104148;28.193505457767315647  
-4.4981240227129459797;-9.3322108251092590336 -14.333142704071438089;  
-15.65502952827163341 -6.2395092630311390636;-34.67614286789012823  
-12.626252026300429421;-6.6105917089270977982 -15.307658163976801902;  
-1.2860454092985769137 28.278856781706522838;-7.8510248534122046848

28.811073321538707148;20.284595748275386029 20.998959125395252556;  
 -1.0809679791262511994 17.179535751684749556;-28.503811888650968598  
 26.56802429001416499;9.0531013309028498526 14.561653412382167261];  
 $b2 = -1.3699725327808787156$ ;  
 $LW2_1 = [-13.140267935867822047-9.9565052804018154831-8.5270673870484188228$   
 0.89417625051568117023 11.438153942845808331 -12.454588432849641677  
 -5.3253240822607903482 11.505768055309067321 -6.1369040135739156838  
 -1.0128708316737333739 14.912853285803109316 12.913194150838604557  
 -7.4174632140973049133 8.2389573218175229385 15.95301065018596276  
 10.856012146926014239 20.096997617183031792 -8.6912934356624855781  
 -6.2382675339548505633 0.42253229543690495884 -4.0945614280153241893  
 7.3664778575080287482 5.7976914045672902631 -5.4197145474128998188  
 -3.1565984206104649168 9.8135482477218829445 -3.8924214820851132934  
 3.2682771778198347334 -8.8980159614573093307 1.1031021717913367386  
 -2.7355201351635338725 -4.6980973010937461254 3.1279310048119306487  
 10.107606276002156775 -1.198421685442172091 23.757065065107216384  
 -3.962691709935015183 -13.006649244443419633 6.5163377983104258107  
 -1.7572759594870501765 0.46089098023582997232 -12.658383299509983644  
 11.5244044050201353 -7.089883322934364962 -6.8789997077122055913  
 0.94858679069845508458 4.7377042676050171721 1.1411468350764761848  
 4.5057128670350072852 -5.6830699670619901909 5.4926891542283513559  
 -5.0767642507850201383 -0.22410272927625526918 4.3429505886223358502  
 2.9250225346651577141 -2.9938612941332767292 7.9878699637776389153  
 -3.0251304713947733127 -3.4190496627257389584 -1.2634249288379710841  
 7.9477424902981574917 -4.0305189148867288651 -0.42927436478989927648  
 6.5911175250277418414 5.637908656496223081 12.919716403803791493  
 -6.4535666291006670292 1.6516378695872822036 0.23420507659349687479  
 0.32047460915910275236 10.047745151253199225 -6.39083018604034514  
 -3.0524637369148623911 4.4991311494778170044 -0.33297370346879101577  
 2.6096653202988213671 3.0392271470534186761 -0.19440575344200775043  
 -4.2805521809651381204 25.691710239520745063 4.3018041787331702253  
 3.3839010057983474056 0.1729071349821212078 1.1158775588533862422  
 4.8788926336342202106 -3.7050266103968665377 7.5632528905484663895  
 -2.6420834260814554106 -16.032051420181165469 -0.34585662319050619606  
 22.824886371733640544 -6.3011798055117580475 4.8677081483900153103  
 -0.36158251744817293538 0.13621428000886656728 -4.9467923023407465166  
 0.57136938804969095163 -18.620069755328191974 -4.2614236144970476516  
 -0.75389990640773207886 -0.28623904586503567948 0.72850595787522709479  
 8.4496990553614104158 -14.321642885152288116 8.9525747394720927019

```

12.613418243864902735 -0.36929777863599655419 -9.5525454155240971943
-11.44395134986370266 -3.1290495864896197276 0.3949301806778798829
-13.605497670612788141 24.118925182842748001 0.75206720228596324329
0.5061790900830405171 -9.3403353007388307816 1.0859508578563537018
2.0331506121996025804 11.410443569501877548 -8.8994620664312034108
-10.074990000612897845 28.10761230665975674 -1.6152150533338114347
10.834992296124564604 31.531722561716048148 11.801344856915715553
12.248092664765394488 13.404801376121227463 1.3960802118608754974
-0.94952703120173165274 -1.0182665850865157964 1.0970074718192088792
6.2132512765986378511 17.209135073453293074 0.84010513756284532771
-7.1574092691974131597 0.4528660491205950267 -0.82141036727282745744
4.7354802332300325318 1.7626770122875965452 0.57861126583792044098
0.007368533173400203945 10.008239189697929916 -0.17875790604238203652
-8.8799402690239741531 6.8178418924111818811 7.8237516146558663266
2.18710572727594732 6.8693257109512426695 -0.018966094006619575729];
y1_step1.ymin = -1;
y1_step1.gain = 0.033003300330033;
y1_step1.xoffset = 33.0678555833959;
Q = size(x1, 1);
x1 = x1';
xp1 = mapminmax_apply(x1, x1_step1);
a1 = tansig_apply(repmat(b1, 1, Q) + IW1_1 * xp1);
a2 = repmat(b2, 1, Q) + LW2_1 * a1;
y1 = mapminmax_reverse(a2, y1_step1);
y1 = y1';
end
function y = mapminmax_apply(x, settings)
y = bsxfun(@minus, x, settings.xoffset);
y = bsxfun(@times, y, settings.gain);
y = bsxfun(@plus, y, settings.ymin);
end
function a = tansig_apply(n, )
a = 2./(1 + exp(-2 * n)) - 1;
end
function x = mapminmax_reverse(y, settings)
x = bsxfun(@minus, y, settings.ymin);
x = bsxfun(@rdivide, x, settings.gain);
x = bsxfun(@plus, x, settings.xoffset);
end

```

### A.3 Teste da normalidade

```
clear
clc
close all
[num,text,row] = xlsread('Dados');
[li,co] = size(num);
for comp1 = 1: co
    bairroA = num(:,comp1);
    [l,c]=find(isnan(bairroA));
    bairroA(l)=[];
    [h,p(comp1,1)]=kstest(bairroA);
end
```

### A.4 Interpolação Linear

```
clear all
dados = xlsread('novobrasil.xlsx');
n=1;
N=20;
dimensao=size(dados);
npontos=dimensao(1,1);
campoa=dados(:,9);
dist=dados(:,3);
alti=dados(:,4);
[alt,I]=sort(alti);
for i=1:npontos
    campo(i)=campoa(I(i));
end
campo=campo';
P=polyfit(alt,campo,n);
for i=1:npontos
    x(i)=alt(i);
    z(i)=0;
    for j=1:n+1
         $z(i) = z(i) + P(j) * x(i)^{(n-j+1)}$ ;
    end
end
figure(1)
plot(x,z,'r')
```



```
hold on
plot(x,campo,'b')
hold on
grid
hold off
dif=campo'-z;
z1=hist(dif,N)/npontos;
z1=cumsum(z1);
Emin=min(dif); Emax=max(dif);
delta=(Emax-Emin)/N;
for i=1:N
x1(i)=Emin+delta*(i-1);
end
media=mean(dif)
desvio=std(dif)
figure(2)
plot(x1,z1,'b')
hold on
plot(x1,normcdf(x1,media,desvio),'r');
grid
hold off
figure(2)
E = 10.*(campo/10)/npontos;
E=E-min(E);
y=hist(E,N)/npontos;
Emin=min(E); Emax=max(E);
z1(1)=0;
for i=2:N
z1(i)=z1(i-1)+y(i-1);
end
delta=(Emax-Emin)/N;
for i=1:N
x1(i)=delta*(i-1);
end
media=mean(E);
desvio=std(E);
alfa=media/sqrt(pi/2);
figure(3)
plot(x1,z1,'b')
```

```
grid
hold on
z2=expcdf(x1,media);
plot(x1,z2,'r');
hold off
figure(4)
plot(alt,'m')
grid
figure(5)
plot(dist,'r')
grid
figure(6)
plot3(dist,alt,campo)
```

## A.5 Interpolação Bidimensional

```
clear
dados = xlsread('novobrasil.xlsx');
N=20;
dimensao=size(dados);
npontos=dimensao(1,1);
EdB=dados(:,9);
dist=dados(:,3);
alti=dados(:,4);
alt=alti;
surffit=fit([dist,alt],EdB,'poly11');
figure(1)
plot(surffit,[dist,alt],EdB);
title('valores do campo Elétrico medido e interpolado(plano)');
xlabel('distancia');
ylabel(' altitude');
dif=surffit(dist,alt)-EdB;
surffit=fit([dist,alt],dif,'poly11');
figure(2)
plot(surffit,[dist,alt],dif)
title('(EdB-Valor interpolado) e plano de interpolação da diferença');
xlabel('distancia');
ylabel(' altitude');
Hdif=hist(dif,N)/npontos;
```

```

PDFEdif=cumsum(Hdif);
Emin=min(dif); Emax=max(dif);
delta=(Emax-Emin)/N;
for i=1:N
x1(i)=Emin+delta*(i-1);
end
mediaEdif=mean(dif)
desvioEdif=std(dif)
figure(3)
plot(x1,PDFEdif,'b',x1,normcdf(x1,mediaEdif,desvioEdif),'r')
title('cdf do histograma de (EdB-Valor interpolado) e a cdf da Gaussiana');
xlabel('(EdB-Valor interpolado)');
grid
figure(4)
plot(x1,normpdf(x1,mediaEdif,desvioEdif),'r')
hold on
bar(x1,Hdif/delta,'b')
title(' pdf do histograma de EdB e pdf da Gaussiana');
xlabel('EdB-valor interpolado');
hold off
Edif = 10.(dif/10)/npontos;
Edif=Edif-min(Edif);
HEdif=hist(Edif,N)/npontos;
Edifmin=min(Edif); Edifmax=max(Edif);
PDFEdif(1)=0;
for i=2:N
PDFEdif(i)=PDFEdif(i-1)+HEdif(i-1);
end
delta=(Edifmax-Edifmin)/N;
for i=1:N
x1(i)=delta*(i-1);
end
mediaEdif=mean(Edif);
desvioEdif=std(Edif);
figure(5)
z2=expcdf(x1,mediaEdif);
plot(x1,PDFEdif,'b',x1,z2,'r')
title('cdf do histograma de (E-Valor interpolado) e a cdf da Gaussiana');
xlabel('(E-Valor interpolado)');

```

```

grid
figure(6)
plot(x1,expPDF(x1,mediaEdif),'r')
hold on
bar(x1,HEdif/delta,'b')
title(' pdf do histograma de (E-valor interpolado) e pdf da exponencial');
xlabel('E-valor interpolado');
hold off

```

## A.6 comparação

Este algoritmo calcula os campos dados pela resolução ITU-R P.1546.

```

clear all n=1;
f=600;d=10;R=10;h1=37.5;h2=1.5;inicio=100;
dados = xlsread('novobrasil.xlsx');
dimensao=size(dados);
npontos=dimensao(1,1);
EdB=dados(:,9);
dist=dados(:,3);
alt=dados(:,4);
[x, Efs, Eb] = campo_TU1546(npontos, Edb, dist, alt);
for i=inicio:npontos
[C1, C2, C3, C4] = campo_correcao_h2_TU1546(f, inicio, dist(i), R, h1, h2);
campo_total(i) = Eb(i) + C1;
end
[Einter] = campo_interpolado(n, inicio, npontos, dist, Edb);
[Ehata]=hata(f,h1,h2,dist,inicio,npontos);
figure(1)
semilogx(x, campo_total,'r', x, Efs,'y', x, Edb,'b', x, Einter,'k', x, Ehata,'g')
title('Campo Elétrico em dBmicroVolt/m')
xlabel('distancia')
ylabel('Campo Elétrico')
legend('cammpo corrigido','E free space','EdB medido','E interpolado','E Hata')
function [Ehata]=hata(f,h1,h2,dist,inicio,npontos)
for i=inicio:npontos
aH2=(1.1*log10(f)-0.7)*h2-(1.56*log10(f)-0.8);
if dist(i)<20
b=1;
else

```

```

dist(i)>=20
Hl=h1*sqrt(1+0.000007);
b = 1 + (0.14 + 0.000187 * f + 0.00107 * Hl) * (log10(0.05 * dist(i)))0.8;
end
Ehata(i) = 69.82 - 6.16*log10(f) + 13.82*log10(h1) + aH2 - (44.9 - 6.55*log10(h1)) *
(log10(dist(i)))b;
end
function[C1,C2,C3,C4] = campo_correcao_h2ITU1546(f, inicio, d, R, h1, h2)
f=450;d=10;R=10;h1=50;h2=1.5;
Rl=(1000*d*R-15*h1)/(1000*d-15);
hdif=Rl-h2;
tetaclut=atan(hdif/27)*180/pi;
Knu=0.0108*sqrt(f);
Kh2=3.2+6.2*log10(f);
v=Knu*sqrt(hdif*tetaclut);
if h2 < Rl
Jv = 6.9 + 20 * log10(sqrt((v - .1)2 + 1) + v - 0.1);
correcao_receiving_antenna = 6.03 - Jv
end
if h2 >=Rl
correcao_receiving_antenna = Kh2 * log(h2/Rl)
end
C1 = correcao_receiving_antenna;
teta=1.5538*180/pi;
tetar=atan((h1-h2)/(1000*d))*180/pi;
tetatca=teta-tetar;
if (tetatca < -0.8)
tetatca = -0.8
end
if (tetatca > 40)
tetatca=40;
end
vl=0.036*sqrt(f);
v=0.0659*tetatca*sqrt(f);
Jvl = 6.9 + 20 * log10(sqrt((vl - .1)2 + 1) + vl - 0.1);
Jv = 6.9 + 20 * log10(sqrt((v - .1)2 + 1) + v - 0.1);
correcao_clearance_angle = Jvl - Jv
C2 = correcao_clearance_angle;
h1=-10; f=100;tetaeff=atan(-h1/9000)*180/pi;

```

```

if( f==100)
Kv=1.35;
end
if (f==600)
Kv=3.31;
end
if (f==2000)
Kv=6;
end
v=Kv*tetaeff;
 $Jv = 6.9 + 20 * \log_{10}(\sqrt{(v^2 - 1)^2 + 1} + v - 0.1);$ 
 $correcao_{h1negativo} = 6.03 - Jv$ 
 $C3 = correcao_{h1negativo};$ 
d1=50; dtotal = 100; f=100; h1=10;h2=10;alfa=0.3;beta=0.0001;
Eterra1km=89; Emar1km=97;Eterrad1=20; Emard1=26;Eterradtotal=10;Emardtotal=18;
if (d1<1)
delta = d1*(Eterra1km-Emar1k);
end
if ( d1>1)
delta = Eterrad1-Emard1;
end
Emixdtotal=Emardtotal+delta;
deltaE=Emixdtotal-Eterradtotal;
 $qsi = alfa + (1 - alfa) * \exp(-(beta * d1^{(2.42 - 0.0003527 * h1)}));$ 
 $E_{terreno_{misto}} = Eterradtotal + deltaE * qsi$ 
 $C4 = E_{terreno_{misto}};$ 
function[Einter] = campo_interpolido(n, inicio, npontos, dist, campo)
P=polyfit(dist,campo,n);
for i=inicio:npontos
x(i)=dist(i);
z(i)=0;
for j=1:n+1
 $z(i) = z(i) + P(j) * x(i)^{(n - j + 1)};$ 
end
end
Einter=z;
function[x, Efs, Eb] = cammpoITU1546(npontos, Edb, dist, alt);
a0=.0814;a1=0.761;a2=-30.444;a3=90.226;

```

```

b0 = 33.6238; b1 = 10.8917; b2 = 2.3311; b3 = 0.4427; b4 = 1.256 * 10^-7; b5 =
1.775; b6 = 49.39; b7 = 103.01;
c0=5.4419; c1=3.7364; c2=1.9457; c3=1.845; c4=415.91; c5=0.1128; c6=2.3538;
d0=10; d1=-1;
h1=37.5;
for i=100:npontos
x(i)=dist(i);
k=log10(h1/9.375)/log10(2);
E1 = (a0*k^2 + a1*k + a2)*log10(x(i)) + 0.1955*k^2 + 1.8671*k + a3; qsi = log10(x(i))^b5;
Ereff = b0 * (exp(-b4 * 10^qsi) - 1) + b1 * exp(-((log10(x(i)) - b2)/b3)^2) - b6 *
log10(x(i)) + b7;
Eoff = c0/2 * k * (1 - tanh(c1 * (log10(x(i)) - c2 - c3^k/c4))) + c5 * k^c6;
pb=d0+d1*sqrt(k);
E2=Ereff+Eoff;
pbb=8;
Efs(i)=106.9-20*log10(x(i));
Eu1 = 10^(E1 + E2)/pb;
Eu2 = 10^(E1/pb) + 10^(E2/pb);
Eu = pb * log10(Eu1/Eu2);
Eb1 = 10^(Eu + Efs(i))/pbb;
Eb2 = 10^(Eu/pbb) + 10^(Efs(i)/pbb);
Eb(i) = pbb * log10(Eb1/Eb2);
end
function[x, Efs, Eb] = cammpoITU1546(npontos, Edb, dist, alt);
h1=37.5;
a0=0.0946; a1=0.8849; a2=-35.399; a3=92.778;
b0 = 51.6386; b1 = 10.9877; b2 = 2.2113; b3 = 0.5384; b4 = 4.323*10^-6; b5 = 1.52; b6 =
49.52; b7 = 9728;
c0=6.4701; c1=2.9820; c2=1.7604; c3=1.7508; c4=198.33; c5=0.1432; c6=2.2690;
d0=5; d1=1.2;
for i=100:npontos
x(i) = dist(i);
k = log10(h1/9.375)/log10(2);
E1 = (a0 * k^2 + a1 * k + a2) * log10(x(i)) + 0.1955 * k^2 + 1.8671 * k + a3;
qsi = log10(x(i))^b5;
Ereff = b0 * (exp(-b4 * 10^qsi) - 1) + b1 * exp(-((log10(x(i)) - b2)/b3)^2) - b6 *
log10(x(i)) + b7;
Eoff = c0/2 * k * (1 - tanh(c1 * (log10(x(i)) - c2 - c3^k/c4))) + c5 * k^c6;
pb = d0 + d1 * sqrt(k);

```

```

E2 = Ereff + Eoff;
pbb=8;
Efs(i) = 106.9 - 20 * log10(x(i));
Eu1 = 10(E1 + E2)/pb;
Eu2 = 10(E1/pb) + 10(E2/pb);
Eu = pb * log10(Eu1/Eu2);
Eb1 = 10(Eu + Efs(i))/pbb;
Eb2 = 10(Eu/pbb) + 10(Efs(i)/pbb);
Eb(i)=pbb*log10(Eb1/Eb2);
end

```

## A.7 Teste comparação

```

clear
clc
close all
[num,text,row] = xlsread('Dados');
[li,co] = size(num);
for comp1 = 1: co
    bairroA = num(:,comp1);
    [l,c]=find(isnan(bairroA));
    bairroA(l)=[];
    for comp2 = 1: co
        bairroB = num(:,comp2);
        [l2,c2]=find(isnan(bairroB));
        bairroB(l)=[];
        [p(comp1,comp2),h]=ranksum(bairroA,bairroB);
    end
end
end

```

## A.8 Comparação modelos

```

clear all
n=1;
f=600;
d=10;
R=10;
h1=37.5;
h2=1.5;

```



```

inicio=100;
Pt=2500*0.3;
Gt=9.12;
planilha='Santa Monica1.xlsx' dados=xlsread(planilha);
erp=2500*9.12;
dimensao=size(dados);
npontos=dimensao(1,1);
EdB=dados(:,9);
dist=dados(:,3);
alt=dados(:,4);
entrada=[dist alt];
saida=EdB;
[x, Efs, Eb] = camposemcorrecaoITU1546(h1, npontos, inicio, EdB, dist, alt, Pt, Gt);
for i=inicio:npontos
[C1, C2, C3, C4] = campocorrecaoh2ITU1546(f, inicio, dist(i), R, h1, h2);
campototal(i) = Eb(i) + C1;
neural(i) = rnaudicompleta([dist(i)alt(i)]);
end
[Ehata]=hata(f,h1,h2,dist,inicio,npontos,Pt,Gt);
figure(1)
semilogx(x, campototal, 'm', x, Efs, 'y', x, EdB, 'b', x, Ehata, 'g', x, neural, 'r')
xlabel('Distância[km]')
ylabel('CampoElétricoem[dB$muV/m]')
legend('E.ITU - P.1546 - 6', 'E.EspaçoLivre', 'E.Medido', 'E.Hata', 'E.RNA')
grid
Campomedido = EdB';
CampoHata = Ehata;
Campo1546 = Eb;
Campo1546c = campototal;
Campogerado = neural;
Campoespacolivre = Efs;
mediamedido = mean(Campomedido);
mediaHata = mean(CampoHata);
media1546 = mean(Campo1546);
media1546c = mean(Campo1546c);
mediagerado = mean(Campogerado);
mediaespacolivre = mean(Campoespacolivre);
erromHata = sum(CampoHata - Campomedido)/length(CampoHata);
errom1546 = sum(Campo1546 - Campomedido)/length(CampoHata);

```

```

errom1546c = sum(Campo1546c - Campomedido)/length(CampoHata);
erromgerado = sum(Campogerado - Campomedido)/length(CampoHata);
erromespacolivre = sum(Campoespacolivre - Campomedido)/length(CampoHata);
erroabHata = sum(abs(CampoHata - Campomedido))/length(CampoHata);
erroab1546 = sum(abs(Campo1546 - Campomedido))/length(CampoHata);
erroab1546c = sum(abs(Campo1546c - Campomedido))/length(CampoHata);
erroabgerado = sum(abs(Campogerado - Campomedido))/length(CampoHata);
erroabespacolivre = sum(abs(Campoespacolivre - Campomedido))/length(CampoHata);
desviomedido = std(Campomedido);
desvioHata = sqrt(sum(EdB'.2 - erroabHata.2)/length(CampoHata));
desvio1546 = sqrt(sum(EdB'.2 - erroab1546.2)/length(CampoHata));
desvio1546c = sqrt(sum(EdB'.2 - erroab1546c.2)/length(CampoHata));
desviogerado = sqrt(sum(EdB'.2 - erroabgerado.2)/length(CampoHata));
desvioespacolivre = sqrt(sum((EdB' - erroabespacolivre).2)/length(CampoHata));
ermsHata = sqrt(erroabHata2 - desvioHata2);
erms1546 = sqrt(erroab15462 - desvio15462);
erms1546c = sqrt(erroab1546c2 - desvio1546c2);
ermsgerado = sqrt(erroabgerado2 - desviogerado2);
ermsespacolivre = sqrt(erroabespacolivre2 - desvioespacolivre2);
erroeqmHata = sum((CampoHata - Campomedido).2)/length(CampoHata);
erroeqm1546 = sum((Campo1546 - Campomedido).2)/length(CampoHata);
erroeqm1546c = sum((Campo1546c - Campomedido).2)/length(CampoHata);
erroeqmgerado = sum((Campogerado - Campomedido).2)/length(CampoHata);
erroeqmespacolivre = sum((Campoespacolivre - Campomedido).2)/length(CampoHata);
resultados = [mediamedido, mediaHata, media1546, media1546c,
mediagerado, mediaespacolivre, erromHata, errom1546, errom1546c,
erromgerado, erromespacolivre, erroabHata, erroab1546, erroab1546c,
erroabgerado, erroabespacolivre, desvioHata, desviomedido,
desvio1546, desvio1546c,
desviogerado, desvioespacolivre, ermsHata,
erms1546, erms1546c, ermsgerado, ermsespacolivre];
filename=['tabela' planilha];
tabela = Modelo, Média, ErroMédio, ErroRMS, DesvioPadrão1546, media1546c, errom1546c, erms1546c,
erromespacolivre, ermsespacolivre, desvioespacolivre
Hata, mediaHata, erromHata, ermsHata, desvioHataRNA, mediagerado,
erromgerado, ermsgerado, desviogerado
xlswrite(filename, tabela)

```