



Leonardo de Lima Freitas

**Análise da Propagação Troposférica em Meios
Inomogêneos Bidimensionais Marítimos Utilizando
Traçado de Raios e Dados Meteorológicos de Boias
Oceanográficas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Emanuel Paiva de Oliveira Costa

Rio de Janeiro
Agosto de 2018



Leonardo de Lima Freitas

**Análise da Propagação Troposférica em Meios
Inomogêneos Bidimensionais Marítimos Utilizando
Traçado de Raios e Dados Meteorológicos de Boias
Oceanográficas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Emanuel Paiva de Oliveira Costa
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof.^a Leni Joaquim de Matos
UFF

Prof. Guilherme Simon da Rosa
Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello
Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Márcio da Silveira Carvalho
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de agosto de 2018.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Leonardo de Lima Freitas

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações na Universidade Estácio de Sá em 2007. É oficial do Corpo de Engenheiros da Marinha com experiência nas áreas de calibração de instrumentos de teste e medição, telefonia e comunicações por satélite.

Ficha Catalográfica

Freitas, Leonardo de Lima

Análise da propagação troposférica em meios inomogêneos bidimensionais marítimos utilizando traçado de raios e dados meteorológicos de boias oceanográficas / Leonardo de Lima Freitas; orientador: Emanuel Paiva de Oliveira Costa. – 2018.

128 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Traçado de raios. 3. Troposfera. 4. Duto de evaporação. 5. Micro-ondas. 6. Boias oceanográficas. I. Costa, Emanuel Paiva de Oliveira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

A Deus, à minha família e aos amigos,
meu sincero agradecimento.

Agradecimentos

A Deus por ser o meu amparo e refúgio nos momentos de dificuldade, por ter preservado minha saúde física e mental neste intenso período acadêmico e por ter colocado em minha vida pessoas especiais que souberam compreender as minhas ausências nos últimos dois anos.

À minha esposa Patricia e ao meu filho João Paulo, por terem me incentivado a perseverar até o fim, suportando os momentos de dificuldade e comemorando as vitórias.

Aos meus pais, Maria de Fátima e Jorge Miralha (*in memoriam*), por não terem medido esforços para me proporcionar educação acadêmica e moral. À minha irmã Larissa, que celebra comigo as minhas conquistas, e ao meu sobrinho Bento, mais novo integrante da família.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Emanuel Costa, pela disponibilidade e prontidão em me ajudar e pela compreensão das minhas limitações.

À Marinha do Brasil, em especial à Diretoria de Comunicações e Tecnologia da Informação da Marinha (DCTIM), pela oportunidade e pela confiança depositada em mim.

Aos professores e funcionários da PUC-Rio, em especial do CETUC.

Aos amigos que fiz nestes dois anos de mestrado, destacando Edson Schlosser e Johnes Ricardo que muito me auxiliaram nos difíceis momentos iniciais do curso.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo

Freitas, Leonardo de Lima; Costa, Emanuel Paiva de Oliveira. **Análise da Propagação Troposférica em Meios Inomogêneos Bidimensionais Marítimos Utilizando Traçado de Raios e Dados Meteorológicos de Boias Oceanográficas**. Rio de Janeiro, 2018. 128p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O crescimento da demanda por serviços de telecomunicações em terra firme também pode ser encontrado em ambientes marítimos por usuários a bordo de embarcações, sejam elas civis ou militares. Nestes ambientes, um fenômeno conhecido como duto de evaporação influencia a propagação eletromagnética na troposfera, proporcionando a comunicação ponto-a-ponto em distâncias além do horizonte rádio. Este trabalho utiliza a técnica de traçado de raios para analisar o comportamento da onda eletromagnética nestes meios. Foi elaborado um algoritmo capaz de traçar raios e determinar amplitudes e fases do campo elétrico em meios inomogêneos bidimensionais dado um mapa de refratividade modificada M . A partir destes mapas, o algoritmo calcula os gradientes verticais de M , que podem variar ao longo do percurso, e traça os raios, a partir da antena transmissora. Como aplicação, além de cenários com dutos de evaporação, foram utilizados mapas de M estimados com base em dados meteorológicos fornecidos por radiossondas lançadas no litoral brasileiro. Os resultados obtidos foram comparados aos fornecidos pelo *software Advanced Refractive Effects Prediction System (AREPS)*, baseado na solução numérica de equação parabólica. Este trabalho também apresenta resultados estatísticos de dutos de evaporação no litoral brasileiro, a partir de dados meteorológicos fornecidos por boias oceanográficas do Programa Nacional de Boias (PNBOIA). Para tal, é utilizado, com pequenas alterações, o algoritmo de Paulus-Jeske, que estima a altura de dutos de evaporação.

Palavras-chave

Traçado de raios; troposfera; amplitude; duto de evaporação; micro-ondas; equações parabólicas, boias oceanográficas; radiossondas.

Abstract

Freitas, Leonardo de Lima; Costa, Emanuel Paiva de Oliveira (Advisor). **Analysis of Tropospheric Propagation in Inhomogeneous Two-Dimensional Maritime Media Using Ray Tracing and Meteorological Data from Oceanographic Buoys**. Rio de Janeiro, 2018. 128p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The demand growth for land-based telecommunications services can also be found in maritime environments by users on board ships, whether civilian or military. In these environments, a phenomenon known as the evaporation duct influences electromagnetic propagation in the troposphere, providing point-to-point communication at distances beyond the radio horizon. This work uses the ray-tracing technique to analyze the behavior of electromagnetic waves in these media. An algorithm capable of tracing rays and determining electric field amplitudes and phases in two-dimensional inhomogeneous media was developed, given a map of modified refractivity M . From these maps, the algorithm calculates the vertical gradients of M , which can vary along the path, and traces rays from the transmitting antenna. As an application, in addition to scenarios with evaporation ducts, M maps were estimated based on meteorological data provided by radiosondes launched in the Brazilian coast. The results obtained were compared with those provided by the Advanced Refractive Effects Prediction System (AREPS) software, based on the numerical solution of parabolic equation. This work also presents statistical results of evaporation ducts in the Brazilian coast, based on meteorological data provided by oceanographic buoys of *Programa Nacional de Boias* (PNBOIA). For this, the Paulus-Jeske algorithm, which estimates the height of the evaporation ducts, is used with small changes.

Keywords

Ray tracing; troposphere; amplitude; evaporation duct; microwaves; parabolic equations, oceanographic buoys; radiosondes.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Descrição do Problema	20
1.2 Objetivos do Trabalho	21
1.3 Organização do Texto	22
2 ÓTICA GEOMÉTRICA E MODELO DE TRAÇADO DE RAIOS	23
2.1 Equação Eiconal	23
2.2 Intensidade de Campo	27
2.3 Trajetória do Raio	33
2.4 Aproximação para Terra Planificada	38
2.5 Traçado de Raios	42
2.5.1 Função de Transferência	43
3 ÍNDICE DE REFRAÇÃO DA TROPOSFERA	46
3.1 Índice de Refração, Refratividade e Condições Meteorológicas	46
3.2 Gradientes da Refratividade e Fenômenos de Radiopropagação	46
3.2.1 Tipos de Dutos	48
3.3 Mapa do Gradiente da Refratividade Modificada	49
3.4 Sondagem	51
4 DUTOS DE EVAPORAÇÃO	53
4.1 Modelo de Paulus-Jeske para Dutos de Evaporação	53
4.2 Estimativa da Altura de um Duto de Evaporação	56
4.3 Estatísticas das Alturas de Dutos de Evaporação	58
4.3.1 Rio Grande	59
4.3.1.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Rio Grande	60
4.3.2 Itajaí	62
4.3.2.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Itajaí	63
4.3.3 Santos	66
4.3.3.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Santos	66

4.3.4 Niterói	69
4.3.4.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Niterói	70
4.3.5 Cabo Frio	72
4.3.5.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Cabo Frio	73
4.3.6 Vitória	75
4.3.6.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Vitória	76
4.3.7 Porto Seguro	78
4.3.7.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Porto Seguro	79
4.3.8 Recife	81
4.3.8.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Recife	81
4.3.9 Fortaleza	83
4.3.9.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Fortaleza	84
4.3.10 Comparações	85
4.3.10.1 Niterói e Cabo Frio	85
4.3.10.2 Rio Grande e Itajaí	87
4.3.10.3 Vitória e Recife	88
4.3.10.4 Itajaí e Fortaleza	90
4.3.10.5 Cabo Frio e Fortaleza	91
4.3.11 Comportamento dos Dutos de Evaporação nos Períodos do Dia	92
4.3.12 Probabilidade de Ocorrência	93
 5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO ELETROMAGNÉTICA	 94
5.1 Mapas com Variação do Gradiente da Refratividade Modificada ∇M ao Longo do Percorso	94
5.2 Mapas Resultantes de Sondagens Atmosféricas	97
5.2.1 Sondagem do Dia 15/01/2009	98
5.2.2 Sondagem do Dia 16/01/2009	100
5.2.3 Sondagem do Dia 17/01/2009	102
5.2.4 Sondagem do Dia 19/01/2009	104
5.2.5 Sondagem do Dia 24/01/2009	105
5.2.6 Sondagem do Dia 25/01/2009	107

5.2.7 Sondagem do Dia 27/01/2009	109
5.2.8 Sondagem do Dia 31/01/2009	111
5.2.9 Sondagem do Dia 01/02/2009	112
5.2.10 Sondagem do Dia 02/02/2009	114
5.3 Mapas Resultantes de Cenários Hipotéticos	115
5.3.1 Perfil Vertical de Terreno em Ambiente de Atmosfera Padrão	116
5.3.2 Duto de Evaporação	117
5.3.2.1 Antena Transmissora Acima do Duto	118
5.3.2.2 Antena Transmissora Dentro do Duto	120
 6 CONCLUSÃO	 122
6.1 Contribuições da Pesquisa	122
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	124
 7 Referências bibliográficas	 126

Lista de Figuras

Figura 2.1: Ortogonalidade entre o raio geométrico e a frente de onda	29
Figura 2.2: Conservação da energia em um feixe de raios	30
Figura 2.3: a) Trajetória de dois raios com ângulos de partida e chegada, b) Cone formado por dois raios.	32
Figura 2.4: Trajetória e ângulos de lançamento e chegada de um raio	34
Figura 2.5: Aproximação de um arco por um segmento de reta para ângulos pequenos	35
Figura 2.6: Curvatura de um raio	36
Figura 2.7: Curvatura e ortogonalidade de um raio	37
Figura 3.1: Comportamento dos raios conforme o gradiente da refratividade modificada M .	47
Figura 3.2: Perfis dos gradientes da refratividade modificada, associados aos dutos.	49
Figura 3.3: Adaptação e discretização do mapa de refratividade modificada M de Canterbury – Nova Zelândia. Reproduzida de [3].	50
Figura 3.4: Traçado de raios sobre o mar usando o mapa de ∇M de Canterbury – Nova Zelândia observado na figura anterior.	50
Figura 3.5: Imagem, utilizando o <i>Google Earth</i> , das localizações e datas das sondagens realizadas pela Marinha do Brasil.	51
Figura 3.6: Perfis verticais da refratividade modificada $M(h)$ e datas das sondagens realizadas pela Marinha do Brasil.	52
Figura 4.1: Imagem, utilizando o <i>Google Earth</i> , da localização das boias oceanográficas do programa PNBOIA.	57
Figura 4.2: Dutos e dados meteorológicos da boia de Itajaí no mês de setembro de 2017.	58
Figura 4.3: Ilustração da localização da boia Rio Grande, utilizando a ferramenta <i>Google Earth</i> .	59
Figura 4.4: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Rio Grande nos anos de: (a) 2009, (b) 2012, (c) 2013 e (d) 2017.	60

Figura 4.5: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Rio Grande.	61
Figura 4.6: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Rio Grande por período horário em diversos meses de 2009, 2012 e 2017.	61
Figura 4.7: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Rio Grande por período horário em junho de 2017.	62
Figura 4.8: Ilustração da localização da boia Itajaí, utilizando a ferramenta <i>Google Earth</i> .	62
Figura 4.9: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Itajaí nos anos de: (a) 2009, (b) 2011, (c) 2012 e (d) 2013.	63
Figura 4.10: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Itajaí nos anos de: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017.	63
Figura 4.11: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Itajaí.	64
Figura 4.12: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Itajaí por período horário em diversos meses de 2009 e 2011.	65
Figura 4.13: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Itajaí por período horário em diversos meses de 2012, 2013, 2015 e 2017.	65
Figura 4.14: Ilustração da localização da boia Santos, utilizando a ferramenta <i>Google Earth</i> .	66
Figura 4.15: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Santos nos anos de: (a) 2011, (b) 2012 e (c) 2017.	67
Figura 4.16: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Santos nos anos de: (a) 2014 e (b) 2015.	67
Figura 4.17: Médias das alturas dos dutos a cada mês para a boia Santos.	68
Figura 4.18: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Santos por período em diversos meses de 2011.	68
Figura 4.19: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Santos por período em diversos meses de 2012, 2014, 2015 e 2017.	69
Figura 4.20: Ilustração da localização da boia Niterói, utilizando a ferramenta <i>Google Earth</i> .	69
Figura 4.21: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Niterói nos anos de: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017.	70

Figura 4.22: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Niterói.	71
Figura 4.23: Altura média dos dutos de Niterói por período em diversos meses dos anos de 2015 e 2016.	71
Figura 4.24: Altura média dos dutos de Niterói por período em diversos meses do ano de 2016.	72
Figura 4.25: Ilustração das localizações da boia Cabo Frio, utilizando a ferramenta <i>Google Earth</i> .	72
Figura 4.26: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Cabo Frio nos anos de: (a) 2009, (b) 2012, (c) 2016 e (d) 2017.	73
Figura 4.27: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Cabo Frio: (a) localização 1 e (b) localização 2.	74
Figura 4.28: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Cabo Frio por período horário em diversos meses de 2019, 2012 e 2016.	74
Figura 4.29: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Cabo Frio por período horário em diversos meses de 2016 e 2017.	75
Figura 4.30: Ilustração da localização da boia Vitória, utilizando a ferramenta <i>Google Earth</i> .	75
Figura 4.31: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Vitória nos anos de: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017.	76
Figura 4.32: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Vitória.	77
Figura 4.33: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Vitória por período horário em diversos meses de 2015 e 2016.	77
Figura 4.34: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Vitória por período horário em diversos meses de 2016 e 2017.	78
Figura 4.35: Ilustração da localização da boia Porto Seguro, utilizando a ferramenta <i>Google Earth</i> .	78
Figura 4.36: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Porto Seguro nos anos de: (a) 2012, (b) 2013, (c) 2015 e (d) 2016.	79

Figura 4.37: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Porto Seguro.	80
Figura 4.38: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Porto Seguro por período horário em diversos meses de 2013, 2016 e 2017.	80
Figura 4.39: Ilustração da localização da boia Recife, utilizando a ferramenta <i>Google Earth</i> .	81
Figura 4.40: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Recife nos anos de: (a) 2014, (b) 2015 e (c) 2016.	82
Figura 4.41: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Recife.	82
Figura 4.42: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia de Recife por período horário em diversos meses de 2015 e 2016.	83
Figura 4.43: Ilustração da localização da boia Fortaleza, utilizando a ferramenta <i>Google Earth</i> .	83
Figura 4.44: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Fortaleza nos anos de: (a) 2016 e (b) 2017.	84
Figura 4.45: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Fortaleza.	84
Figura 4.46: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia de Fortaleza por período horário em maio/2017.	85
Figura 4.47: Dutos e dados meteorológicos da boia de Niterói no mês de março de 2017.	86
Figura 4.48: Dutos e dados meteorológicos da boia de Cabo Frio no mês de março de 2017.	86
Figura 4.49: Dutos e dados meteorológicos da boia de Rio Grande no mês de julho de 2012.	87
Figura 4.50: Dutos e dados meteorológicos da boia de Itajaí no mês de julho de 2012.	88
Figura 4.51: Dutos e dados meteorológicos da boia de Vitória no mês de janeiro de 2016	89
Figura 4.52: Dutos e dados meteorológicos da boia de Recife no mês de janeiro de 2016.	89

Figura 4.53: Dutos e dados meteorológicos da boia de Itajaí no mês de julho de 2017.	90
Figura 4.54: Dutos e dados meteorológicos da boia de Fortaleza no mês de julho de 2017.	91
Figura 4.55: Dutos e dados meteorológicos da boia de Cabo Frio no mês de fevereiro de 2017.	92
Figura 4.56: Dutos e dados meteorológicos da boia de Fortaleza no mês de fevereiro de 2017.	92
 Figura 5.1: Adaptação e discretização do mapa de refratividade modificada M de: a) Canterbury – Nova Zelândia e b) Canal Inglês. Reproduzidos de [3] e [19], respectivamente.	95
Figura 5.2: Traçado de raios com gradiente de refratividade modificada colorido ao fundo das regiões de: (a) Canterbury e (b) Canal Inglês.	96
Figura 5.3: Perda de Propagação em função da frequência, para as regiões de Canterbury e Canal Inglês, a 90 km de distância do transmissor.	97
Figura 5.4: Traçado de raios para o perfil vertical da refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 15/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.	98
Figura 5.5: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 15/01/2009 para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	100
Figura 5.6: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 16/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.	101
Figura 5.7: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 16/01/2009 para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	102
Figura 5.8: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 17/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.	102

Figura 5.9: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 17/01/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	103
Figura 5.10: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 19/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.	104
Figura 5.11: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 19/01/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	105
Figura 5.12: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 24/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.	106
Figura 5.13: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 24/01/2009 para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	107
Figura 5.14: Perda de propagação, sem utilizar a bissetção, para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 24/01/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	107
Figura 5.15: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 25/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.	108
Figura 5.16: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 25/01/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	109
Figura 5.17: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 27/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.	110
Figura 5.18: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 27/01/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	110

Figura 5.19: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 31/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.	111
Figura 5.20: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 31/01/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	112
Figura 5.21: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 01/02/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.	113
Figura 5.22: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 01/02/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	113
Figura 5.23: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 02/02/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.	114
Figura 5.24: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 02/02/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	115
Figura 5.25: Traçado de raios para uma atmosfera padrão, com perfil vertical de terreno e antena transmissora a 20 m de altura: (a) 500 raios entre -4° e 4° e (b) 30 raios entre $-0,05^\circ$ e 0° .	116
Figura 5.26: Perda de propagação para uma atmosfera padrão com perfil vertical do terreno, antenas a 20 m de altura e frequência de 1 GHz: (a) configuração com 500 raios e (b) combinação das configurações de 500 e 30 raios.	117
Figura 5.27: Traçado de raios para uma atmosfera com duto de evaporação de 20 m e antena transmissora a 35 m de altura.	118
Figura 5.28: Perda de propagação para uma atmosfera com duto de evaporação de 20 m e antenas a 35 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	119
Figura 5.29: Perda de propagação, sem utilizar a bisseção, para uma atmosfera com duto de evaporação de 20 m e antenas a 35 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.	119

Figura 5.30: Traçado de raios para uma atmosfera com duto de evaporação de 20 m e antena a 15 m de altura. 120

Figura 5.31: Perda de propagação para uma atmosfera com duto de evaporação de 20 m e antenas a 15 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz. 121

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Classificação dos gradientes da refratividade N e da refratividade modificada M	47
Tabela 3.2: Classificação e características de dutos.	48
Tabela 4.1: Impacto da variação da velocidade do vento na altura do duto de evaporação.	87
Tabela 4.2: Impacto da variação da umidade do ar na altura do duto de evaporação.	88
Tabela 4.3: Impacto da variação da umidade do ar na altura do duto de evaporação.	90
Tabela 4.4: Impacto da variação das temperaturas na altura do duto de evaporação.	91
Tabela 4.5: Probabilidade percentual de ocorrência mensal de dutos de evaporação com alturas superiores a 20 m no litoral brasileiro.	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do Problema

A demanda por serviços de telecomunicações em ambientes marítimos tem aumentado a cada ano. Usuários comuns a bordo de embarcações destinadas ao lazer compartilham arquivos de imagem e vídeo de alta resolução. Dados meteorológicos mais precisos e cartas náuticas de alta resolução também são exemplos de demandas de uma embarcação, por parte de sua tripulação. Plataformas de petróleo transmitem e recebem informações de produção, telemetria e monitoramento em tempo real. Embarcações militares demandam serviços de comunicações operacionais e táticas cada vez mais sofisticados. Como consequência disto, o mercado de terminais de comunicações por satélite VSAT (*Very Small Aperture Terminal*) tem crescido a cada ano [1]. Os serviços oferecidos por estes terminais têm alta mobilidade, porém um custo elevado de manutenção. Uma alternativa mais econômica é a utilização de enlaces de visada direta entre embarcações (entenda-se também plataformas) e estações terrestres, assim como entre embarcações no mar, no caso de operações militares. Em uma operação naval pode-se, por exemplo, configurar uma rede do tipo estrela entre os meios envolvidos, utilizando os enlaces de micro-ondas, onde a estação central seria o único meio possuidor de um terminal VSAT, funcionando como *gateway* da rede.

Dentro deste contexto, é necessário que se pesquise o comportamento da propagação eletromagnética na camada da troposfera situada entre a superfície do mar e dezenas de metros de altura, que pode ser simulado utilizando-se métodos numéricos para ambientes bidimensionais, como Equações Parabólicas, ou o Traçado de Raios. Nestes casos, o índice de refração é a característica mais importante do ambiente e pode ser determinado utilizando-se medições meteorológicas realizadas em campanhas marítimas e modelos matemáticos [2], [3].

Nestes ambientes marítimos, dutos de evaporação ocorrem com alta frequência, influenciando diretamente o alcance de enlaces de telecomunicações, permitindo inclusive comunicação além da linha de visada direta (b-LoS – *Beyond-*

Line-of-sight) [4]. Há diversos modelos matemáticos que estimam altura de duto de evaporação [5], embora haja no Brasil uma carência de dados estatísticos sobre o assunto. Em [6], é possível encontrar resultados de ocorrência de dutos de evaporação na região de Rio Grande-RS, simulados a partir de medições meteorológicas realizadas por sensores a bordo de uma boia oceanográfica.

1.2 Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivos:

- a) Elaborar uma formulação teórica de traçado de raios em ambientes bidimensionais inhomogêneos, para análise não só da trajetória, mas também da amplitude e da fase do campo eletromagnético.
- b) Implementar o modelo de traçado de raios descrito em a) utilizando o *software* comercial MatLab.
- c) Implementar o modelo de altura de duto de evaporação desenvolvido por Paulus-Jeske [7] utilizando o *software* comercial MatLab.
- d) Implementar o modelo de perfil de variação da refratividade modificada M em relação à altura, descrito em [8].
- e) Utilizar o algoritmo descrito em c) para gerar resultados estatísticos de alturas de dutos de evaporação na costa brasileira, utilizando informações meteorológicas fornecidas pelas boias oceanográficas do Programa Nacional de Boias (PNBOIA).
- f) Simular perfis de M utilizando o algoritmo descrito em d) e dados meteorológicos de radiossondas lançadas durante uma operação naval realizada na costa brasileira.
- g) Utilizar o algoritmo descrito em b) para simular a trajetória dos raios e amplitudes do campo eletromagnético em diversos cenários, com mapas de M gerados pelas simulações descritas em e) e f) e com mapas de M hipotéticos.
- h) Comparar os resultados obtidos pela simulação descrita em g) com resultados simulados pelo *software Advanced Refractive Effects Prediction System* versão 3.6 (AREPS), que utiliza solução numérica de equação parabólica.

1.3 Organização do Texto

O trabalho é organizado em 6 capítulos, incluindo esta introdução. A seguir, um resumo dos capítulos subsequentes:

No capítulo 2, são demonstrados, com base na ótica geométrica, os desenvolvimentos teóricos da trajetória de raios, da intensidade de campo eletromagnético utilizando tubo de raios e da aproximação para Terra planificada. Também é descrita a implementação, utilizando o *software* comercial MatLab, da formulação do traçado de raios com a caracterização da refratividade do meio e seus gradientes.

No capítulo 3, são apresentadas: a relação entre o índice de refração, a refratividade e as condições meteorológicas na troposfera; a relação entre o gradiente da refratividade e os fenômenos de propagação (duto, super-refração, sub-refração e atmosfera normal); a implementação do cálculo da refratividade em meios onde o gradiente de M pode variar horizontalmente; e a caracterização da refratividade de ambientes utilizando dados meteorológicos de radiossondas em balões, lançadas durante uma operação naval.

O capítulo 4 tem como tema o fenômeno de propagação chamado de duto de evaporação, sendo descrita a implementação, utilizando o *software* comercial MatLab, do modelo de Paulus-Jeske [7] para a altura de duto de evaporação, e apresentados os resultados estatísticos das simulações de altura de duto de evaporação utilizando o referido modelo e os dados meteorológicos das boias oceanográficas do PNBOIA. Também é feita uma análise comparativa das diferenças de altura de duto encontradas em cada região geográfica brasileira.

O capítulo 5 demonstra os resultados das simulações da trajetória do traçado de raios e amplitudes de campo eletromagnético em diversos cenários (hipotéticos ou reais). A maioria dos resultados de amplitude são comparados com os resultados encontrados em simulações feitas no *software* AREPS.

As considerações finais são apresentadas no capítulo 6, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 ÓTICA GEOMÉTRICA E MODELO DE TRAÇADO DE RAIOS

Para a análise da propagação de campos eletromagnéticos no limite em que o comprimento de onda é pequeno quando comparado com as distâncias típicas necessárias para a observação de variações significativas das propriedades do meio, pode-se utilizar a aproximação da ótica geométrica, na qual ondas são localmente planas. Para as frequências de interesse nesta dissertação, superiores a 1 GHz, associadas a comprimentos de onda inferiores a 0,3 m, esta aproximação é plenamente justificável.

2.1 Equação Eiconal

Seguindo o desenvolvimento realizado por [9], [10], os campos elétrico e magnético serão escritos nas formas:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0(\vec{r}) e^{-i\omega t} = \vec{e}(\vec{r}) e^{ik_0\zeta(\vec{r}) - i\omega t} \quad (2.1)$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \vec{H}_0(\vec{r}) e^{-i\omega t} = \vec{h}(\vec{r}) e^{ik_0\zeta(\vec{r}) - i\omega t} \quad (2.2)$$

ficando a variação harmônica no tempo de todos os campos, representada pelo termo $\exp(-i\omega t)$, onde $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular e f é a frequência de operação, implícita no restante do texto. Considerando o meio linear, isotrópico, inhomogêneo, invariante no tempo e sem perdas, tem-se:

$$\vec{E}_0(\vec{r}) = \vec{e}(\vec{r}) e^{ik_0\zeta(\vec{r})} \quad (2.3)$$

$$\vec{H}_0(\vec{r}) = \vec{h}(\vec{r}) e^{ik_0\zeta(\vec{r})} \quad (2.4)$$

$$\vec{D}(\vec{r}) = \varepsilon(\vec{r}) \vec{E}(\vec{r}) \quad (2.5)$$

$$\vec{B}(\vec{r}) = \mu(\vec{r}) \vec{H}(\vec{r}) \quad (2.6)$$

Nas expressões acima, \vec{e} e \vec{h} são vetores complexos, ζ uma função real e a região de interesse é livre de correntes e cargas ($\vec{J} = 0$ e $\rho = 0$). Desta forma, as equações de Maxwell podem ser escritas na forma:

$$\nabla \times \vec{E}_0 - ik_0 c \mu \vec{H}_0 = 0 \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \vec{H}_0 + ik_0 c \varepsilon \vec{E}_0 = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon \vec{E}_0) = 0 \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot (\mu \vec{H}_0) = 0 \quad (2.10)$$

onde a constante de propagação no espaço livre é definida por:

$$k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo e $\lambda_0 = c/f$ o comprimento de onda no vácuo associado à frequência f . São conhecidas as seguintes identidades vetoriais:

$$\nabla \times (\Phi \vec{A}) = \nabla \Phi \times \vec{A} + \Phi \nabla \times \vec{A} \quad (2.11)$$

$$\nabla \cdot (\Phi \vec{A}) = \vec{A} \cdot \nabla \Phi + \Phi \nabla \cdot \vec{A} \quad (2.12)$$

$$\nabla(\Phi \beta) = \Phi \nabla \beta + \beta \nabla \Phi \quad (2.13)$$

Utilizando as eq. (2.3) e (2.11), pode-se escrever:

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E}_0 &= \nabla \times (\vec{e} e^{ik_0 \zeta}) = \nabla e^{ik_0 \zeta} \times \vec{e} + e^{ik_0 \zeta} \nabla \times \vec{e} \\ \nabla \times \vec{E}_0 &= ik_0 e^{ik_0 \zeta} \nabla \zeta \times \vec{e} + e^{ik_0 \zeta} \nabla \times \vec{e} \\ \nabla \times \vec{E}_0 &= (ik_0 \nabla \zeta \times \vec{e} + \nabla \times \vec{e}) e^{ik_0 \zeta} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Analogamente, as eq. (2.3), (2.12) e (2.13) fornecem:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\varepsilon \vec{E}_0) &= \nabla \cdot (\varepsilon \vec{e} e^{ik_0 \zeta}) = \vec{e} \cdot \nabla (\varepsilon e^{ik_0 \zeta}) + \varepsilon e^{ik_0 \zeta} \nabla \cdot \vec{e} \\ \nabla \cdot (\varepsilon \vec{E}_0) &= (\varepsilon \cdot \nabla e^{ik_0 \zeta} + e^{ik_0 \zeta} \cdot \nabla \varepsilon) \cdot \vec{e} + \varepsilon e^{ik_0 \zeta} \nabla \cdot \vec{e} \\ \nabla \cdot (\varepsilon \vec{E}_0) &= (ik_0 \varepsilon \vec{e} \cdot \nabla \zeta + \vec{e} \cdot \nabla \varepsilon + \varepsilon \nabla \cdot \vec{e}) e^{ik_0 \zeta} \end{aligned} \quad (2.15)$$

As eq. (2.7) a (2.10) indicam as seguintes dualidades do eletromagnetismo:

$$\vec{e} \rightarrow \vec{h} \quad (2.16)$$

$$\vec{h} \rightarrow -\vec{e} \quad (2.17)$$

$$\varepsilon \rightarrow \mu \quad (2.18)$$

$$\mu \rightarrow \varepsilon \quad (2.19)$$

Isto é, as substituições (2.16) a (2.19) mantêm o sistema de equações (2.7) a (2.10) inalterado. Substituindo a eq. (2.14) na eq. (2.7):

$$\begin{aligned} (ik_0 \nabla \zeta \times \vec{e} + \nabla \times \vec{e}) e^{ik_0 \zeta} - ik_0 c \mu \vec{H}_0 &= 0 \\ (ik_0 \nabla \zeta \times \vec{e} + \nabla \times \vec{e}) e^{ik_0 \zeta} - ik_0 c \mu \vec{h} e^{ik_0 \zeta} &= 0 \\ ik_0 \nabla \zeta \times \vec{e} + \nabla \times \vec{e} - ik_0 c \mu \vec{h} &= 0 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Usando as dualidades das eq. (2.16), (2.17) e (2.19) na eq. (2.20):

$$ik_0 \nabla \zeta \times \vec{h} + \nabla \times \vec{h} + ik_0 c \varepsilon \vec{e} = 0 \quad (2.21)$$

Por outro lado, substituindo a eq. (2.15) na eq. (2.10):

$$\begin{aligned} (ik_0 \varepsilon \vec{e} \cdot \nabla \zeta + \vec{e} \cdot \nabla \varepsilon + \varepsilon \nabla \cdot \vec{e}) e^{ik_0 \zeta} &= 0 \\ ik_0 \varepsilon \vec{e} \cdot \nabla \zeta + \vec{e} \cdot \nabla \varepsilon + \varepsilon \nabla \cdot \vec{e} &= 0 \\ ik_0 \vec{e} \cdot \nabla \zeta + \vec{e} \cdot \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} + \nabla \cdot \vec{e} &= 0 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Usando as dualidades das eq. (2.16) e (2.18) na eq. (2.22):

$$ik_0 \vec{h} \cdot \nabla \zeta + \vec{h} \cdot \frac{\nabla \mu}{\mu} + \nabla \cdot \vec{h} = 0 \quad (2.23)$$

Aplicando a identidade $\frac{\nabla\Phi}{\Phi} = \nabla\ln(\Phi)$ e dividindo as eq. (2.20), (2.21), (2.2) e (2.23) por ik_0 , chega-se a:

$$\nabla\zeta \times \vec{e} - c\mu\vec{h} = -\frac{\nabla \times \vec{e}}{ik_0} \quad (2.24)$$

$$\nabla\zeta \times \vec{h} + c\varepsilon\vec{e} = -\frac{\nabla \times \vec{h}}{ik_0} \quad (2.25)$$

$$\vec{e} \cdot \nabla\zeta = -\frac{1}{ik_0} [\vec{e} \cdot \nabla\ln(\varepsilon) + \nabla \cdot \vec{e}] \quad (2.26)$$

$$\vec{h} \cdot \nabla\zeta = -\frac{1}{ik_0} [\vec{h} \cdot \nabla\ln(\mu) + \nabla \cdot \vec{h}] \quad (2.27)$$

Como $k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda_0}$, $k_0 \rightarrow \infty$ para $\lambda_0 \rightarrow 0$. Isso é possível quando as propriedades do meio permanecerem constantes no espaço de um comprimento de onda (λ_0). Desta forma, pode-se desprezar os termos da direita das eq. (2.24) a (2.27).

$$\nabla\zeta \times \vec{e} - c\mu\vec{h} = 0 \quad (2.28)$$

$$\nabla\zeta \times \vec{h} + c\varepsilon\vec{e} = 0 \quad (2.29)$$

$$\vec{e} \cdot \nabla\zeta = 0 \quad (2.30)$$

$$\vec{h} \cdot \nabla\zeta = 0 \quad (2.31)$$

As equações acima indicam que, no limite considerado, os campos elétrico e magnético, perpendiculares entre si, são também perpendiculares, em cada um de seus pontos, a superfícies $\zeta = cte$. (frentes de onda geométricas). Manipulando-se a eq. (2.28), tem-se:

$$\vec{h} = \frac{1}{c\mu} (\nabla\zeta \times \vec{e}) \quad (2.32)$$

Com o auxílio da identidade vetorial:

$$\vec{A} \times (\vec{B} \times \vec{C}) = \vec{B}(\vec{A} \cdot \vec{C}) - \vec{C}(\vec{A} \cdot \vec{B}) \quad (2.33)$$

e utilizando as eq. (2.29), (2.32) e (2.33), chega-se a:

$$\begin{aligned}\nabla\zeta \times \left[\frac{1}{c\mu} (\nabla\zeta \times \vec{e}) \right] + c\varepsilon\vec{e} &= 0 \\ \frac{1}{c\mu} \nabla\zeta \times (\nabla\zeta \times \vec{e}) + c\varepsilon\vec{e} &= 0 \\ \frac{1}{c\mu} [\nabla\zeta(\nabla\zeta \cdot \vec{e}) - \vec{e}(\nabla\zeta \cdot \nabla\zeta)] + c\varepsilon\vec{e} &= 0 \\ \left\{ \frac{1}{c\mu} [\nabla\zeta(\nabla\zeta \cdot \vec{e}) - \vec{e}(\nabla\zeta \cdot \nabla\zeta)] + c\varepsilon\vec{e} \right\} \times c\mu &= \nabla\zeta(\nabla\zeta \cdot \vec{e}) - \vec{e}(\nabla\zeta \cdot \nabla\zeta) + c^2\mu\varepsilon\vec{e} = 0\end{aligned}$$

Como $n = c\sqrt{\mu\varepsilon}$ e $\nabla\zeta \cdot \vec{e} = 0$ (são ortogonais), obtém-se a equação eiconal:

$$\begin{aligned}\nabla\zeta(\nabla\zeta \cdot \vec{e}) - \vec{e}(\nabla\zeta \cdot \nabla\zeta) + c^2\mu\varepsilon\vec{e} &= 0 \\ \vec{e}[-(\nabla\zeta \cdot \nabla\zeta) + n^2] &= 0 \\ |\nabla\zeta|^2 &= n^2\end{aligned}\tag{2.34}$$

2.2 Intensidade de Campo

A densidade média de energia armazenada e o vetor de Poynting médio podem ser representados por [9]-[11]:

$$\langle w_e \rangle = \frac{1}{4} \varepsilon (\vec{e} \cdot \vec{e}^*) \tag{2.35}$$

$$\langle w_m \rangle = \frac{1}{4} \mu (\vec{h} \cdot \vec{h}^*) \tag{2.36}$$

$$\langle w_e \rangle = \langle w_m \rangle = \frac{1}{2} \langle w \rangle \tag{2.37}$$

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} \mathbb{R}(\vec{e} \times \vec{h}^*) \tag{2.38}$$

Substituindo a eq. (2.32) na eq. (2.38), obtém-se:

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} \mathbb{R}(\vec{e} \times \vec{h}^*) = \frac{1}{2} \mathbb{R} \left\{ \vec{e} \times \left[\frac{1}{c\mu} (\nabla\zeta \times \vec{e}) \right]^* \right\} = \frac{1}{2c\mu} \mathbb{R} \{ \vec{e} \times [(\nabla\zeta \times \vec{e})]^* \}$$

Aplicando a identidade vetorial da eq. (2.33) ao resultado imediatamente acima:

$$\begin{aligned}\langle \vec{S} \rangle &= \frac{1}{2c\mu} \mathbb{R}[\vec{e} \times (\nabla\zeta \times \vec{e}^*)] = \frac{1}{2c\mu} \mathbb{R}[\nabla\zeta(\vec{e} \cdot \vec{e}^*) - \vec{e}^*(\vec{e} \cdot \nabla\zeta)] \\ \langle \vec{S} \rangle &= \frac{1}{2c\mu} (\vec{e} \cdot \vec{e}^*) \nabla\zeta\end{aligned}$$

Utilizando a eq. (2.35) e a relação $n = c/v = c\sqrt{\mu\varepsilon}$, onde v é a velocidade da luz no meio, que define seu índice de refração, tem-se:

$$\begin{aligned}\langle \vec{S} \rangle &= \frac{1}{2c\mu} \nabla\zeta \langle w_e \rangle \frac{4}{\varepsilon} = \frac{2}{c\mu\varepsilon} \langle w_e \rangle \nabla\zeta \\ \langle \vec{S} \rangle &= \frac{2c}{n^2} \langle w_e \rangle \nabla\zeta\end{aligned}\tag{2.39}$$

Substituindo a eq. (2.37) na eq. (2.39):

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{c}{n^2} \langle w \rangle \nabla\zeta\tag{2.40}$$

Em seguida, substituindo a eq. (2.34) na eq. (2.40), tem-se:

$$\begin{aligned}\langle \vec{S} \rangle &= \frac{c}{n} \langle w \rangle \frac{\nabla\zeta}{|\nabla\zeta|} = \frac{c}{n} \langle w \rangle \hat{s} \\ \langle \vec{S} \rangle &= \frac{c}{n} \langle w \rangle \hat{s}\end{aligned}\tag{2.41}$$

sendo $\hat{s} = \nabla\zeta/|\nabla\zeta| = \nabla\zeta/n$ o vetor unitário que indica o sentido do vetor de Poynting médio (ou o sentido de um raio) em cada ponto. Isto é, o raio geométrico é ortogonal à frente de onda $\zeta = \text{constante}$, conforme indica a figura 2.1.

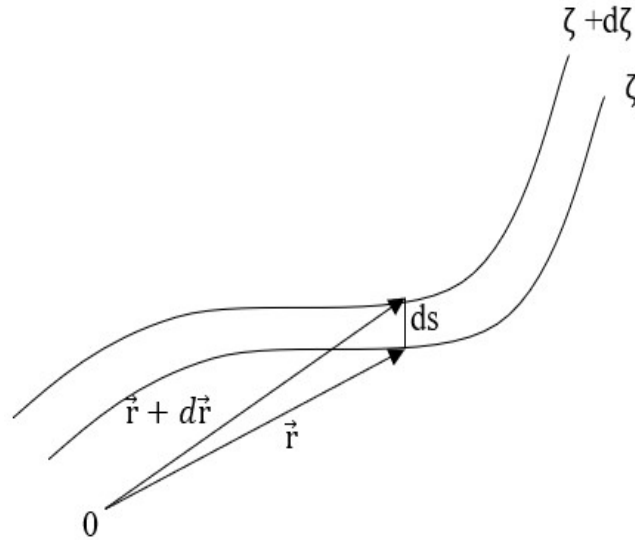


Figura 2.1: Ortogonalidade entre o raio geométrico e a frente de onda

A figura 2.1 também mostra que:

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{r}}{ds} &= \hat{s} = \frac{\nabla\zeta}{n} \\ n \frac{d\vec{r}}{ds} &= \nabla\zeta\end{aligned}\quad (2.42)$$

A definição da derivada direcional fornece:

$$\begin{aligned}\frac{d\zeta}{ds} &= \hat{s} \cdot \nabla\zeta = \frac{\nabla\zeta}{n} \cdot \nabla\zeta = \frac{n^2}{n} = n \\ d\zeta &= nds\end{aligned}$$

Logo, o percurso ótico entre dois pontos arbitrários da mesma trajetória pode ser expresso por:

$$\zeta_2 - \zeta_1 = \int_1^2 nds \quad (2.43)$$

Por outro lado, a intensidade do campo ao longo de um raio é definida por:

$$I = \langle |\vec{S}| \rangle$$

Portanto, para um meio sem fontes, sem perdas e invariante no tempo, tem-se:

$$\langle \vec{S} \rangle = I \hat{s}$$

Pela lei da conservação de energia:

$$\nabla \cdot \langle \vec{S} \rangle = 0$$

$$\nabla \cdot \langle I \hat{s} \rangle = 0 \quad (2.44)$$

Pode-se integrar a eq. (2.44) em um volume limitado por um estreito feixe de raios e superfícies perpendiculares ao mesmo, conforme mostra a figura 2.2. Usando a Lei de Gauss para transformá-la em uma integral de superfície fechada, sendo \hat{n} o vetor unitário normal a estas superfícies e dirigido para fora do volume:

$$\int (\nabla \cdot I \hat{s}) dv = \oint (I \hat{s} \cdot \hat{n}) ds = 0$$

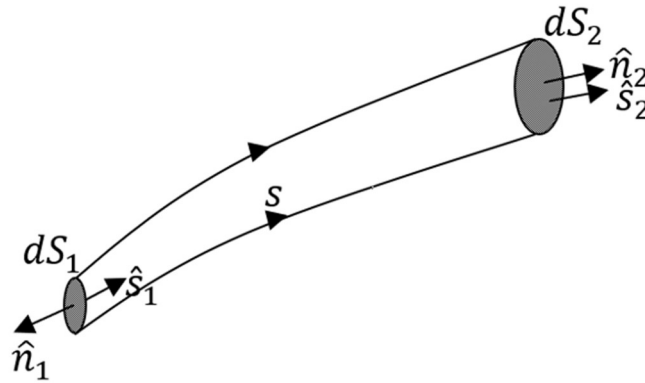


Figura 2.2: Conservação da energia em um feixe de raios

Observa-se na figura 2.2 que:

$$\hat{s}_1 \cdot \hat{n}_1 = -1$$

$$\hat{s}_2 \cdot \hat{n}_2 = 1$$

e que a superfície lateral não contribui para o fluxo. Portanto, conclui-se que:

$$I_1(\hat{s}_1 \cdot \hat{n}_1)dS_1 + I_2(\hat{s}_2 \cdot \hat{n}_2)dS_2 = 0$$

$$I_1 dS_1 = I_2 dS_2 \quad (2.45)$$

Usando as eq. (2.35) a (2.37) e (2.41), tem-se:

$$I = \frac{c}{n} \frac{1}{4} \varepsilon |\vec{e}|^2 = \frac{c}{n} \frac{1}{4} \mu |\vec{h}|^2 \quad (2.46)$$

Combinando as eq. (2.45) e (2.46), obtém-se:

$$\frac{\varepsilon}{n} |\vec{e}|^2 dS = \text{constante}$$

$$\frac{\mu}{n} |\vec{h}|^2 dS = \text{constante}$$

Para o caso de interesse, $\mu = \mu_0$, de modo que:

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\mu\varepsilon}}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\sqrt{\varepsilon_0}}$$

$$\varepsilon = n^2 \varepsilon_0$$

$$\frac{\varepsilon}{n} |\vec{e}|^2 dS = \frac{n^2 \varepsilon_0}{n} |\vec{e}|^2 dS = n \varepsilon_0 |\vec{e}|^2 dS = \text{constante}$$

$$n |\vec{e}|^2 dS = \text{constante} \quad (2.47)$$

ao longo de um feixe de raios.

A figura 2.3a mostra o traçado de dois raios, em duas dimensões, tendo como referência o centro da Terra. A diferença angular entre as elevações dos dois raios na partida é $\delta\theta_0$, a elevação horizontal do raio central no ponto de observação é ψ e δh é a diferença entre as alturas dos dois raios contínuos, na vertical local que contém o ponto de observação. A figura 2.3b, reproduzida de [10], mostra a vista superior do cone formado por dois raios.

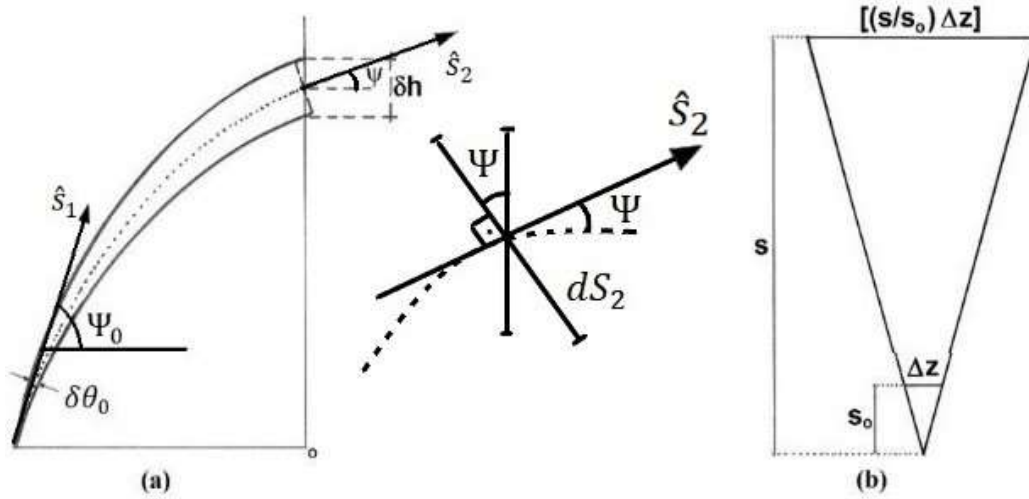


Figura 2.3: a) Trajetória de dois raios com ângulos de partida e chegada, b) Cone formado por dois raios.

As superfícies dS_1 e dS_2 , descritas na figura 2.2, podem agora ser relacionadas da seguinte forma:

$$dS_1 = S_0 \delta\theta_0 \Delta z \quad (2.48)$$

$$dS_2 = S \delta h \cos \psi \left[\left(\frac{S}{S_0} \right) \Delta z \right] \quad (2.49)$$

Aplicando a lei da conservação de energia, e substituindo os subscritos 1 e 2 por TX e RX, as eq. (2.47) a (2.49) podem ser reescritas como:

$$n_{TX} |\vec{e}_{TX}|^2 S_0 \delta\theta_0 \Delta z = n_{RX} |\vec{e}_{RX}|^2 \delta h \cos \psi \left[\left(\frac{S}{S_0} \right) \Delta z \right] \quad (2.50)$$

$$\left| \frac{\vec{e}_{RX}}{\vec{e}_{TX}} \right|^2 = \frac{n_{TX} \cdot S_0}{n_{RX} \cdot S} \cdot \frac{1}{\frac{\delta h \cdot \cos \psi}{\delta\theta_0 \cdot S_0}} \quad (2.50)$$

Antecipando a discussão dos resultados que serão apresentados em capítulo posterior, deve-se observar que a eq. (2.50) indica claramente que cálculos numéricos da amplitude do campo elétrico ao longo de um raio podem se tornar instáveis quando $\delta h / \delta\theta_0$ decrescem. A conhecida limitação da ótica geométrica indica que a equação (2.43) perde a validade quando esta razão tende a zero.

2.3 Trajetória do Raio

Sendo $\frac{d}{ds} = (\hat{s} \cdot \nabla)$ e utilizando a eq. (2.42), tem-se:

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \frac{d}{ds} (\nabla \zeta) = (\hat{s} \cdot \nabla) \nabla \zeta \quad (2.51)$$

Utilizando as identidades vetoriais:

$$\nabla(\vec{A} \cdot \vec{B}) = (\vec{A} \cdot \nabla) \vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{A} + \vec{A} \times (\nabla \times \vec{B}) + \vec{B} \times (\nabla \times \vec{A}) \quad (2.52)$$

$$\nabla \times (\nabla \Phi) = 0 \quad (2.53)$$

e lembrando que $\nabla \zeta = n\hat{s}$, chega-se a:

$$\nabla[(\nabla \zeta)^2] = \nabla(\nabla \zeta \cdot \nabla \zeta) = 2(\nabla \zeta \cdot \nabla) \nabla \zeta = 2(n\hat{s} \cdot \nabla) \nabla \zeta = 2n(\hat{s} \cdot \nabla) \nabla \zeta$$

Assim:

$$(\hat{s} \cdot \nabla) \nabla \zeta = \frac{1}{2n} \nabla[(\nabla \zeta)^2] = \frac{1}{2n} \nabla n^2 = \frac{2n}{2n} \nabla n = \nabla n \quad (2.54)$$

Substituindo a eq. (2.54) na eq. (2.51) e sendo $\nabla \zeta = n\hat{s}$, a seguinte expressão geral para a trajetória de um raio é obtida:

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{d\vec{r}}{ds} \right) = \nabla n \quad (2.55)$$

$$\frac{d}{ds} (n\hat{s}) = \nabla n \quad (2.56)$$

Considerando um meio com simetria esférica, como a atmosfera da Terra, onde o índice de refração varia em função da distância r ao seu centro 0, conforme mostra a figura 2.4, tem-se:

$$n = n(r) \quad (2.57)$$

$$\nabla n = \frac{dn}{dr} \vec{r} \quad (2.58)$$

Fazendo o vetor $[\vec{r} \times (n\hat{s})]$ variar ao longo do raio:

$$\frac{d}{ds} [\vec{r} \times (n\hat{s})] = \frac{d\vec{r}}{ds} \times (n\hat{s}) + \vec{r} \times \frac{d(n\hat{s})}{ds}$$

Como $\frac{d\vec{r}}{ds} = \hat{s}$, o primeiro termo é nulo. Utilizando as eq. (2.55) e (2.58), conclui-se que o segundo termo também é nulo:

$$\vec{r} \times \frac{d(n\hat{s})}{ds} = \vec{r} \times \nabla n = \vec{r} \times \frac{dn}{dr} \vec{r} = 0$$

Logo:

$$\frac{d}{ds} [\vec{r} \times (n\hat{s})] = 0$$

$$[\vec{r} \times (n\hat{s})] = \text{constante}$$

$$n\vec{r} \times \hat{s} = \text{constante}$$

Desta forma, \vec{r} e \hat{s} são coplanares e o raio estará contido no plano cuja normal é definida por $[\vec{r}_0 \times \hat{s}_0]$.

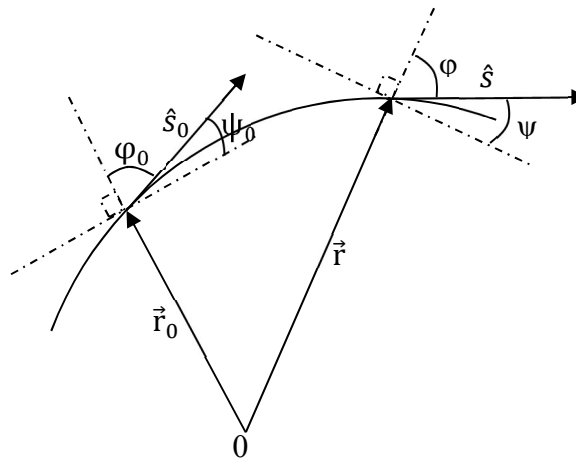


Figura 2.4: Trajetória e ângulos de lançamento e chegada de um raio

Ao longo de cada raio, tem-se:

$$nr \sin \varphi = n_0 r_0 \sin \varphi_0 = \text{constante} \quad (2.59)$$

$$\varphi + \psi = 90^\circ$$

$$nr \cos \psi = n_0 r_0 \cos \psi_0 = \text{constante} = C \quad (2.60)$$

Com base nas expressões imediatamente anterior, considerando o ângulo $d\theta$ observado na figura 2.5 muito pequeno e aproximando-se o arco formado pela trajetória por um segmento de reta, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= \frac{rd\theta}{\sqrt{(dr)^2 + (rd\theta)^2}} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2}} \\ r^2 \sin^2 \varphi + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 \sin^2 \varphi &= r^2 \end{aligned}$$

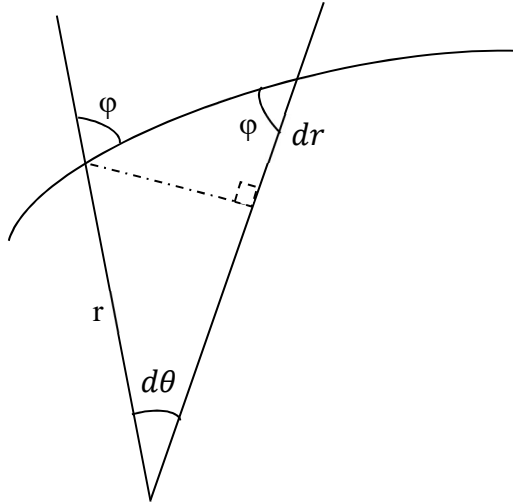


Figura 2.5: Aproximação de um arco por um segmento de reta para ângulos pequenos

Utilizando a eq. (2.59), tem-se:

$$\begin{aligned} r^2 \frac{C^2}{n^2 r^2} + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 \frac{C^2}{n^2 r^2} &= r^2 \\ r^2 C^2 + \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 C^2 &= n^2 r^4 \\ \left(\frac{dr}{d\theta}\right)^2 &= \frac{n^2 r^4}{C^2} - r^2 \\ \left(\frac{d\theta}{dr}\right)^2 &= \frac{1}{\frac{n^2 r^4}{C^2} - r^2} = \frac{C^2}{r^2(n^2 r^2 - C^2)} \end{aligned}$$

$$\theta = \pm C \int_{r_0}^r \frac{dr'}{r' \sqrt{n^2 r'^2 - C^2}} \quad (2.61)$$

Embora não seja essencial para o presente desenvolvimento, é interessante apresentar a definição de um vetor curvatura \vec{K} e suas propriedades, com o auxílio da figura 2.6. Observa-se que:

$$2\beta + \theta = 180^\circ$$

$$\alpha + \beta = 90^\circ$$

$$\alpha = \frac{\theta}{2}$$

$$\Delta \hat{s} = \hat{s}_2 - \hat{s}_1$$

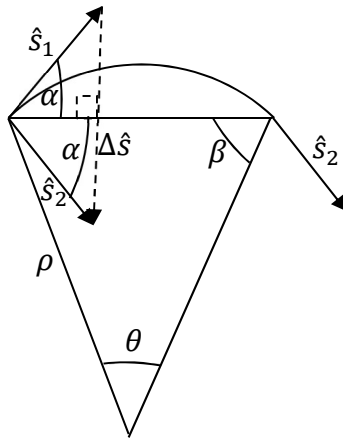


Figura 2.6: Curvatura de um raio

$$\frac{|\Delta \hat{s}|}{2} = \sin \alpha = \sin \frac{\theta}{2}$$

$$|\Delta \hat{s}| = 2 \sin \frac{\theta}{2}$$

Para valores pequenos de θ , é imediato que:

$$|\Delta \hat{s}| = \theta$$

Como o comprimento do raio é dado por:

$$\Delta s = \rho \theta$$

chega-se a:

$$\frac{|\Delta \hat{s}|}{\Delta s} = \frac{1}{\rho} = \frac{|d\hat{s}|}{ds}$$

Nas equações imediatamente acima, ρ é o raio de curvatura da trajetória. Assim, é possível definir o vetor curvatura como:

$$\vec{K} = \frac{d\hat{s}}{ds} = \frac{\hat{v}}{\rho} \quad (2.62)$$

$$n\vec{K} = n \frac{d\hat{s}}{ds}$$

Na eq. (2.62), o unitário \hat{v} indica o sentido de \vec{K} , uma vez que o raio de curvatura ρ é escalar positivo. Utilizando a eq. (2.56), tem-se:

$$\nabla n = \frac{d}{ds}(n\hat{s}) = \frac{dn}{ds}\hat{s} + n \frac{d\hat{s}}{ds}$$

Logo:

$$n\vec{K} = \nabla n - \frac{dn}{ds}\hat{s} = \nabla n - (\hat{s} \cdot \nabla)n\hat{s} = \nabla n - (\nabla n \cdot \hat{s})\hat{s}$$

$$n\vec{K} = \nabla n - (\nabla n \cdot \hat{s})\hat{s} \quad (2.63)$$

$$n\vec{K} \cdot \hat{s} = (\nabla n \cdot \hat{s}) - (\nabla n \cdot \hat{s})\hat{s} \cdot \hat{s} = (\nabla n \cdot \hat{s}) - (\nabla n \cdot \hat{s}) = 0$$

Assim, o vetor curvatura é ortogonal a \hat{s} em cada ponto da trajetória, como indica a figura 2.7. Isto é,

$$\vec{K} \cdot \hat{s} = 0$$

$$\hat{v} \cdot \hat{s} = 0$$

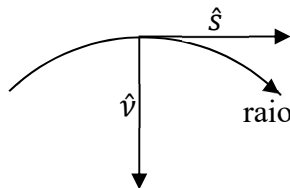


Figura 2.7: Curvatura e ortogonalidade de um raio

Utilizando as eq. (2.62) e (2.63), obtém-se:

$$n\vec{K} \cdot \hat{v} = n \frac{\hat{v}}{\rho} \cdot \hat{v} = \frac{n}{\rho}$$

$$n\vec{K} \cdot \hat{v} = (\nabla n \cdot \hat{v}) - (\nabla n \cdot \hat{s})\hat{s} \cdot \hat{v} = (\nabla n \cdot \hat{v}) - (\nabla n \cdot \hat{s}) \cdot 0 = \frac{n}{\rho}$$

$$\frac{n}{\rho} = \nabla n \cdot \hat{v}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\nabla n}{n} \cdot \hat{v} = \nabla(\log n) \cdot \hat{v}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\nabla n}{n} \cdot \hat{v} \quad (2.64)$$

$$\frac{1}{\rho} = \nabla(\log n) \cdot \hat{v} \quad (2.65)$$

Uma vez que o raio de curvatura ρ é positivo, as eq. (2.64) e (2.65) mostram que a curvatura do raio e o ∇n formam um ângulo igual ou inferior a 90° .

2.4 Aproximação para Terra Planificada [10]

Sejam:

$n \equiv$ índice de refração

$n_m \equiv$ índice de refração modificado

$N \equiv$ refratividade

$M \equiv$ refratividade modificada

$a \equiv$ raio da Terra = 6.378,137 km

Sabe-se que [8]:

$$n(h) = 1 + 10^{-6}N(h) \quad (2.66)$$

$$n_m(h) = n(h) \left(1 + \frac{h}{a}\right) \approx n(h) + \frac{h}{a} \quad (2.67)$$

$$n_m(h) = 1 + 10^{-6}M(h) \quad (2.68)$$

$$10^{-6}M(h) = n_m(h) - 1 = n(h) + \frac{h}{a} - 1 = 1 + 10^{-6}N(h) + \frac{h}{a} - 1$$

$$M(h) = N(h) + \frac{h10^6}{a} = N(h) + 156,8 h = M_0 + \alpha(h - h_0) \quad (2.69)$$

$$\alpha = \frac{M(h) - M_0}{h - h_0} \quad (2.70)$$

$$\alpha' = \frac{\alpha}{1 + 10^{-6} M_0} \quad (2.71)$$

Deve-se observar que a eq. (2.69) supõe um meio com um único gradiente α , que especifica o caso de interesse na presente seção. Utilizando a eq. (2.64), é possível determinar uma expressão para o raio de curvatura específica para o meio sob consideração:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{n}{\hat{v} \cdot \nabla n} = \frac{n}{\hat{v} \cdot 10^{-6} \nabla N} = \frac{n \cdot 10^6}{\hat{v} \cdot \nabla N} \approx \frac{10^6}{\hat{v} \cdot \nabla N} \\ \rho &\approx - \frac{10^6}{\frac{dN}{dh}} \end{aligned} \quad (2.72)$$

Sejam:

$x \equiv$ distância desejada

$h \equiv$ altura da trajetória na distância x desejada

$h_0 \equiv$ altura do transmissor

$\psi_0 \equiv$ ângulo de elevação inicial do raio com a horizontal

Isto é:

$$r = a + h$$

$$r_0 = a + h_0$$

$$x = a\theta$$

$$C_1 = C/a$$

Utilizando a eq. (2.60), pode-se escrever:

$$\begin{aligned} C_1 &= n_0 \frac{r_0}{a} \cdot \cos \psi_0 = n_0 \left(1 + \frac{h_0}{a}\right) \cdot \cos \psi_0 = n(h) \left(1 + \frac{h}{a}\right) \cdot \cos \psi_0 \\ C_1 &= n_m(h) \cdot \cos \psi_0 \end{aligned} \quad (2.73)$$

Utilizand a eq. (2.61), tem-se:

$$\begin{aligned}\theta &= \pm a C_1 \int_{h_0}^h \frac{dh'}{(a+h')\sqrt{n^2(h')(a+h')^2 - (aC_1)^2}} \\ \theta &= \pm a C_1 \int_{h_0}^h \frac{dh}{a\left(1+\frac{h'}{a}\right)\sqrt{n^2(h')a^2\left(1+\frac{h'}{a}\right)^2 - a^2C_1^2}} \\ \theta &= \pm \frac{1}{a} C_1 \int_{h_0}^h \frac{dh'}{\left(1+\frac{h'}{a}\right)\sqrt{n^2(h')\left(1+\frac{h'}{a}\right)^2 - C_1^2}}\end{aligned}$$

Combinand as eq. (2.67) e (2.71) com a imediatamente anterior, chega-se a:

$$\begin{aligned}a\theta &= \pm \int_{h_0}^h \frac{C_1 dh'}{\left(1+\frac{h'}{a}\right)\sqrt{[n_m(h')]^2 - C_1^2}} \\ x &= \pm \int_{h_0}^h \frac{dh'}{\left(1+\frac{h'}{a}\right)\sqrt{\frac{[n_m(h')]^2}{C_1^2} - 1}}\end{aligned}\quad (2.74)$$

Com base nas eq. (2.66) a (2.73), o termo $[n_m(h')/C_1]^2$ pode ser escrito na forma:

$$\begin{aligned}\frac{[n_m(h')]^2}{C_1^2} &= \frac{[1+10^{-6}M_0+10^{-6}\alpha(h'-h_0)]^2}{(1+10^{-6}M_0)^2 \cos^2 \psi_0} = \frac{\{1+10^{-6}[M_0+\alpha(h'-h_0)]\}^2}{(1+10^{-6}M_0)^2 \cos^2 \psi_0} = \\ &= \frac{1+2\cdot 10^{-6}[M_0+\alpha(h'-h_0)]+\{10^{-6}[M_0+\alpha(h'-h_0)]\}^2}{(1+10^{-6}M_0)^2 \cos^2 \psi_0} = \\ &= \frac{1}{\cos^2 \psi_0} \frac{1+2\cdot 10^{-6}[M_0+\alpha(h'-h_0)]+10^{-12}M_0^2+2\cdot 10^{-12}M_0\alpha(h'-h_0)+10^{-12}\alpha^2(h'-h_0)^2}{(1+10^{-6}M_0)^2} = \\ &= \frac{1}{\cos^2 \psi_0} \left\{ \frac{1+2\cdot 10^{-6}M_0+10^{-12}M_0^2}{(1+10^{-6}M_0)^2} + \frac{10^{-12}\alpha^2(h'-h_0)^2}{(1+10^{-6}M_0)^2} + \frac{2\cdot 10^{-6}\alpha(h'-h_0)}{(1+10^{-6}M_0)^2} + \right. \\ &\quad \left. \frac{2\cdot 10^{-12}M_0\alpha(h'-h_0)}{(1+10^{-6}M_0)^2} \right\} = \frac{1}{\cos^2 \psi_0} \left[\frac{1+2\cdot 10^{-6}M_0+10^{-12}M_0^2}{(1+10^{-6}M_0)^2} + \frac{10^{-12}\alpha^2(h'-h_0)^2}{(1+10^{-6}M_0)^2} + \right. \\ &\quad \left. \frac{2\cdot 10^{-6}\alpha(h'-h_0)\cdot(1+10^{-6}M_0)}{(1+10^{-6}M_0)\cdot(1+10^{-6}M_0)} \right] = \frac{1}{\cos^2 \psi_0} \left[\frac{1+2\cdot 10^{-6}M_0+10^{-12}M_0^2}{(1+10^{-6}M_0)^2} + \frac{10^{-12}\alpha^2(h'-h_0)^2}{(1+10^{-6}M_0)^2} + \right. \\ &\quad \left. \frac{2\cdot 10^{-6}\alpha(h'-h_0)}{(1+10^{-6}M_0)} \right] = \frac{1}{\cos^2 \psi_0} \left\{ \frac{(1+10^{-6}M_0)^2}{(1+10^{-6}M_0)^2} + [10^{-6}\alpha'(h'-h_0)]^2 + 2\cdot 10^{-6}\alpha'(h'-h_0) \right. \\ &\quad \left. h_0 \right\} = \frac{1}{\cos^2 \psi_0} \{1 + 2\cdot 10^{-6}\alpha'(h'-h_0) + [10^{-6}\alpha'(h'-h_0)]^2\}\end{aligned}$$

Portanto:

$$\frac{[n_m(h')]^2}{c_1^2} \approx \frac{1}{\cos^2 \psi_0} [1 + 2 \cdot 10^{-6} \alpha' (h' - h_0)] \quad (2.75)$$

Substituindo a eq. (2.75) na eq. (2.74) e supondo $a \gg h'$, obtém-se:

$$\begin{aligned} x &\approx \pm \int_{h_0}^h \frac{dh'}{\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \psi_0} [1 + 2 \cdot 10^{-6} \alpha' (h' - h_0)] - 1}} = \pm \int_{h_0}^h \left\{ \frac{1}{\cos^2 \psi_0} [1 + 2 \cdot 10^{-6} \alpha' (h' - h_0)] - 1 \right\}^{-1/2} dh' \\ &= \pm \left\{ \frac{2 \cos^2 \psi_0}{2 \cdot 10^{-6} \alpha'} \left\{ \frac{1}{\cos^2 \psi_0} [1 + 2 \cdot 10^{-6} \alpha' (h' - h_0)] - 1 \right\}^{1/2} \right\}_{h'=h_0}^{h'=h} = \\ &\pm \frac{\cos^2 \psi_0}{10^{-6} \alpha'} \left\{ \left\{ \frac{1}{\cos^2 \psi_0} [1 + 2 \cdot 10^{-6} \alpha' (h - h_0)] - 1 \right\}^{1/2} - \left\{ \frac{1}{\cos^2 \psi_0} [1 + 2 \cdot 10^{-6} \alpha' (h_0 - h_0)] - 1 \right\}^{1/2} \right\} \\ &= \pm \frac{\cos^2 \psi_0}{10^{-6} \alpha'} \left\{ \left\{ \frac{1}{\cos^2 \psi_0} [1 + 2 \cdot 10^{-6} \alpha' (h - h_0)] - 1 \right\}^{1/2} - \left(\frac{1}{\cos^2 \psi_0} - 1 \right)^{1/2} \right\} \\ &= \pm \frac{\cos^2 \psi_0}{10^{-6} \alpha'} \left\{ \left\{ \frac{1}{\cos^2 \psi_0} [1 + 2 \cdot 10^{-6} \alpha' (h - h_0)] - 1 \right\}^{1/2} - \left(\frac{1 - \cos^2 \psi_0}{\cos^2 \psi_0} \right)^{1/2} \right\} \\ &= \pm \frac{\cos^2 \psi_0}{10^{-6} \alpha'} \left\{ \left[\frac{1 + 2 \cdot 10^{-6} \alpha' (h - h_0)}{\cos^2 \psi_0} - 1 \right]^{1/2} - \tan \psi_0 \right\} \\ x &\approx \pm \frac{\cos^2 \psi_0}{10^{-6} \alpha'} \left\{ \left[\frac{1 + 2 \cdot 10^{-6} \alpha' (h - h_0)}{\cos^2 \psi_0} - 1 \right]^{1/2} - \tan \psi_0 \right\} \end{aligned}$$

Invertend esta equação, chega-se a:

$$\begin{aligned} (h - h_0) &= \frac{1}{2 \cdot 10^{-6} \alpha'} \left[\left(\frac{10^{-12} \alpha'^2}{\cos^4 \psi_0} x^2 \pm \frac{2 \cdot 10^{-6} \alpha'}{\cos^2 \psi_0} x \tan \psi_0 + \tan^2 \psi_0 + 1 \right) \cos^2 \psi_0 - 1 \right] \\ &= \frac{10^{-6} \alpha'}{2 \cos^2 \psi_0} x^2 \pm x \tan \psi_0 + \frac{\tan^2 \psi_0 + \cos^2 \psi_0 + 1}{2 \cdot 10^{-6} \alpha'} = \frac{10^{-6} \alpha'}{2 \cos^2 \psi_0} x^2 \pm x \tan \psi_0 \end{aligned}$$

Isto é:

$$h = h_0 \pm |x| \tan \psi_0 + \frac{10^{-6} \alpha'}{2 \cos^2 \psi_0} x^2$$

$$h = h_0 + x \tan \psi_0 + \frac{10^{-6} \alpha'}{2 \cos^2 \psi_0} x^2 \quad (2.76)$$

A eq. (2.76) é idêntica à imediatamente anterior. De fato, a versão simplificada (2.76) também garante que, para valores muito pequenos de x , o valor de h será menor ou maior que o de h_0 , dependendo do valor negativo ou positivo de ψ_0 , respectivamente.

2.5 Traçado de Raios

Foi desenvolvido um algoritmo, utilizando o *software* comercial MatLab, capaz de simular o traçado de raios bidimensional (2D) em um meio cujo perfil vertical da refratividade modificada M pode variar horizontalmente ao longo do percurso, em um sistema cartesiano (altura versus distância) que considera a Terra planificada. Este algoritmo é capaz de receber como dados de entrada as seguintes informações:

- Mapa discreto de curvas de refratividade modificada em formato de matriz (formato .xlsx).
- Topografia do terreno (acima do nível médio do mar) em formato de vetor (formato .xlsx).
- Propriedades do solo (condutividade e permissividade relativa).
- Frequência de operação (faixa de frequências de operação).
- Polarização (horizontal ou vertical).
- Quantidade e intervalo de elevações iniciais dos raios a lançar.
- Largura do feixe de meia potência da antena transmissora (diagrama Gaussiano).
- Altura das antenas transmissora e receptora.

Como dados de saída, o algoritmo pode fornecer:

- Função de transferência do meio, para uma faixa de frequências de operação.

- Visualização gráfica do traçado dos raios, tendo ao fundo, em cores, o mapa do gradiente vertical da refratividade modificada do meio e da topografia do terreno.

- Curvas representativas da perda de propagação em função: (i) da altura, para distância predefinida; e (ii) da distância, para altura do ponto de observação predefinida.

2.5.1 Função de Transferência

Sejam a altura h_{Rx} da antena receptora, a distância d entre as antenas transmissora e receptora, um conjunto ordenado de elevações iniciais igualmente espaçadas $\epsilon_n = \epsilon_0 + (n - 1)\delta\epsilon$, $n = 1, \dots, N_\epsilon$, assim como a coleção de raios traçados a partir deste conjunto de elevações. As alturas destes raios na distância d são h_{rn} , $n = 1, \dots, N_\epsilon$. Para cada dois raios consecutivos tais que

$$h_{rn-1} \leq h_{Rx} \leq h_{rn} \quad \text{ou} \quad h_{rn} \leq h_{Rx} \leq h_{rn-1} \quad (2.77)$$

o algoritmo utiliza a eq. (2.50) para determinar a amplitude do campo. Utilizando o método da bissecção, para cada ponto de recepção de interesse, é traçado um terceiro raio com ângulo de elevação que possui metade do valor da diferença entre os raios que chegam acima e abaixo do ponto de recepção. De forma iterativa, os raios são lançados até que se encontre o raio (p) que atinja este ponto. Após ser encontrado o raio desejado, estima-se o seu retardo (τ_p), com o auxílio da eq. (2.43). Quando o raio desejado não é encontrado após determinada quantidade de iterações fornecidas pelo usuário, utilizam-se os últimos dois raios que atingiram alturas abaixo e acima do ponto de interesse para que, via interpolação linear, seja estimado o τ_p . Estes últimos dois raios também são utilizados para o cálculo da amplitude, como tubo de raios, contribuindo com a parcela $\delta h / \delta \theta_0$ das eq. (2.78) e (2.79).

Tendo a amplitude e a fase de cada raio, o algoritmo soma todas as contribuições para cada frequência (f) de operação, encontrando a função de transferência $H(f)$, conforme se segue:

$$A_p = \left| \frac{\vec{e}_{RX}}{\vec{e}_{TX}} \right| = \sqrt{\frac{n_{TX} \cdot S_0}{n_{RX} \cdot S} \cdot \frac{1}{\frac{\delta h}{\delta \theta_0} \cdot \cos \psi \cdot S_0}}$$

$$H(f) = \sum_{p=1}^{p=P} A_p e^{-i2\pi f \cdot p}, \text{ sendo } P \text{ o total de raios recebidos na antena.} \quad (2.78)$$

O Fator de Propagação, ou *Propagation Factor (PF)*, é definido pela razão entre o campo elétrico no ponto desejado e o campo elétrico sob condições de espaço livre. Adicionalmente, são considerados o coeficiente de reflexão R [10] no terreno (quando aplicável) e o diagrama de radiação Gaussiano da antena transmissora G [12].

$$PF_p = \left| \frac{\vec{e}_{RX}}{\vec{e}_{TX}} \right| = R_p \cdot G_p \cdot \sqrt{\frac{n_{TX} \cdot S_0}{n_{RX} \cdot S} \cdot \frac{1}{\frac{\delta h}{\delta \theta_0} \cdot \cos \psi \cdot S_0}} \quad (2.79)$$

$$PF(f) = \sum_{p=1}^{p=P} PF_p e^{-i2\pi f \cdot p} \quad (2.80)$$

onde as seguintes aproximações são consideradas:

$$R_p = \frac{\sin \psi_0 - u \cdot \sqrt{1 - u^2 \cdot \cos^2 \psi_0}}{\sin \psi_0 + u \cdot \sqrt{1 - u^2 \cdot \cos^2 \psi_0}}, \text{ para raios refletidos e polarização vertical.}$$

$$R_p = \frac{\sin \psi_0 - \frac{1}{u} \cdot \sqrt{1 - u^2 \cdot \cos^2 \psi_0}}{\sin \psi_0 + \frac{1}{u} \cdot \sqrt{1 - u^2 \cdot \cos^2 \psi_0}}, \text{ para raios refletidos e polarização horizontal.}$$

$$R_p = 1, \text{ para raios não refletidos em qualquer polarização.}$$

$$u = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r - i \frac{18000 \cdot \sigma}{f_{MHz}}}}$$

ϵ_r = permissividade relativa do solo.

σ = condutividade do solo em S/m.

f_{MHz} = frequência de operação em MHz.

e:

$$G_p = e^{-(k_0 \cdot \sin \psi_0)^2 \cdot w^2 / 4}$$

$$w = \frac{\sqrt{2 \cdot \ln 2}}{k_0 \cdot \sin(\theta_{BW}/2)}$$

$k_0 \equiv$ constante de propagação (número de onda) no espaço livre;

$\theta_{BW} \equiv$ largura do feixe de meia potência (-3 dB) da antena transmissora.

Para as equações acima, s é a distância entre o ponto desejado e o transmissor e P o número total de raios existente entre as antenas transmissora e receptora. Este trabalho também apresenta resultados utilizando a Perda no Percurso, ou *Path Loss* (PL), conforme definição abaixo, que utiliza a fórmula de Friis [13]:

$$PL(f) = 32,44 + 20 \log_{10} r_{km} + 20 \log_{10} f_{MHz} - 20 \log_{10} |PF| \quad (2.81)$$

3 ÍNDICE DE REFRAÇÃO DA TROPOSFERA

3.1 Índice de Refração, Refratividade e Condições Meteorológicas

O índice de refração n da troposfera relaciona as velocidades da radiação eletromagnética no vácuo c e no meio v , por intermédio de [14]

$$n = c/v \quad (3.1)$$

Como este trabalho trata de propagação eletromagnética na troposfera, o índice de refração do ar está relacionado à sua composição, que varia no espaço e no tempo. Sendo este índice de refração muito próximo de 1 e sua variação muito pequena, é mais adequado utilizar-se a refratividade N . A relação entre n e N é dada por

$$N = 10^6 (n - 1) \quad (3.2)$$

A relação entre N e as condições meteorológicas do meio é dada pelas eq. (3.3a) a (3.3d) [8], onde P é a pressão atmosférica total (hPa), T é a temperatura absoluta (K), e é a pressão parcial do vapor d'água (hPa), e_s é a pressão de vapor de saturação (hPa), H é a umidade relativa (%) e t é a temperatura ($^{\circ}$ C).

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 72 \frac{e}{T} + 373256 \frac{e}{T^2} \approx \frac{77,6}{T} \left(P + 4810 \frac{e}{T} \right) \quad (3.3a)$$

$$e = \frac{H \cdot e_s}{100} \quad (3.3b)$$

$$e_s = EF \cdot 6,1121 \cdot \exp \left[\frac{\left(18,678 - \frac{t}{234,5} \right) \cdot t}{t + 257,14} \right] \quad (3.3c)$$

$$EF = 1 + 10^{-4} [7,2 + P \cdot (0,0320 + 5,9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2)] \quad (3.3d)$$

3.2 Gradientes da Refratividade e Fenômenos de Radiopropagação

Quando se deseja entender o comportamento de uma onda eletromagnética que se propaga na troposfera é importante analisar o gradiente da refratividade do

meio. Como o gradiente vertical, eq. (3.4), é mais significativo que o horizontal, este capítulo descreve a relação desse com a radiopropagação e a altura h .

$$\nabla N = \Delta N / \Delta h$$

(3.4)

O gradiente da refratividade de uma atmosfera denominada padrão (de referência) é de -40 unidade-N/km. Porém, com as diferentes variações da temperatura e umidade relativa com a altura, o gradiente ∇N pode assumir diferentes valores, formando camadas verticais que determinam diferentes comportamentos para a propagação da onda eletromagnética. Analisando a propagação da onda com base na técnica de traçado de raios e considerando a refratividade modificada $M = N + 156,8 h$, sendo h a altura acima do nível médio do mar (km), conforme mostra a eq. (2.69), estes comportamentos podem ser descritos abaixo:

Tabela 3.1: Classificação dos gradientes da refratividade N e da refratividade modificada M

Comportamento dos raios	∇N [unidade-N/km]	∇M [unidade-M/km]
Padrão (referência)	-40	118
Sub-refração	> 0	> 157
Normal	-79 a 0	79 a 157
Super-refração	-157 a -79	0 a 79
Duto	< -157	< 0

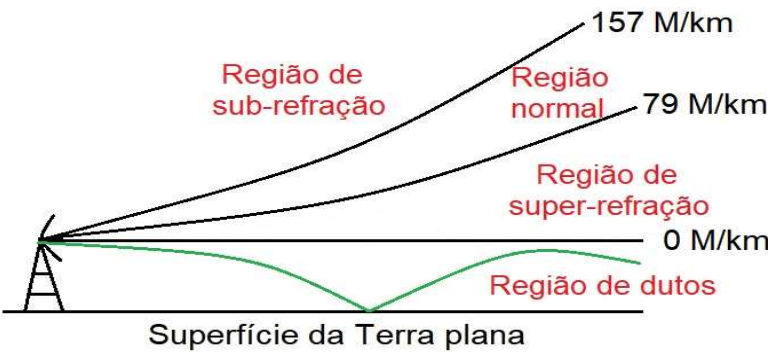


Figura 3.1: Comportamento dos raios conforme o gradiente da refratividade modificada M .

3.2.1 Tipos de Dutos

O duto é caracterizado quando o ∇N de uma camada é menor do que -157 unidade-N/km, estando ela imersa em uma região onde o ∇N é bem maior. No interior do duto, o raio da curvatura da trajetória da onda é menor que o raio da Terra. Como consequência, há o confinamento de parte da energia que se propaga com trajetória próxima à horizontal entre duas altitudes (podendo a menor delas ser o solo). Os dutos podem ocorrer desde a superfície até vários quilômetros de altura, com suas espessuras variando de poucos a vários metros, sendo classificados conforme tabela 3.2, reproduzida de [14] e figura 3.2.

Tabela 3.2: Classificação e características de dutos.

Tipo de duto	Nomenclatura	Escala (extensão e altura)	Duração	Dados disponíveis
Superfície	Evaporação	Macroescala, fenômeno de camada de superfície com altura máxima de aproximadamente 40 m.	De horas a dias, podendo ser diurno ao longo da costa.	Banco de dados do SG3 (Grupo de estudo 3 da ITU-R).
Superfície ou elevado	Advecção	Mesoescala à macroescala (aproximadamente 100 km), fenômeno costeiro com altura de até aproximadamente 300 m.	Diurno	Medidas de radiossondas costeiras, avião e torres.
Superfície ou elevado	Subsidência (inversão térmica)	Mesoescala	Diurno	Radiossonda e Avião
Elevado	Subsidência (inversão térmica)	Macroescala	Até vários dias	Radiossonda e Avião
Superfície	Resfriamento por radiação	Mesoescala e macroescala	Diurno	Radiossonda
Elevado	Sistemas frontais	XXXX	1 a 4 horas	Radiossonda
OBS: Mesoescala: 10 km a 300 km. Macroescala: 300 km a 3.000 km.				

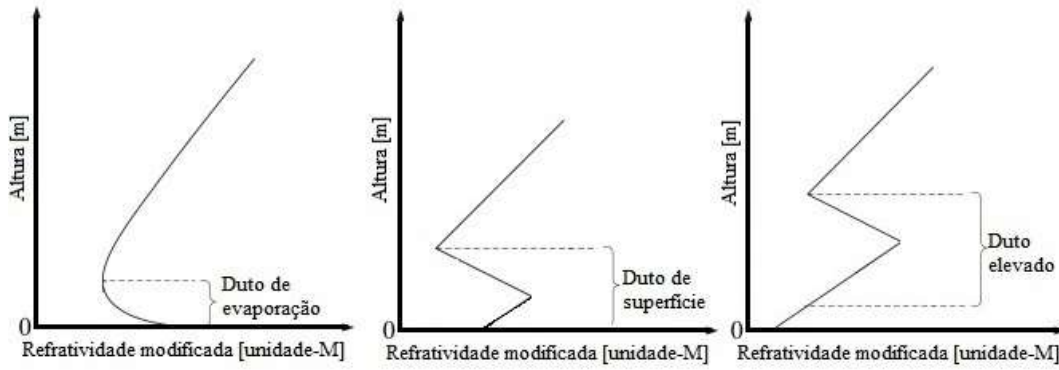


Figura 3.2: Perfis dos gradientes da refratividade modificada, associados aos dutos.

Os dutos de evaporação, de particular interesse para a presente dissertação, serão analisados no capítulo 4.

3.3 Mapa do Gradiente da Refratividade Modificada

Dada uma tabela com valores discretos de refratividade modificada (M), o algoritmo desenvolvido é capaz de detectar os valores em branco e realizar as interpolações lineares vertical (M_{ver}) e horizontal (M_{ho}). Em seguida, utiliza uma média quadrática (M_{interp}) dos valores encontrados para preencher os valores em branco e montar um mapa de M completo.

$$M_{interp}(x_j, h_i) = \sqrt{M_{ver}(x_j, h_i)^2 + M_{hor}(x_j, h_i)^2} \quad (3.5)$$

Com um mapa de M completo, o próximo passo é encontrar o gradiente da refratividade modificada (∇M). Como a contribuição horizontal do gradiente da refratividade modificada ∇M é muito menor que a vertical, para cada região bidimensional discreta o algoritmo considera apenas a segunda, sendo:

$$\nabla M(x_j, h_1) = \frac{(M_{interp}(x_j, h_1 + \delta h) - M_{interp}(x_j, h_1))}{\delta h}, \quad \text{no contorno inferior; (3.6)}$$

$$\nabla M(x_j, h_{N_h}) = \frac{(M_{interp}(x_j, h_{N_h}) - M_{interp}(x_j, h_{N_h} - \delta h))}{\delta h}, \quad \text{no contorno superior; (3.7)}$$

$$\nabla M(x_j, h_i) = \frac{(M_{interp}(x_j, h_i + \delta h) - M_{interp}(x_j, h_i - \delta h))}{2 \cdot \delta h}, \quad \text{nos demais pontos. (3.8)}$$

O mapa do gradiente da refratividade modificada ∇M é, na verdade, um mapa com R elementos retangulares, sendo $R = N_x \cdot N_h$, sendo N_x o número de linhas e N_h o número de colunas. O algoritmo permite ao usuário discretizar cada elemento do mapa de ∇M o quanto achar conveniente, percorrendo os valores da distância x e tendo a informação da altura h como dado de saída. As figuras 3.3, reproduzida de [3], e 3.4 exemplificam o traçado de raios (a ser discutido posteriormente), tendo ao fundo o mapa do gradiente da refratividade modificada ∇M , discretizado em 3.420 elementos (38 linhas e 90 colunas).

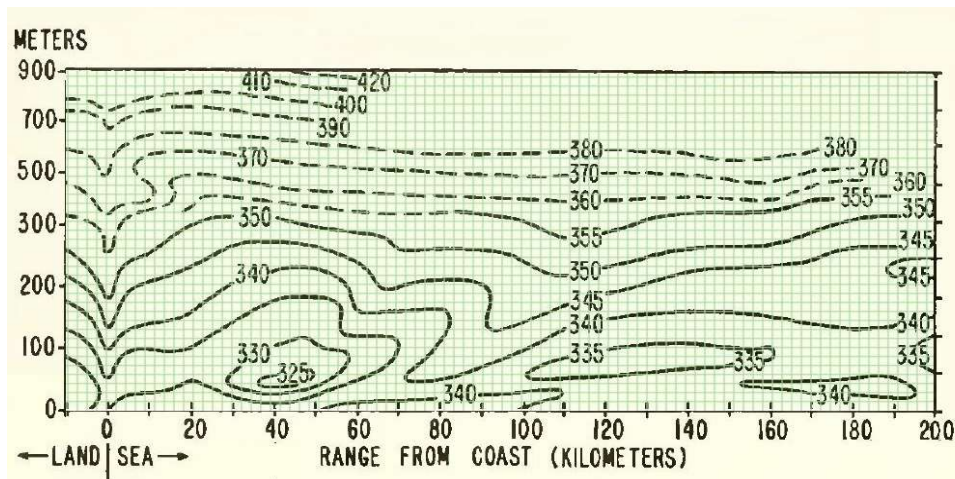


Figura 3.3: Adaptação e discretização do mapa de refratividade modificada M de Canterbury – Nova Zelândia. Reproduzida de [3].

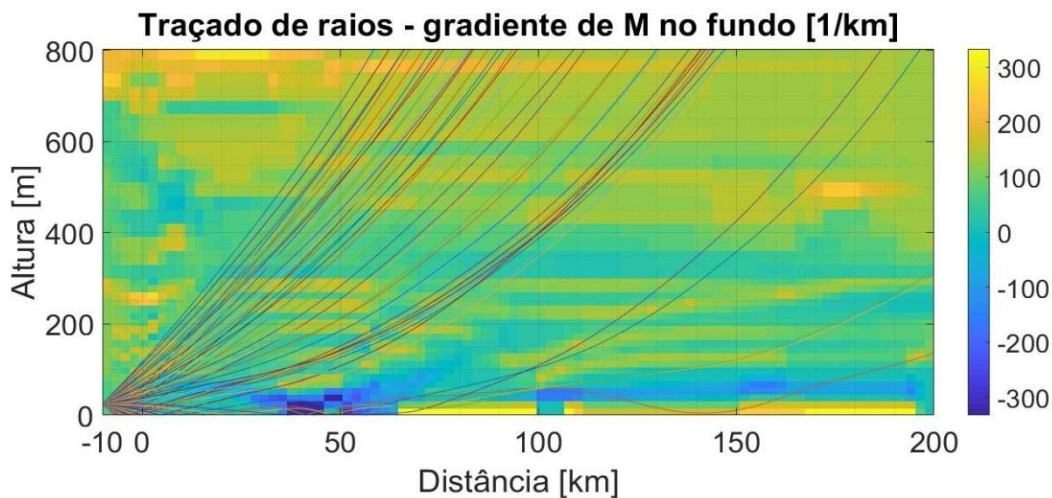


Figura 3.4: Traçado de raios sobre o mar usando o mapa de ∇M de Canterbury – Nova Zelândia observado na figura anterior.

3.4 Sondagem

Durante uma operação da Marinha do Brasil, realizada entre 15/JAN/2009 e 02/FEV/2009 entre as costas do Rio de Janeiro e Uruguai, foram coletados dados de 10 sondagens, utilizando balões e radiossondas, conforme mostra a figura 3.5. Foi implementado um algoritmo em MatLab para estimar o perfil vertical de M , utilizando as eq. (3.3a) a (3.3d) e (2.68) e as seguintes informações de entrada fornecidas pelas radiossondas:

- Altura das medições.
- Temperatura.
- Pressão atmosférica.
- Umidade relativa do ar.

Os perfis verticais da refratividade modificada $M(h)$ resultantes deste mapeamento estão apresentados na figura 3.6. As informações de saída $M(h)$ foram inseridas no algoritmo de traçado de raios e os resultados das simulações da propagação eletromagnética estão descritos e analisados no capítulo 5.



Figura 3.5: Imagem, utilizando o Google Earth, das localizações e datas das sondagens realizadas pela Marinha do Brasil.

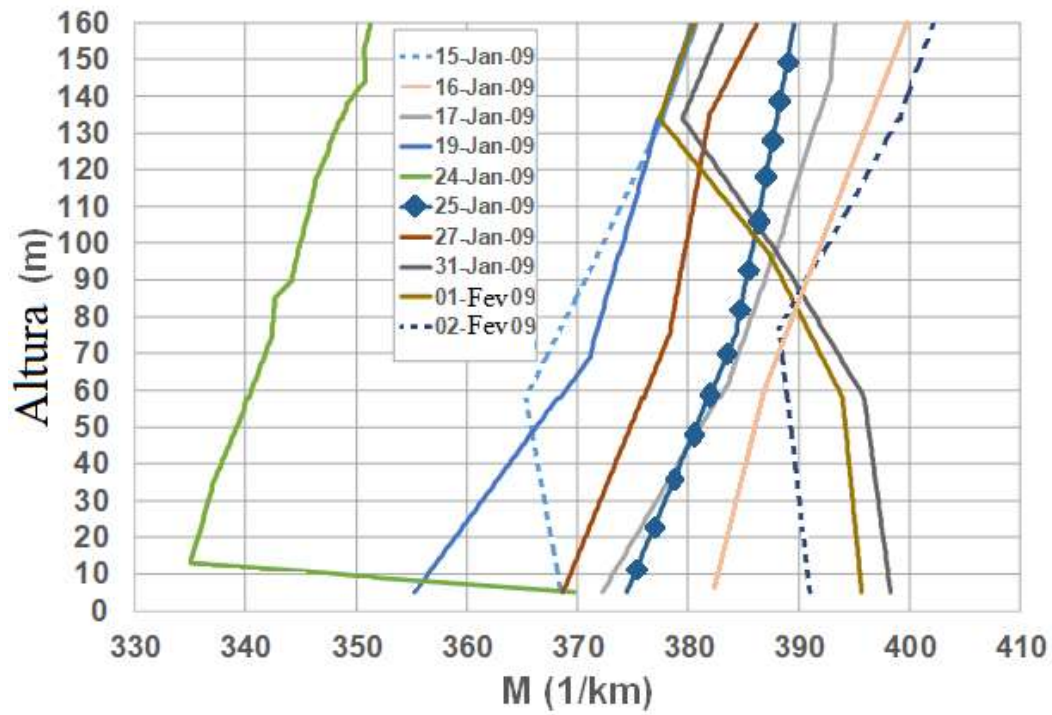


Figura 3.6: Perfis verticais da refratividade modificada $M(h)$ e datas das sondagens realizadas pela Marinha do Brasil.

4 DUTOS DE EVAPORAÇÃO

Os dutos de evaporação, de particular interesse para a presente dissertação, ocorrem próximos à superfície da água. Nos oceanos, existem durante alta percentagem do tempo, como será visto [17]. Isso ocorre porque nestes ambientes há um decréscimo na pressão de vapor d'água, a partir da condição de saturação do mar até alguns metros de altura acima da superfície da água. Este comportamento, em regra, é responsável por um ∇M vertical negativo. Há alguns modelos matemáticos que utilizam medições meteorológicas realizadas nestes ambientes para estimar a altura destes dutos [5]. Neste trabalho, foi utilizado o modelo da Marinha dos Estados Unidos da América [7], que utiliza as medições de: temperatura da superfície do mar, temperatura acima da superfície do mar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e pressão atmosférica. Essas medições são fornecidas por instrumentos situados em boias oceanográficas.

4.1 Modelo de Paulus-Jeske para Dutos de Evaporação

Paulus analisou as comparações, feitas por Jeske [15], entre diversos modelos semi-impíricos de dutos de evaporação e medições de propagação. O resultado desta análise foi a elaboração de um modelo prático que utiliza dados de sensores situados em boias oceanográficas ou navios para estimar altura de dutos de evaporação [7].

Este modelo utiliza os seguintes dados de entrada e limites:

- Velocidade do vento u , entre 0 e 50 nós;
- Temperatura do ar T_a , entre -20°C e 50°C ;
- Umidade relativa do ar RH , entre 0 % e 100 %;
- Temperatura da água do mar T_s , entre 0°C e 40°C .

Como saída, o modelo estima a altura do duto de evaporação com limites entre 0 m e 40 m, para o valor crítico do gradiente da refratividade potencial $\nabla N_p = -125 \text{ unidade-N/km}$ ($\nabla N = -157 \text{ unidade-N/km}$ na ótica geométrica).

Os seis itens seguintes, reproduzidos de [7], descrevem o modelo:

- 1- As temperaturas de entrada são convertidas para Kelvin (T_{ak} e T_{sk}) e, caso a velocidade do vento seja menor que 0,01 nós, a altura do duto é estimada em 0 m.
- 2- O número de Richardson Ri_b é calculado pela equação abaixo, onde z_l é a altura de referência em metros.

$$Ri_b = 369 \cdot z_l \cdot (T_{ak} - T_{sk}) / (T_{ak} \cdot u^2) \quad (4.1)$$

- 3- A refratividade potencial N_p , a temperatura potencial θ em Kelvin, a pressão de vapor potencial e_p em mb e as refratividades potenciais do ar N_A e do mar N_S são descritas abaixo. São supostas: $e \approx e_p$, $T_{ak} \approx \theta$, $P_0 = 1.000 \text{ mb}$ e altura das medições do ar como z_l .

$$N_p = \frac{77,6 \cdot P_0}{\theta} + 3,73 \cdot 10^5 \cdot \frac{e_p}{\theta^2} \quad (4.2)$$

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{0,286} \quad (4.3)$$

$$e_p = e \left(\frac{P_0}{P} \right) \quad (4.4)$$

$$N_A = \frac{77,6}{T_{ak}} \left(1.000 + \frac{4.810}{T_{ak}} \cdot e \right) \quad (4.5)$$

$$N_S = \frac{77,6}{T_{sk}} \left(1.000 + \frac{4.810}{T_{sk}} \cdot e_0 \right) \quad (4.6)$$

$$e = \frac{RH}{100} \cdot e_s \quad (4.7)$$

$$e_s = 6,105 \cdot e^{\left[25,22 \cdot \frac{T_{ak} - 273,2}{T_{ak}} - 5,31 \cdot \ln \left(\frac{T_{ak}}{273,2} \right) \right]} \quad (4.8)$$

$$e_0 = 6,105 \cdot e^{\left[25,22 \cdot \frac{T_{sk} - 273,2}{T_{sk}} - 5,31 \cdot \ln \left(\frac{T_{sk}}{273,2} \right) \right]} \quad (4.9)$$

- 4- Para condições termicamente neutras e estáveis ($0 \leq Rib \leq 1$), a altura do duto de evaporação δ é calculado das seguintes formas:

$$\delta = 0 \text{ para } \Delta N_p \geq 0 \quad (4.10)$$

$$\delta = \frac{\Delta N_p}{b_1 \cdot B - \Delta N_p \cdot \frac{a}{L'}} \quad (4.11)$$

Se o resultado da eq. (4.11) for $\delta < 0$ ou $\delta/L' > 1$, tem-se:

$$\delta = \frac{\Delta N_p \cdot (1+a) - b_1 \cdot a \cdot z_1}{b_1 \cdot \ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (4.12)$$

Em condições estáveis, a função B é:

$$B = \ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) + \frac{a \cdot z_1}{L'} \quad (4.13)$$

- 5- Para condições termicamente instáveis ($Rib < 0$), a altura do duto de evaporação δ é calculado da seguinte forma:

$$\delta = \left[\left(\frac{b_1 \cdot B}{\Delta N_p} \right)^4 - 4 \cdot \frac{\beta}{L'} \cdot \left(\frac{b_1 \cdot B}{\Delta N_p} \right)^3 \right]^{-\frac{1}{4}} \quad (4.14)$$

Sendo a função B :

$$B = \ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) - \Psi \quad (4.15)$$

e a função universal Ψ é determinada por:

$$\Psi = -4,5 \cdot \frac{z_1}{L'} \quad , \text{ para: } \frac{z_1}{L'} \geq -0,01$$

$$\Psi = 10^{1,02 \cdot \log\left(-\frac{z_1}{L'}\right) + 0,69} \quad , \text{ para: } -0,026 \leq \frac{z_1}{L'} < -0,01$$

$$\Psi = 10^{0,776 \cdot \log\left(-\frac{z_1}{L'}\right) + 0,306} \quad , \text{ para: } -0,1 \leq \frac{z_1}{L'} < -0,026$$

$$\Psi = 10^{0,630 \cdot \log\left(-\frac{z_1}{L'}\right) + 0,16} \quad , \text{ para: } -1 \leq \frac{z_1}{L'} < -0,1$$

$$\psi = 10^{0,414 \cdot \log\left(-\frac{z_1}{L'}\right) + 0,16}, \text{ para: } -2,2 \leq \frac{z_1}{L'} < -1$$

$$\psi = 2, \text{ para: } \frac{z_1}{L'} < -2,2$$

6- Definições de algumas constantes e variáveis:

$\Delta N_p = N_a - N_s$, diferença da refratividade potencial entre o ar e o mar

$b_l = -125 \text{ km}^{-1}$, valor crítico do gradiente da refratividade potencial

$z_0 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$, parâmetro da rugosidade da superfície

$a = 5,2$, coeficiente da função B em condição estável

$\beta = 4,5$, coeficiente da função B em condição instável

$L' = \frac{10 \cdot z_1 \cdot \Gamma_e}{Ri_b} \text{ m}$, escala de Monin-Obukhov, onde:

$\Gamma_e = 0,05$, para: $Ri_b \leq -3,75$

$\Gamma_e = 0,065 + 0,004 \cdot Ri_b$, para: $-3,75 < Ri_b \leq -0,12$

$\Gamma_e = 0,109 + 0,367 \cdot Ri_b$, para: $-0,12 < Ri_b \leq 0,14$

$\Gamma_e = 0,155 + 0,021 \cdot Ri_b$, para: $0,14 < Ri_b$

O perfil vertical da refratividade modificada $M(h)$ utilizado neste trabalho, para casos de duto de evaporação é calculado utilizando a eq. (4.16), onde h_0 é a altura inicial e M_0 a refratividade inicial [16].

$$M(h) = M_0 + 0,125 \cdot h - 0,125 \cdot \delta \cdot \ln(h/h_0) \quad (4.16)$$

4.2 Estimativa da Altura de um Duto de Evaporação

Um algoritmo, utilizando o software MatLab, foi desenvolvido para estimar as alturas de dutos de evaporação, tendo como dados de entrada medições meteorológicas realizadas por nove boias oceanográficas do PNBOIA, localizadas na costa brasileira (figura 4.1) e disponibilizadas em <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia-mapa>, acessado em janeiro de 2018. Este algoritmo resultou de um trabalho de conversão e adaptação do código FORTRAN descrito em [17] para a linguagem MatLab. Duas adaptações foram feitas ao código: a primeira foi a utilização das medições de pressão

atmosférica da boia, ao invés da utilização do valor padrão $P_0 = 1.000$ mb; a segunda foi a utilização da constante altura de referência $z_l = 3,7$ m, conforme a altura dos sensores das boias brasileiras, ao invés do valor fixo $z_l = 6,0$ m utilizado por Paulus. O modelo de Paulus e Jeske foi descrito na seção 4.1. O algoritmo também divide as medições em quatro períodos do dia: madrugada (0 h às 6 h), manhã (6 h às 12 h), tarde (12 h às 18 h) e noite (18 h às 24 h). Médias aritméticas simples de cada grandeza física (temperatura, umidade, pressão e velocidade do vento) em cada período são calculadas e depois utilizadas para simulação das alturas dos dutos. Assim, a cada dia de medições correspondem quatro valores de cada grandeza (médias da madrugada, manhã, tarde e noite) e, conseqüentemente, quatro alturas de dutos.



Figura 4.1: Imagem, utilizando o *Google Earth*, da localização das boias oceanográficas do programa PNBOIA.

Outro algoritmo foi desenvolvido em MatLab para compilar e demonstrar em forma de gráficos os resultados das alturas dos dutos de evaporação das nove boias brasileiras. Os resultados da aplicação do algoritmo aos dados da boia Itajaí correspondentes ao mês de setembro de 2017 podem ser observados na figura 4.2. Neste exemplo, com exceção da pressão atmosférica, todas as informações de entrada (temperatura do mar, temperatura do ar e umidade relativa do ar) e a informação de saída (altura do duto de evaporação) podem ser visualizadas por

período do dia (madrugada, manhã, tarde e noite), durante os 30 dias do mês. Neste caso, é possível observar que as temperaturas do mar e do ar são praticamente constantes durante todo o mês e que as variações da velocidade do vento e da umidade determinam o comportamento das alturas do duto de evaporação. No primeiro dia do mês, a baixa umidade resultou em duto de evaporação com alturas acima de 20 m. Por outro lado, nos dias seis e sete a baixa velocidade do vento resultou em baixas alturas de duto de evaporação.

A seção 4.3.10. apresenta análises da relação entre o comportamento dos dutos de evaporação e as medições meteorológicas, bem como compara resultados apresentados em um mesmo mês por boias geograficamente distintas.

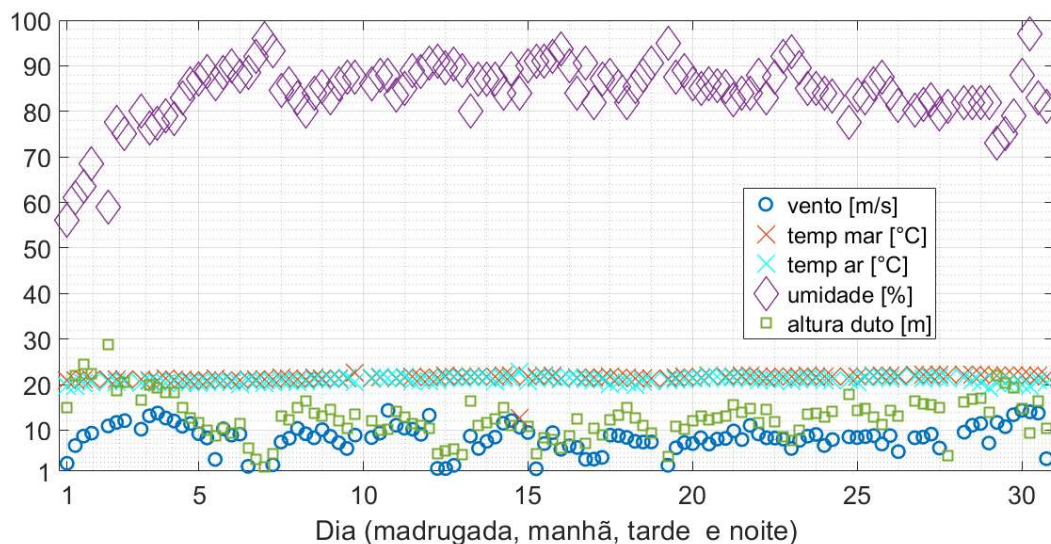


Figura 4.2: Dutos e dados meteorológicos da boia de Itajaí no mês de setembro de 2017.

4.3 Estatísticas das Alturas de Dutos de Evaporação

A seguir, serão apresentados os resultados das estimativas das alturas de dutos de evaporação realizadas utilizando o algoritmo descrito na seção 4.1. Todas as nove boias do PNBOIA, cujas posições estão apresentadas na figura 4.1, foram utilizadas: Rio Grande – RS, Itajaí – SC, Santos – SP, Niterói – RJ, Cabo Frio – RJ, Vitória – ES, Porto Seguro – BA, Recife – PE e Fortaleza – CE. Estes resultados estatísticos estão divididos por boia e, ao final, são apresentadas comparações e

conclusões. Para cada boia, foram fornecidos dados de períodos diferentes. Em alguns casos, há lacunas e falhas na apresentação dos dados e, em outros casos, os dados fornecidos foram descartados por serem fisicamente improváveis. Esses casos ocorrem por causa de problemas técnicos nos equipamentos ou na transmissão dos dados via satélite. A altura máxima do duto é 40 m, conforme estabelecido em [17]. Os dutos que ultrapassaram este valor foram considerados para fins estatísticos apenas como dutos acima de 40 m, ignorando-se o valor encontrado. No caso em que se demonstram as ocorrências dos dutos, eles foram ignorados nos gráficos correspondentes.

4.3.1 Rio Grande

A boia Rio Grande está localizada no mar do estado do Rio Grande do Sul, nas seguintes coordenadas: latitude $31,56^{\circ}$ S e longitude $49,84^{\circ}$ O, conforme apresentado na figura 4.3. Foram utilizadas todas as 10.046 medições de cada grandeza física do período de 2009 a 2017, disponibilizadas pelo PNBOIA e distribuídas da seguinte forma: 1.966 medições em 2009, 139 em 2010, 106 em 2011, 1.840 em 2012, 2.704 em 2013, 55 em 2014, 3 em 2015, 1 em 2016 e 3.232 em 2017.



Figura 4.3: Ilustração da localização da boia Rio Grande, utilizando a ferramenta *Google Earth*.

4.3.1.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Rio Grande

Os anos de 2009, 2012, 2013 e 2017 possuem quantidades maiores de medições e por isso estão sendo usados como exemplos a seguir. Observando-se a figura 4.4, percebe-se que as distribuições das alturas dos dutos de evaporação obedecem a um certo padrão em todos os anos, com maiores ocorrências entre 10 e 25 m.

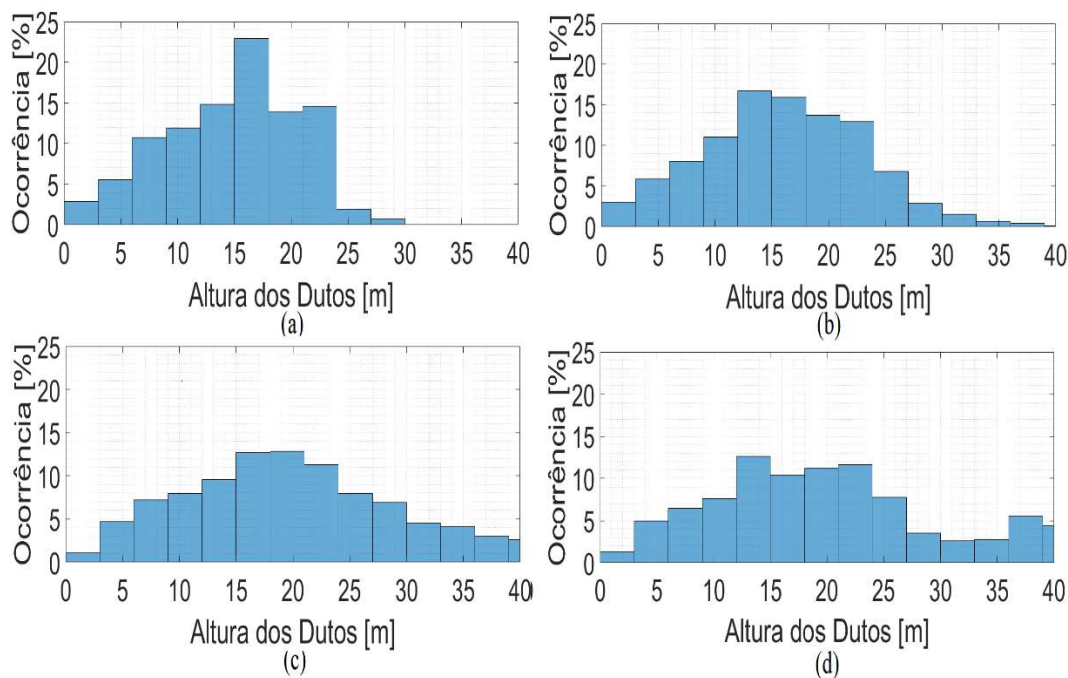


Figura 4.4: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Rio Grande nos anos de: (a) 2009, (b) 2012, (c) 2013 e (d) 2017.

É possível concluir que o comportamento das alturas dos dutos de evaporação registradas pela boia Rio Grande pode ser considerado repetitivo anualmente. A figura 4.5 mostra os valores médios das alturas dos dutos a cada mês, considerando todas as 10.046 medições e todos os anos disponibilizados (2009 a 2017). Observam-se máximos das alturas médias mensais dos dutos de evaporação nos meses de abril e maio, assim como mínimos nos meses de setembro a dezembro.

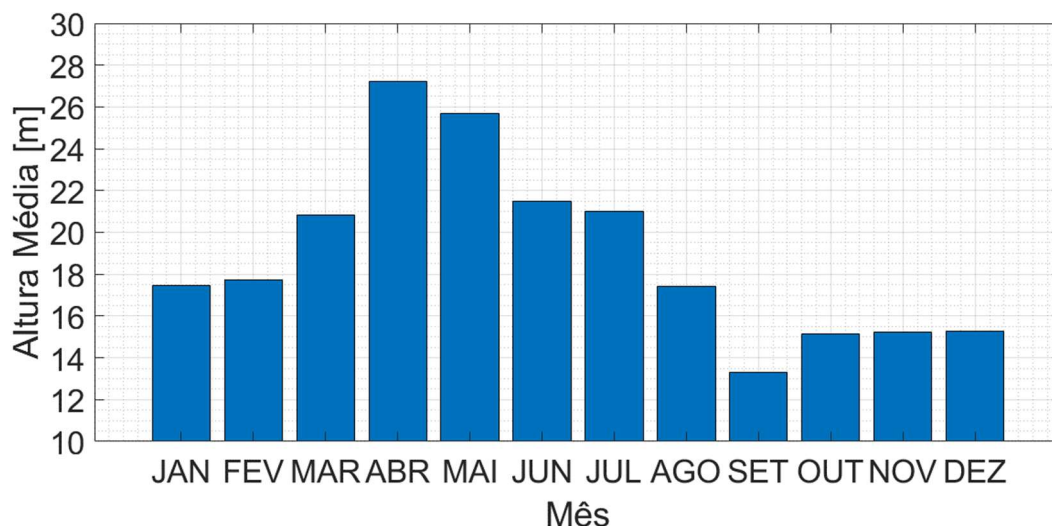


Figura 4.5: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Rio Grande.

Em Rio Grande, foram observados 7 meses em um total de 46 (15,22 %) onde a altura média dos dutos em um determinado mês é baixa pela manhã, aumenta nos períodos da tarde e da noite, e volta a cair na madrugada. Os dados relativos a estes meses podem ser conferidos a seguir, nas figuras 4.6, que apresenta histogramas distintos para os diversos meses, e 4.7, que apresenta o resultado para um único mês.

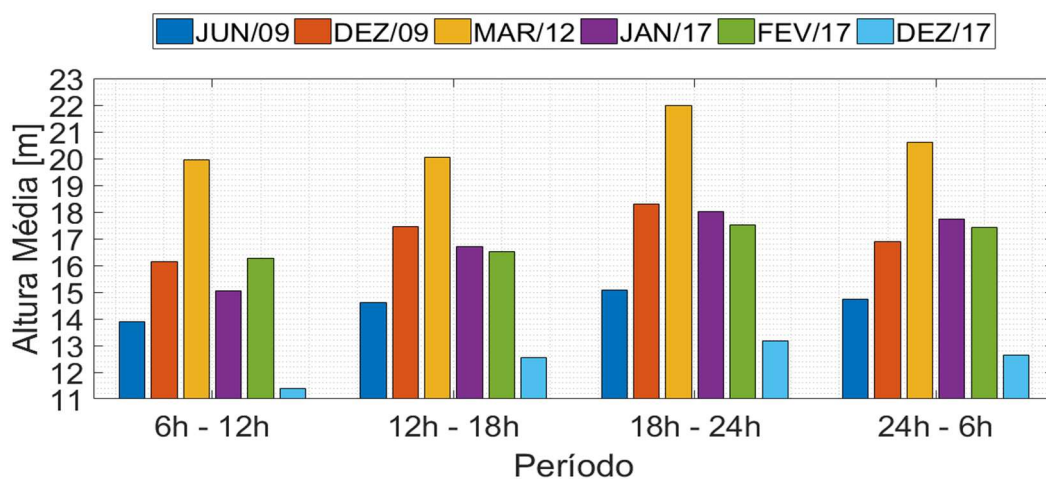


Figura 4.6: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Rio Grande por período horário em diversos meses de 2009, 2012 e 2017.

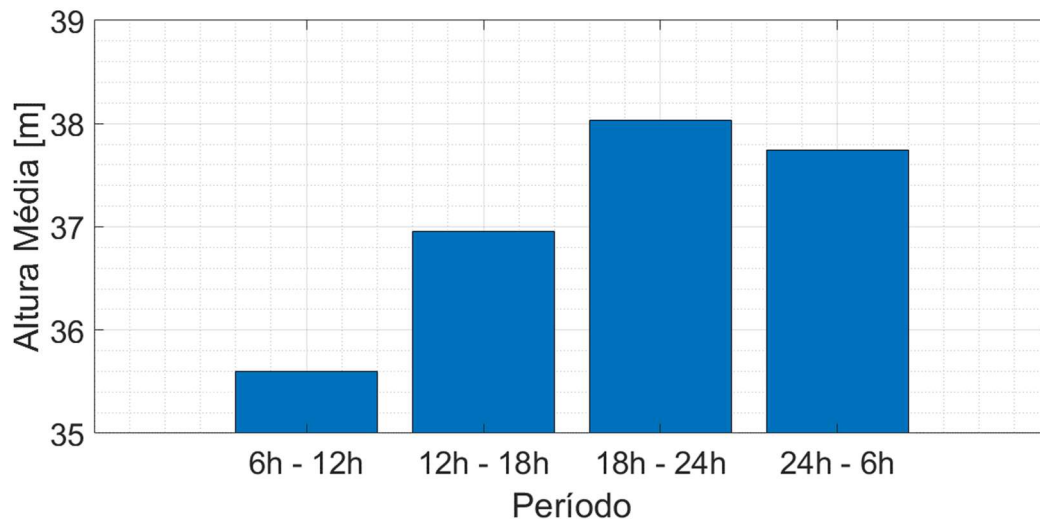


Figura 4.7: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Rio Grande por período horário em junho de 2017.

4.3.2 Itajaí

A boia Itajaí está localizada no mar do estado de Santa Catarina, nas seguintes coordenadas: latitude $27,41^{\circ}$ S e longitude $47,26^{\circ}$ O, conforme apresentado na figura 4.8. Foram utilizadas todas as 30.947 medições de cada grandeza física do período de 2009 a 2017, disponibilizadas pelo PNBOIA e distribuídas da seguinte forma: 4.922 medições em 2009, 7.618 em 2011, 6.647 em 2012, 1.846 em 2013, 671 em 2014, 4.346 em 2015, 2.233 em 2016 e 2.664 em 2017.



Figura 4.8: Ilustração da localização da boia Itajaí, utilizando a ferramenta *Google Earth*.

4.3.2.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Itajaí

Os anos de 2009, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016 e 2017 possuem quantidades maiores de medições e por isso estão sendo usados como exemplos a seguir. Observando-se as figuras 4.9 e 4.10, percebe-se que as distribuições das alturas dos dutos de evaporação obedecem a um certo padrão em todos os anos, com maiores ocorrências entre 10 e 25 m.

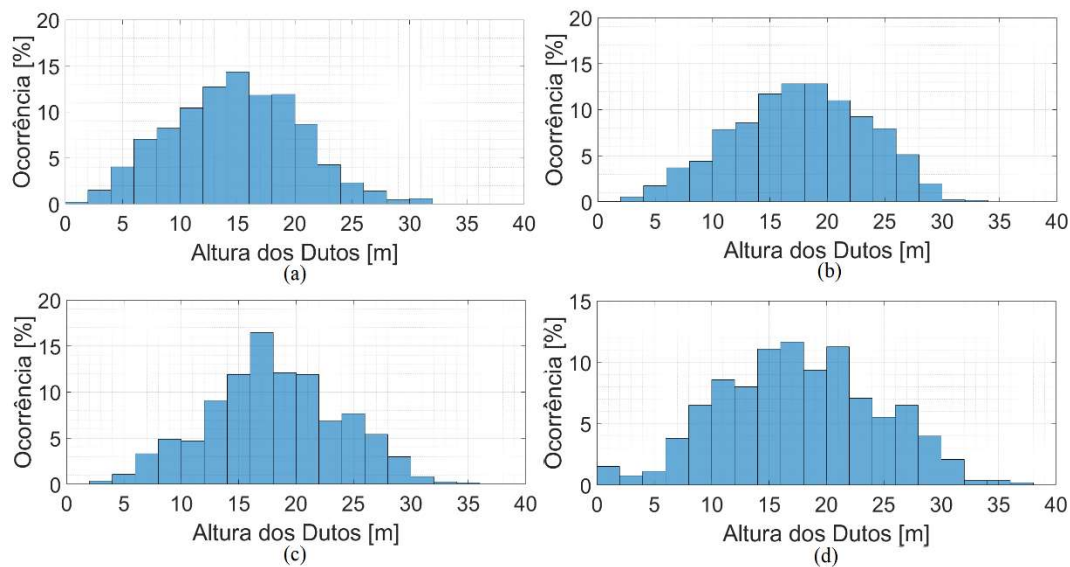


Figura 4.9: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Itajaí nos anos de: (a) 2009, (b) 2011, (c) 2012 e (d) 2013.

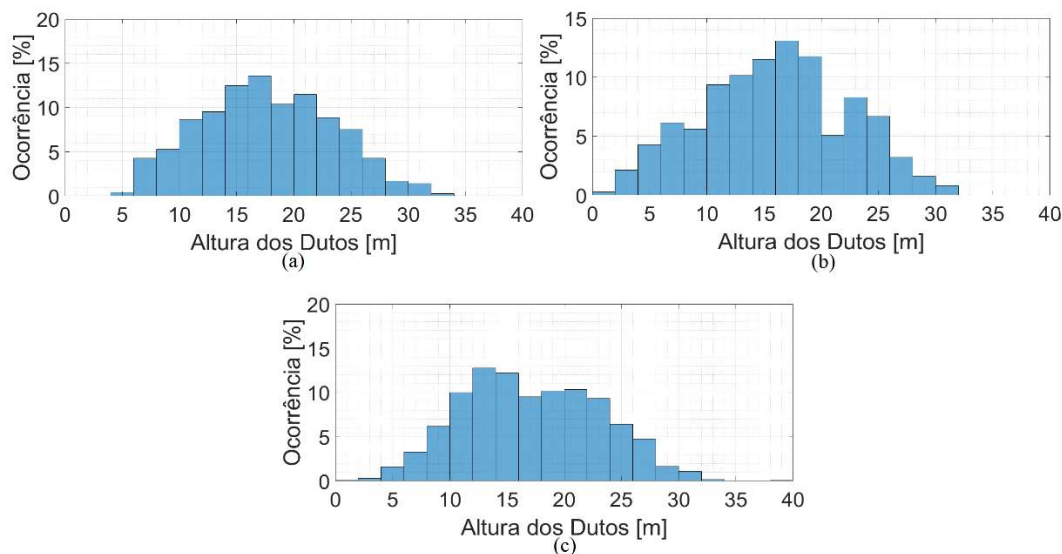


Figura 4.10: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Itajaí nos anos de: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017.

É possível então concluir que o comportamento das alturas dos dutos de evaporação, dada uma posição geográfica, pode ser considerado repetitivo anualmente. A figura 4.11 mostra os valores médios das alturas dos dutos de evaporação a cada mês, considerando todas as 30.947 medições e todos os anos disponibilizados (2009, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016 e 2017). Em Itajaí, observa-se que as alturas médias dos dutos têm valores menores durante o inverno e maiores no mês de março.

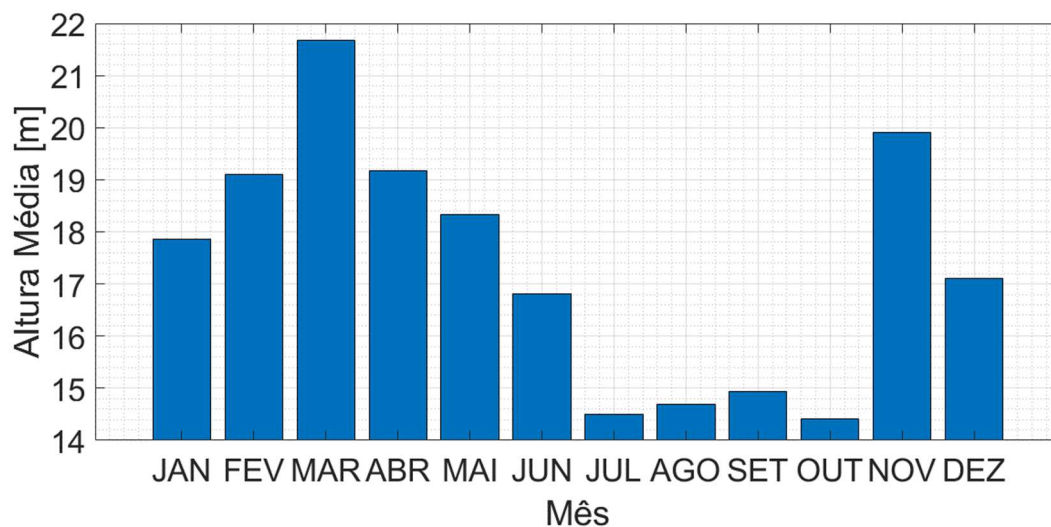


Figura 4.11: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Itajaí.

Em Itajaí, foram observados 14 meses em um total de 65 (21,54 %) onde a altura média dos dutos de evaporação em um determinado mês é baixa pela manhã, aumenta nos períodos da tarde e da noite, e volta a cair na madrugada. Os dados relativos a estes meses podem ser conferidos a seguir, nas figuras 4.12 e 4.13.

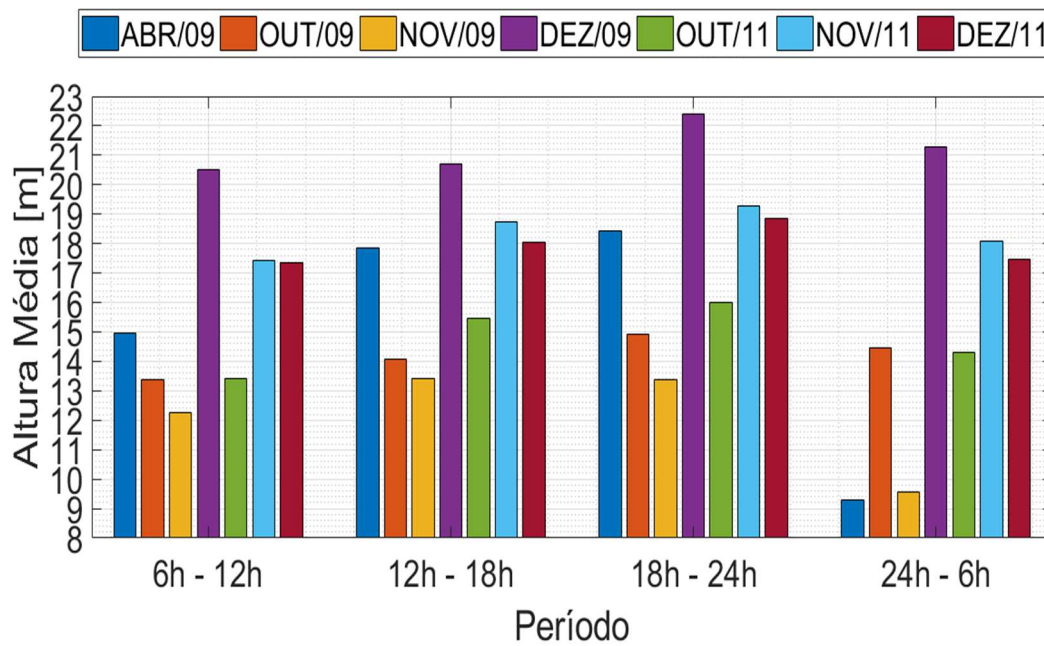


Figura 4.12: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Itajaí por período horário em diversos meses de 2009 e 2011.

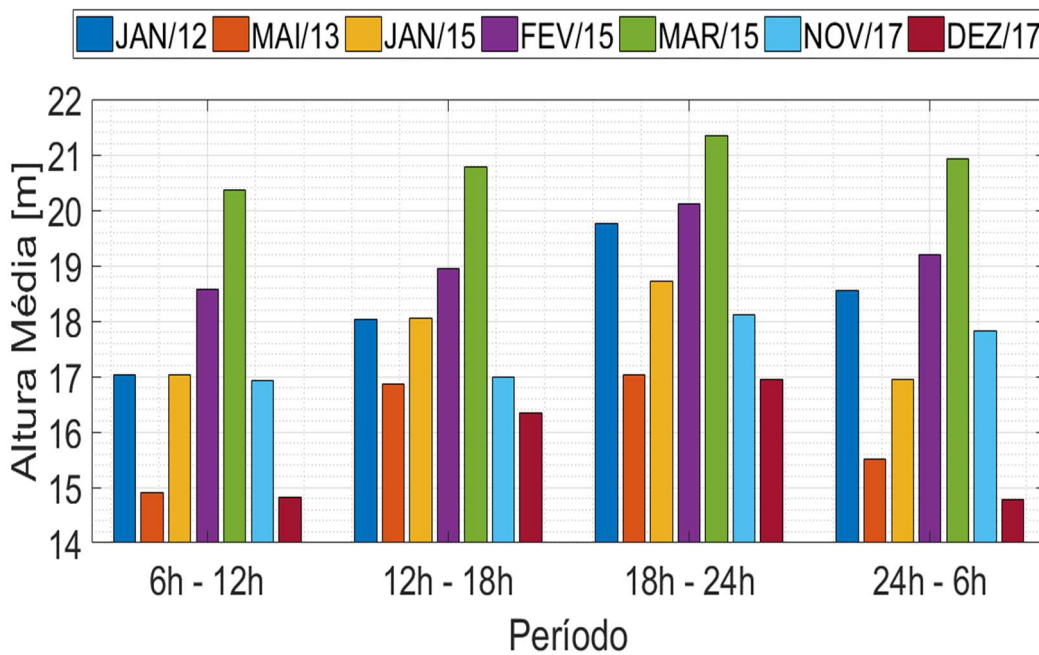


Figura 4.13: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Itajaí por período horário em diversos meses de 2012, 2013, 2015 e 2017.

4.3.3 Santos

A boia Santos está localizada no mar do estado de São Paulo, nas seguintes coordenadas: latitude $25,44^{\circ}$ S e longitude $45,03^{\circ}$ O, conforme apresentado na figura 4.14. Foram utilizadas todas as 16.341 medições, de cada grandeza física, disponibilizadas pelo PNBOIA e distribuídas da seguinte forma: 6.275 medições em 2011, 6.485 em 2012, 415 em 2014, 1.013 em 2015 e 2.153 em 2017.



Figura 4.14: Ilustração da localização da boia Santos, utilizando a ferramenta *Google Earth*.

4.3.3.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Santos

Os anos de 2011, 2012, 2014, 2015 e 2017 possuem quantidades maiores de medições e por isso estão sendo usados como exemplos a seguir. Observando-se as figuras 4.15 e 4.16, percebe-se que as distribuições das alturas dos dutos de evaporação obedecem a um certo padrão em todos os anos, com maiores ocorrências entre 10 e 25m.

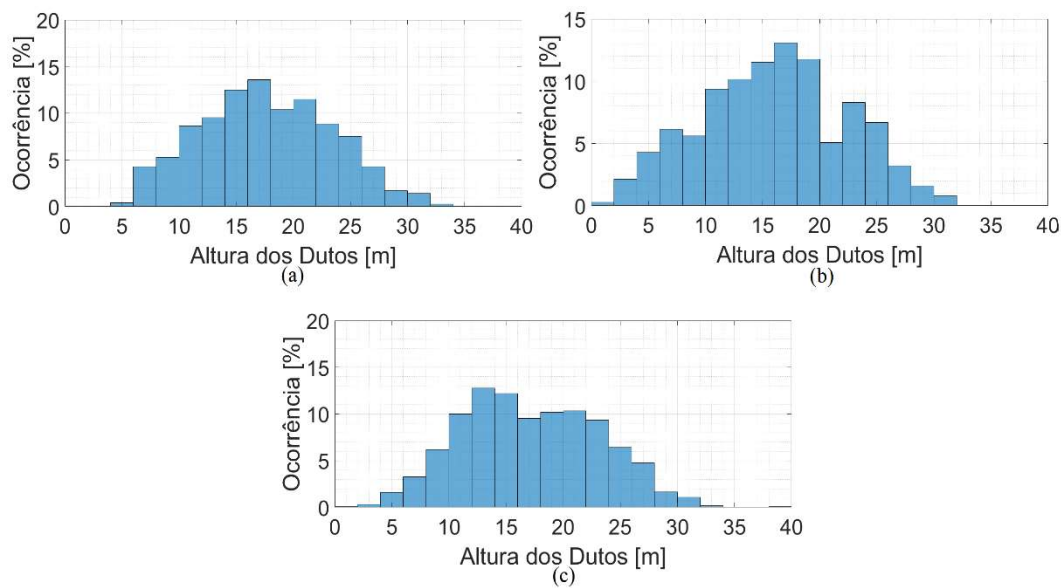


Figura 4.15: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Santos nos anos de: (a) 2011, (b) 2012 e (c) 2017.

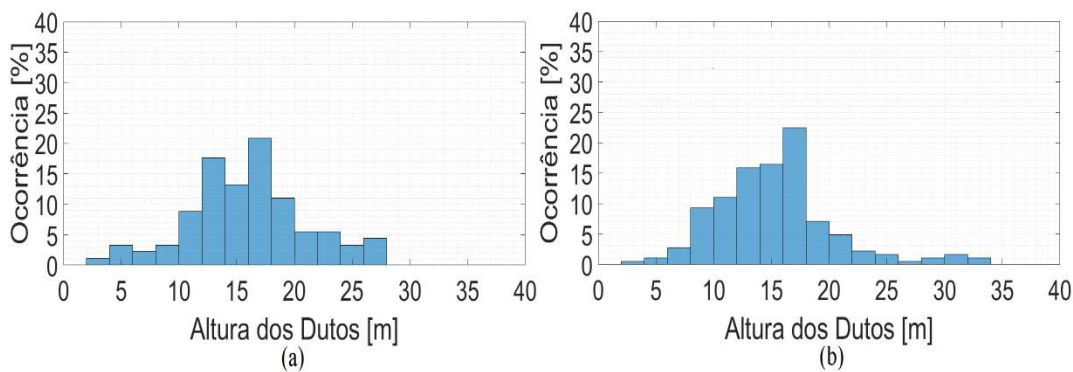


Figura 4.16: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Santos nos anos de: (a) 2014 e (b) 2015.

É possível concluir que o comportamento das alturas dos dutos de evaporação registradas pela boia Santos, pode ser considerado repetitivo anualmente.

A figura 4.17 mostra os valores médios das alturas dos dutos a cada mês, considerando todas as 16.341 medições e todos os anos disponibilizados (2011, 2012, 2014, 2015 e 2017).

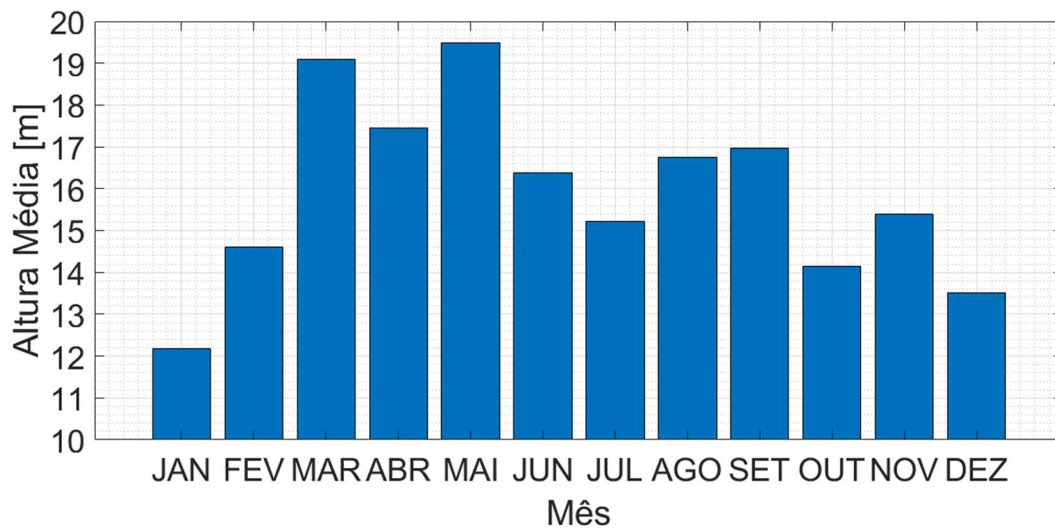


Figura 4.17: Médias das alturas dos dutos a cada mês para a boia Santos.

Em Santos, foram observados 12 meses em um total de 36 (33,33 %) onde a altura média dos dutos em um determinado mês é baixa pela manhã, aumenta nos períodos da tarde e da noite, e volta a cair na madrugada. Os dados relativos a estes meses podem ser conferidos a seguir, nas figuras 4.18 e 4.19.

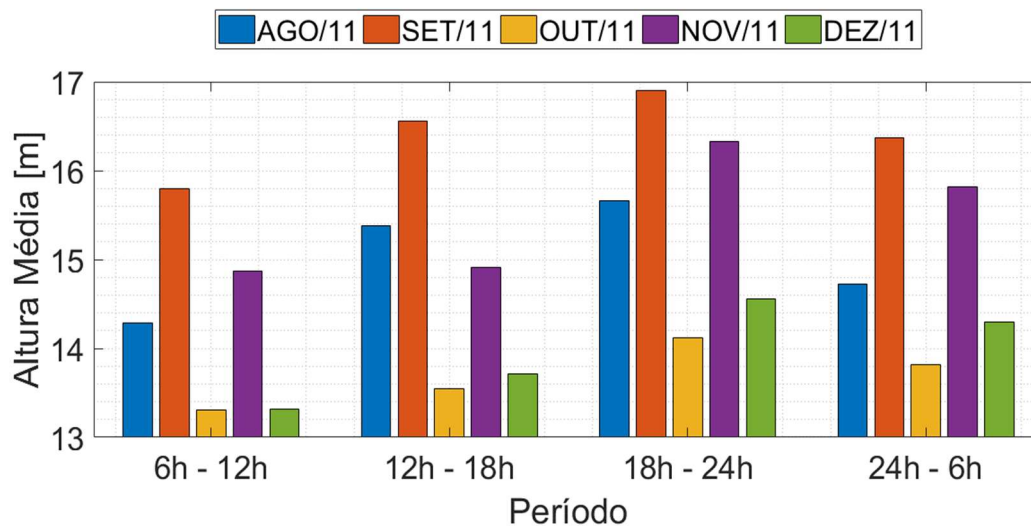


Figura 4.18: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Santos por período em diversos meses de 2011.

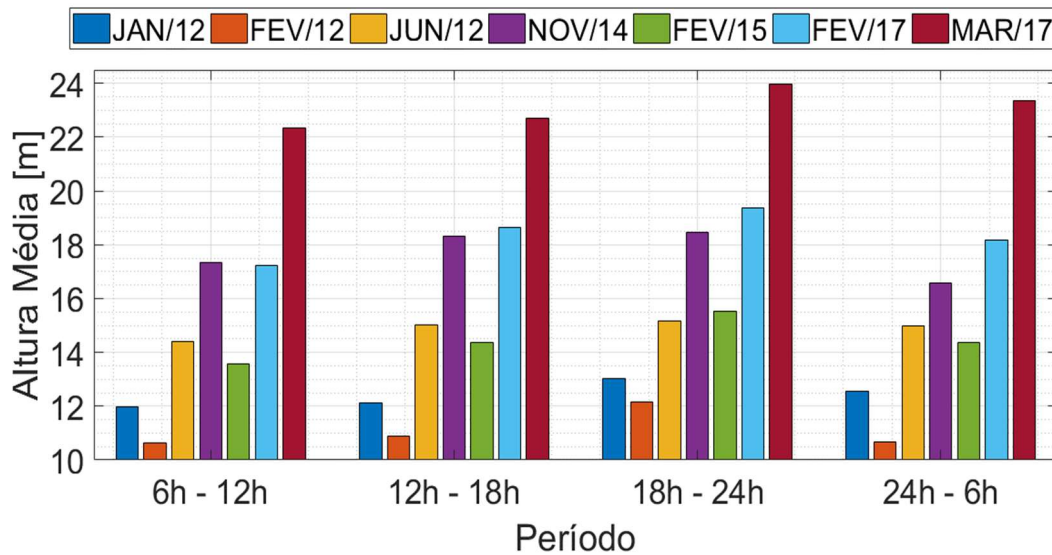


Figura 4.19: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Santos por período em diversos meses de 2012, 2014, 2015 e 2017.

4.3.4 Niterói

A boia Niterói está localizada na entrada da Baía de Guanabara, no estado do Rio de Janeiro, nas seguintes coordenadas: latitude $22,92^{\circ}$ S e longitude $43,14^{\circ}$ O, conforme apresentado na figura 4.20. Foram utilizadas todas as 6.653 medições, de cada grandeza física, disponibilizadas pelo PNBOIA e distribuídas da seguinte forma: 1.136 medições 2015, 4.860 em 2016 e 657 em 2017.

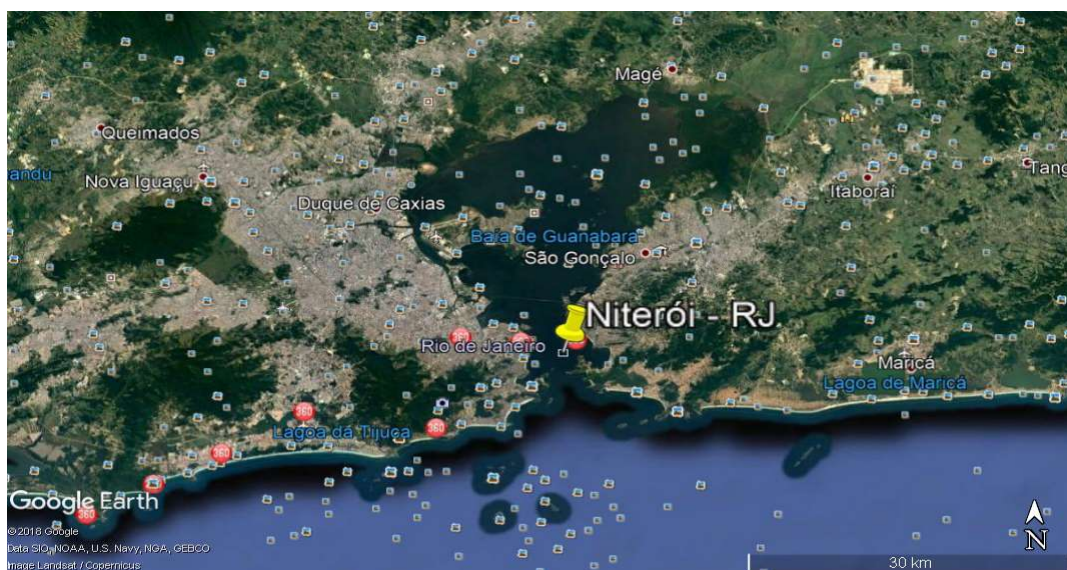


Figura 4.20: Ilustração da localização da boia Niterói, utilizando a ferramenta *Google Earth*.

4.3.4.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Niterói

Os anos de 2015, 2016 e 2017 possuem quantidades maiores de medições e por isso estão sendo usados como exemplos a seguir. Observando-se a figura 4.21, percebe-se que as distribuições das alturas dos dutos de evaporação obedecem a um certo padrão em todos os anos, com maiores ocorrências entre 5 e 15 m.

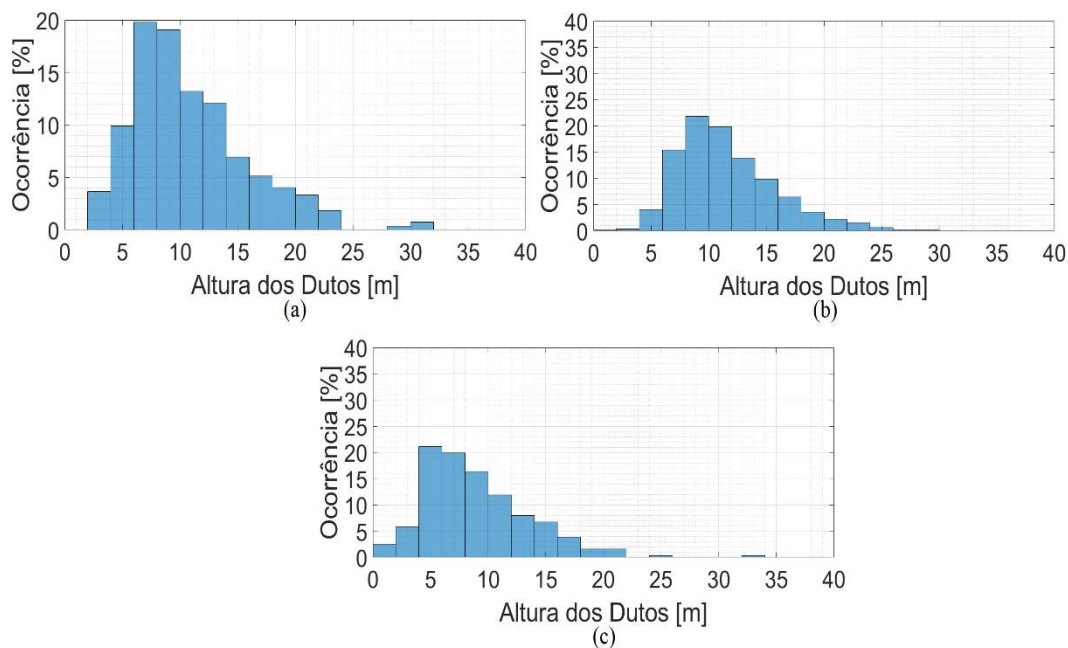


Figura 4.21: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Niterói nos anos de: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017.

É possível então concluir que o comportamento das alturas dos dutos de evaporação, dada uma posição geográfica, pode ser considerado repetitivo anualmente. A figura 4.22 mostra os valores médios das alturas dos dutos de evaporação a cada mês, considerando todas as 6.653 medições e todos os anos disponibilizados (2015, 2016 e 2017). Em nenhum dos 3 anos houve medição disponível para o mês de abril.

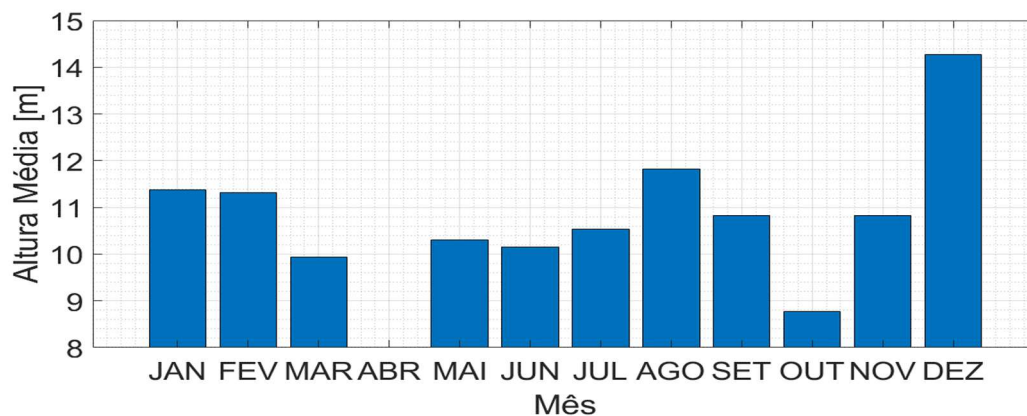


Figura 4.22: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Niterói.

Em Niterói, foram observados 9 meses em um total de 20 (45 %) onde a altura média dos dutos de evaporação em um determinado mês é baixa pela manhã, aumenta nos períodos da tarde e da noite, e volta a cair na madrugada. Os dados relativos a estes meses podem ser conferidos a seguir, nas figuras 4.23 e 4.24.

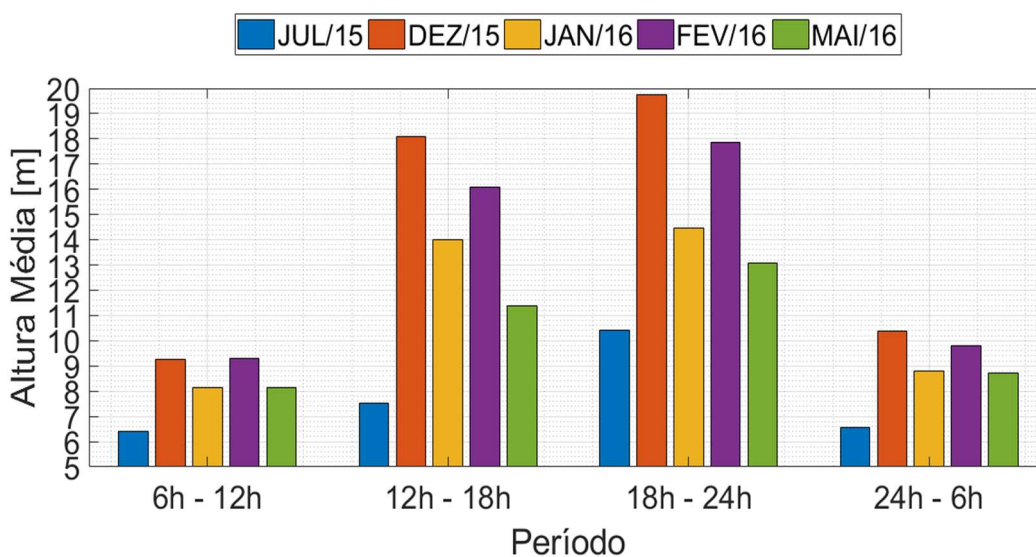


Figura 4.23: Altura média dos dutos de Niterói por período em diversos meses dos anos de 2015 e 2016.

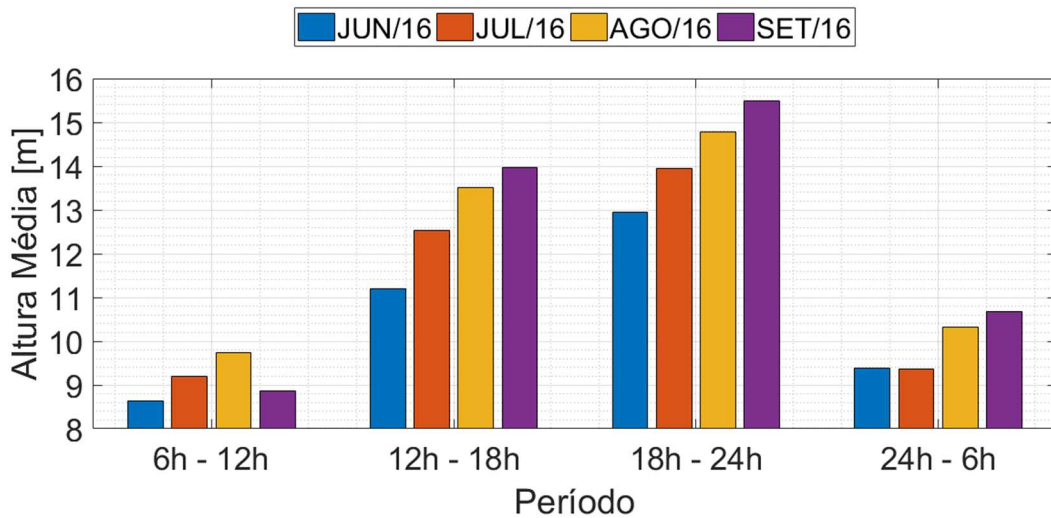


Figura 4.24: Altura média dos dutos de Niterói por período em diversos meses do ano de 2016.

4.3.5 Cabo Frio

A boia Cabo Frio esteve localizada em 2 posições distintas em períodos distintos, ambas no mar do estado do Rio de Janeiro, conforme apresentado na figura 4.25. De 2009 a 2013 a boia tinha as seguintes coordenadas: latitude $22,98^{\circ}$ S e longitude $42,10^{\circ}$ O (Cabo Frio 1). De 2016 a 2017 as coordenadas eram: latitude $23,63^{\circ}$ S e longitude $42,21^{\circ}$ O (Cabo Frio 2). Foram utilizadas todas as 8.033 medições, de cada grandeza física, disponibilizadas pelo PNBOIA e distribuídas da seguinte forma: 1.700 medições em 2009, 204 em 2010, 2.029 em 2012, 7 em 2013, 1.809 em 2016 e 2.284 em 2017.



Figura 4.25: Ilustração das localizações da boia Cabo Frio, utilizando a ferramenta *Google Earth*.

4.3.5.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Cabo Frio

Os anos de 2009 e 2012 possuem quantidades maiores de medições para a localização 1 da boia Cabo Frio e os anos de 2016 e 2017 possuem quantidades maiores de medições para a localização 2 da mesma boia, e por isso estão sendo usados como exemplos a seguir. Observa-se na figura 4.26 que as distribuições das alturas dos dutos de evaporação obedecem a 2 padrões, com maiores ocorrências entre 0 e 15 m nos anos de 2009 e 2012 e 10 e 20 m nos anos de 2016 e 2017.

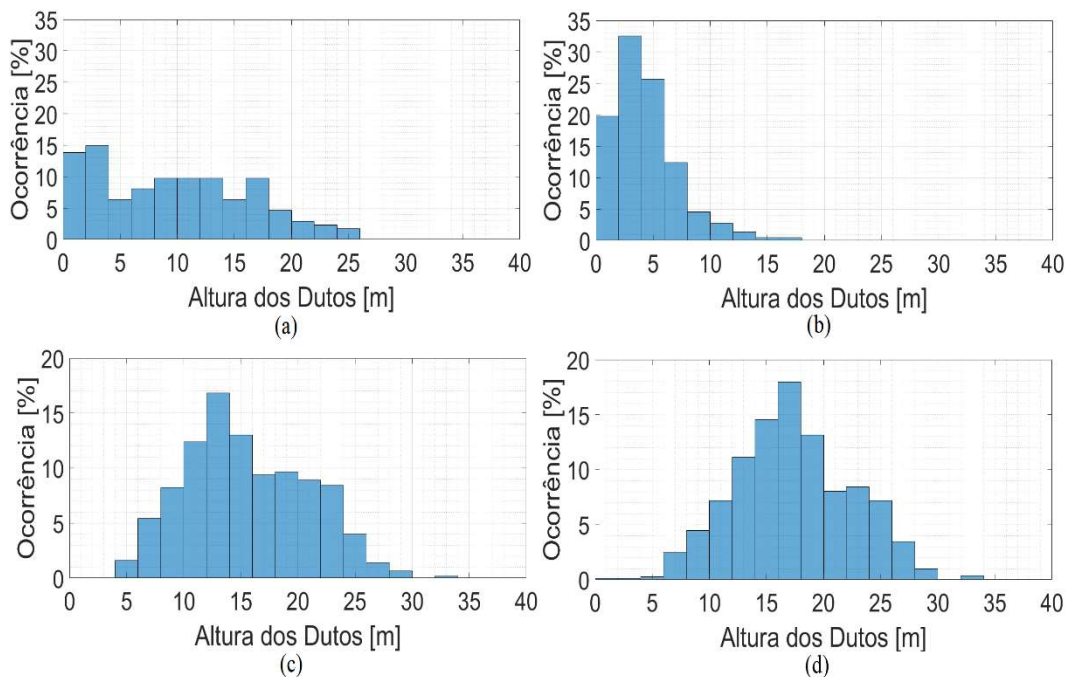


Figura 4.26: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Cabo Frio nos anos de: (a) 2009, (b) 2012, (c) 2016 e (d) 2017.

É possível então concluir que o comportamento das alturas dos dutos de evaporação, dada uma posição geográfica, pode ser considerado repetitivo anualmente. A figura 4.27 mostra os valores médios das alturas dos dutos de evaporação a cada mês, considerando todas as 8.033 medições e todos os anos disponibilizados (2009 a 2013 localização 1 e 2014 a 2017 localização 2).

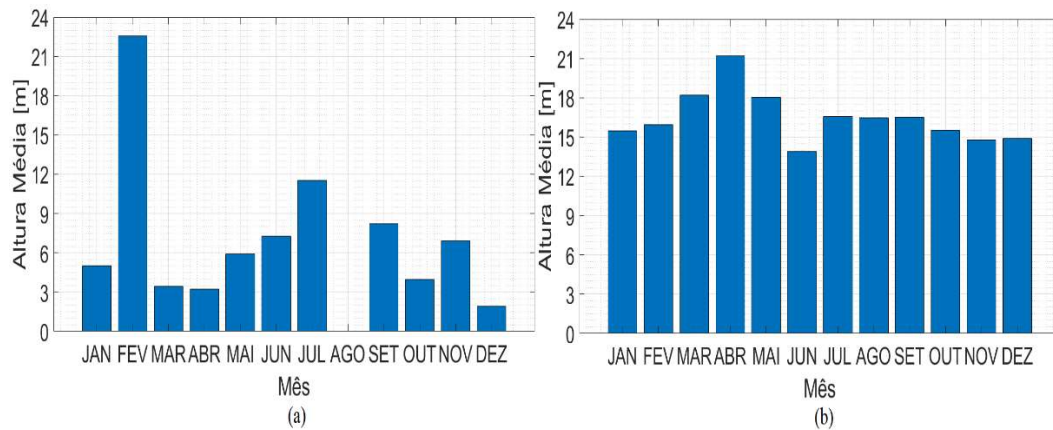


Figura 4.27: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Cabo Frio: (a) localização 1 e (b) localização 2.

Em Cabo Frio, foram observados 12 meses em um total de 36 (33,33 %) onde a altura média dos dutos de evaporação em um determinado mês é baixa pela manhã, aumenta nos períodos da tarde e da noite, e volta a cair na madrugada. Os dados relativos a estes meses podem ser conferidos a seguir, nas figuras 4.28 e 4.29.

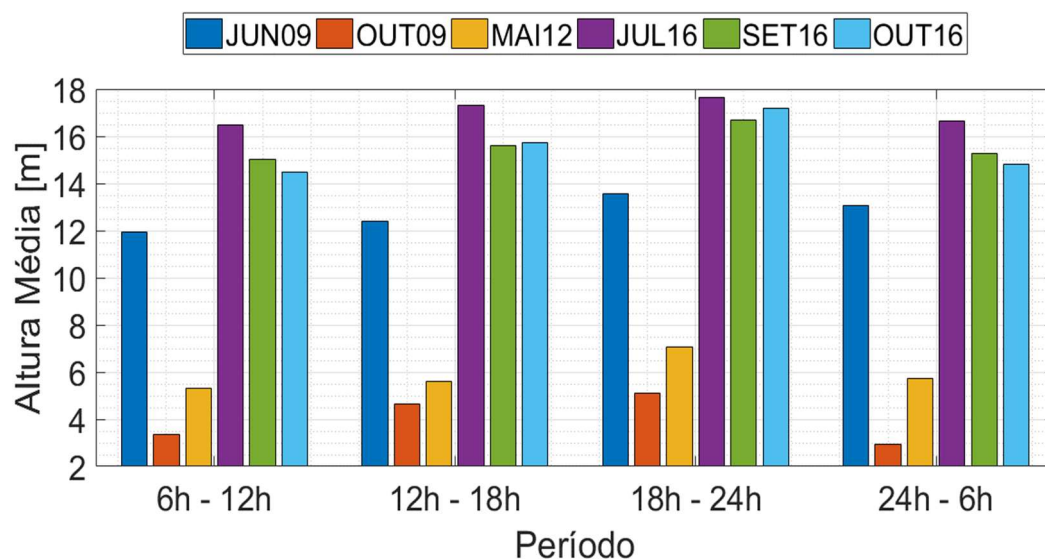


Figura 4.28: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Cabo Frio por período horário em diversos meses de 2019, 2012 e 2016.

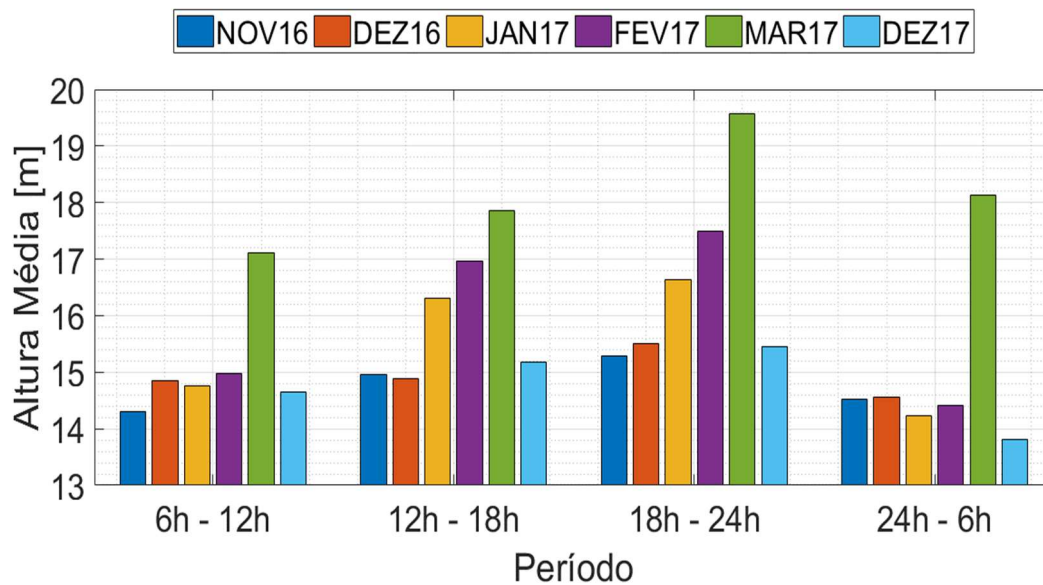


Figura 4.29: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Cabo Frio por período horário em diversos meses de 2016 e 2017.

4.3.6 Vitória

A boia Vitória está localizada no mar do estado do Espírito Santo, nas seguintes coordenadas: latitude $19,93^\circ$ S e longitude $39,71^\circ$ O, conforme apresentado na figura 4.30. Foram utilizadas todas as 7.225 medições, de cada grandeza física, disponibilizadas pelo PNBOIA, e distribuídas da seguinte forma: 1.902 medições em 2015, 4.310 em 2016 e 1.013 em 2017.

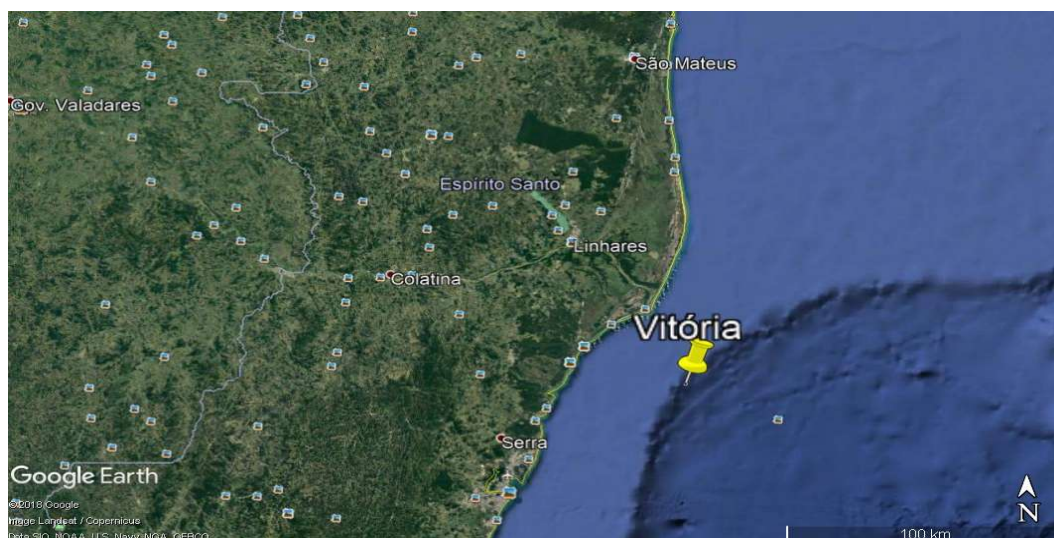


Figura 4.30: Ilustração da localização da boia Vitória, utilizando a ferramenta *Google Earth*.

4.3.6.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Vitória

Os anos de 2015, 2016 e 2017 possuem quantidades maiores de medições e por isso estão sendo usados como exemplos a seguir. Observando-se a figura 4.31, percebe-se que as distribuições das alturas dos dutos de evaporação obedecem a um certo padrão em todos os anos, com maiores ocorrências entre 10 e 25 m.

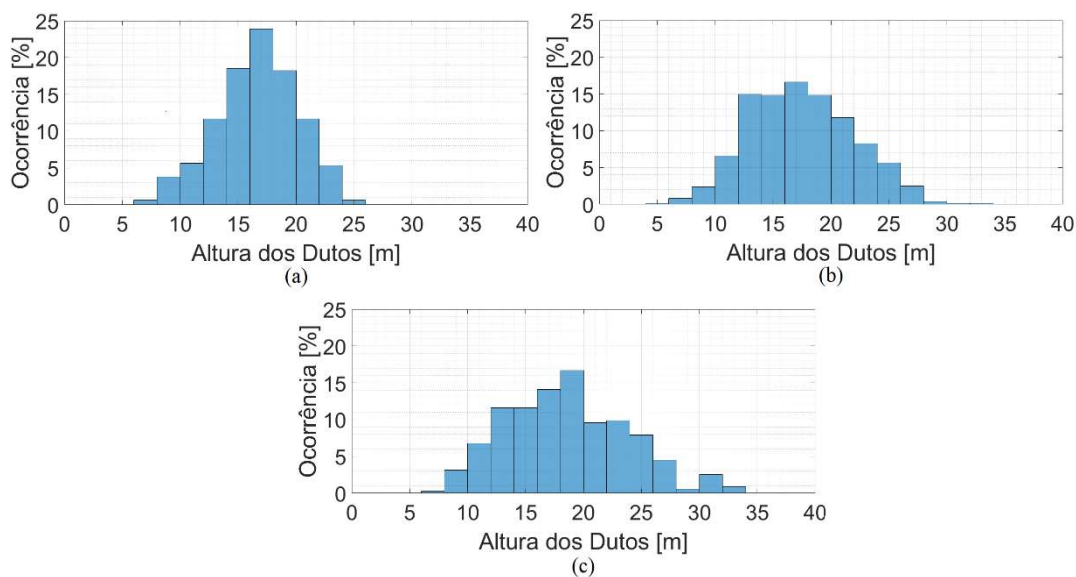


Figura 4.31: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Vitória nos anos de: (a) 2015, (b) 2016 e (c) 2017.

É possível então concluir que o comportamento das alturas dos dutos de evaporação, dada uma posição geográfica, pode ser considerado repetitivo anualmente. A figura 4.32 mostra os valores médios das alturas dos dutos de evaporação a cada mês, considerando todas as 7.225 medições e todos os anos disponibilizados (2015, 2016 e 2017). Não há dados sobre os meses de agosto e setembro destes três anos.

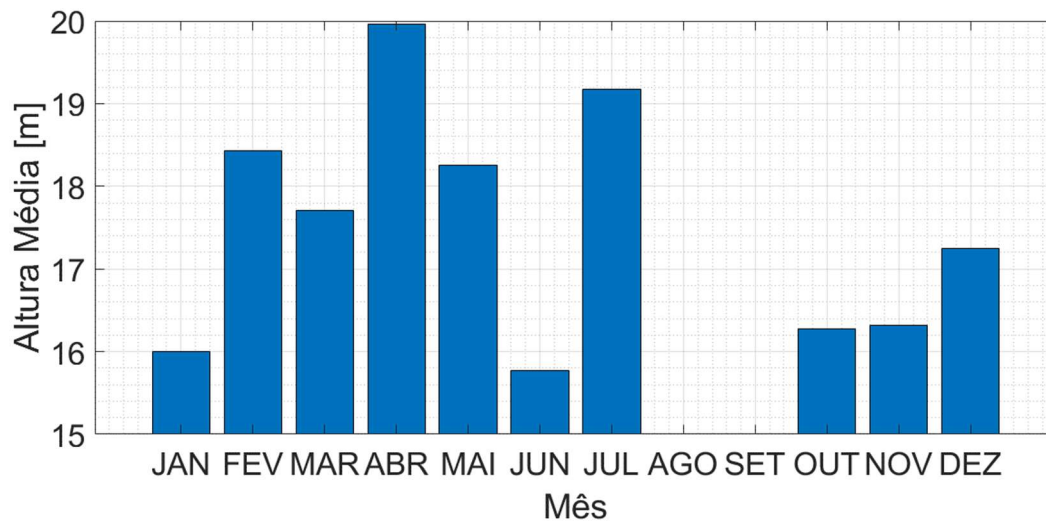


Figura 4.32: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Vitória.

Em Vitória, foram observados 11 meses em um total de 14 (78,57 %) onde a altura média dos dutos de evaporação em um determinado mês é baixa pela manhã, aumenta nos períodos da tarde e da noite, e volta a cair na madrugada. Os dados relativos a estes meses podem ser conferidos a seguir, nas figuras 4.33 e 4.34.

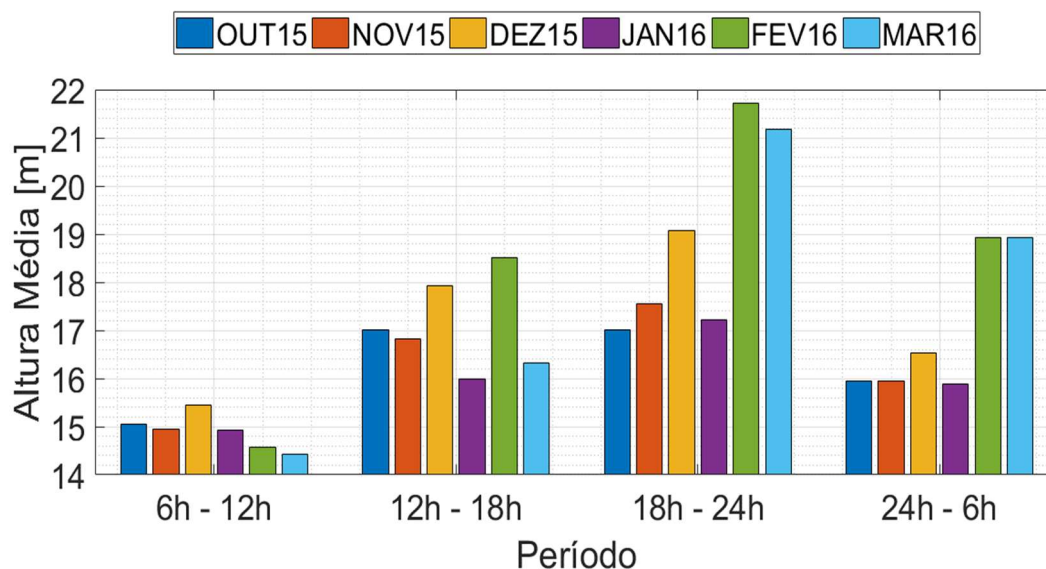


Figura 4.33: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Vitória por período horário em diversos meses de 2015 e 2016.

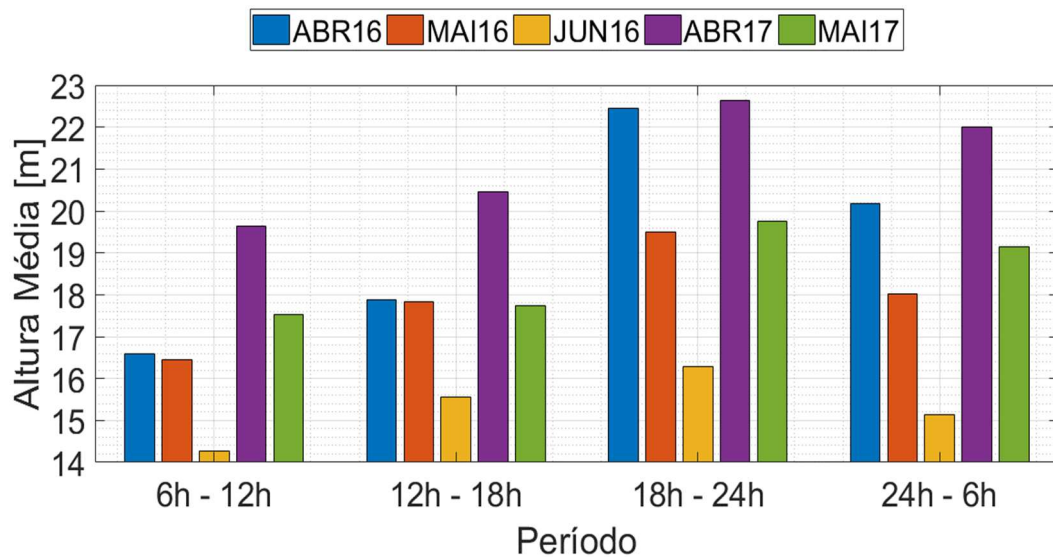


Figura 4.34: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Vitória por período horário em diversos meses de 2016 e 2017.

4.3.7 Porto Seguro

A boia Porto Seguro está localizada no mar do estado da Bahia, nas seguintes coordenadas: latitude $16,00^{\circ}$ S e longitude $37,94^{\circ}$ O, conforme apresentado na figura 4.35. Foram utilizadas todas as 10.152 medições, de cada grandeza física, disponibilizadas pelo PNBOIA, distribuídas da seguinte forma: 4.291 medições em 2012, 4.344 em 2013, 478 em 2015, 946 em 2016 e 93 em 2017.



Figura 4.35: Ilustração da localização da boia Porto Seguro, utilizando a ferramenta *Google Earth*.

4.3.7.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Porto Seguro

Os anos de 2012, 2013, 2015 e 2016 possuem quantidades maiores de medições e por isso estão sendo usados como exemplos a seguir. Observando-se a figura 4.36, percebe-se que as distribuições das alturas dos dutos de evaporação obedecem a um certo padrão em todos os anos, com maiores ocorrências entre 15 e 25 m.

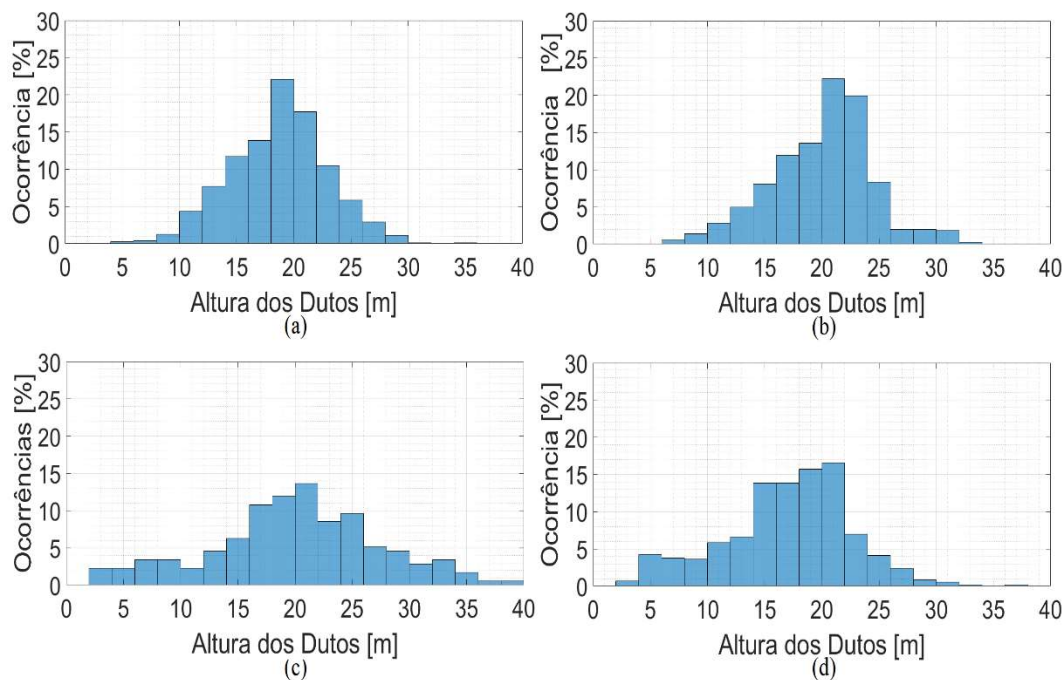


Figura 4.36: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Porto Seguro nos anos de: (a) 2012, (b) 2013, (c) 2015 e (d) 2016.

É possível então concluir que o comportamento das alturas dos dutos de evaporação, dada uma posição geográfica, pode ser considerado repetitivo anualmente. A figura 4.37 mostra os valores médios das alturas dos dutos de evaporação a cada mês, considerando todas as 10.152 medições e todos os anos disponibilizados (2012, 2013, 2015, 2016 e 2017).

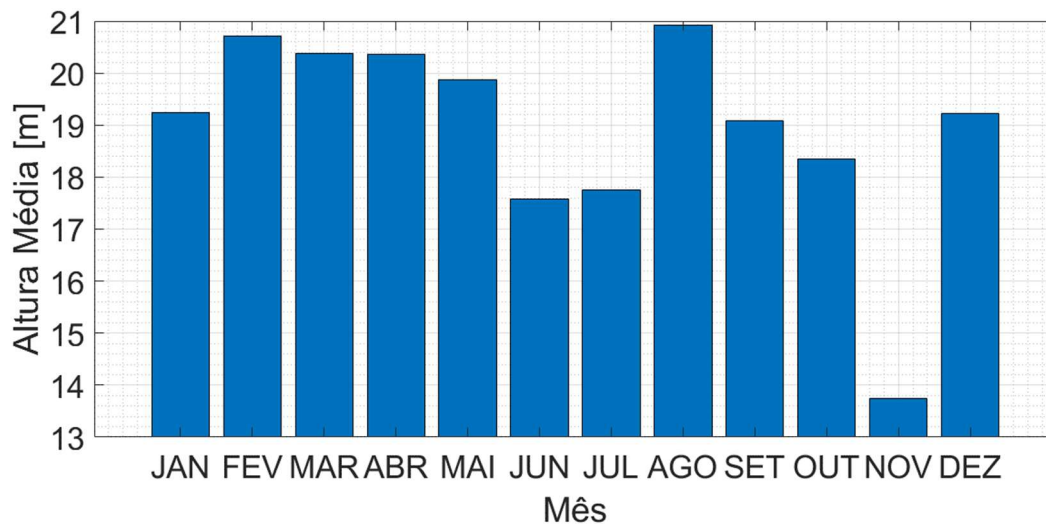


Figura 4.37: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Porto Seguro.

Em Porto Seguro, foram observados 4 meses em um total de 28 (14,29 %) onde a altura média dos dutos de evaporação em um determinado mês é baixa pela manhã, aumenta nos períodos da tarde e da noite, e volta a cair na madrugada. Os dados relativos a estes meses podem ser conferidos a seguir, na figura 4.38.

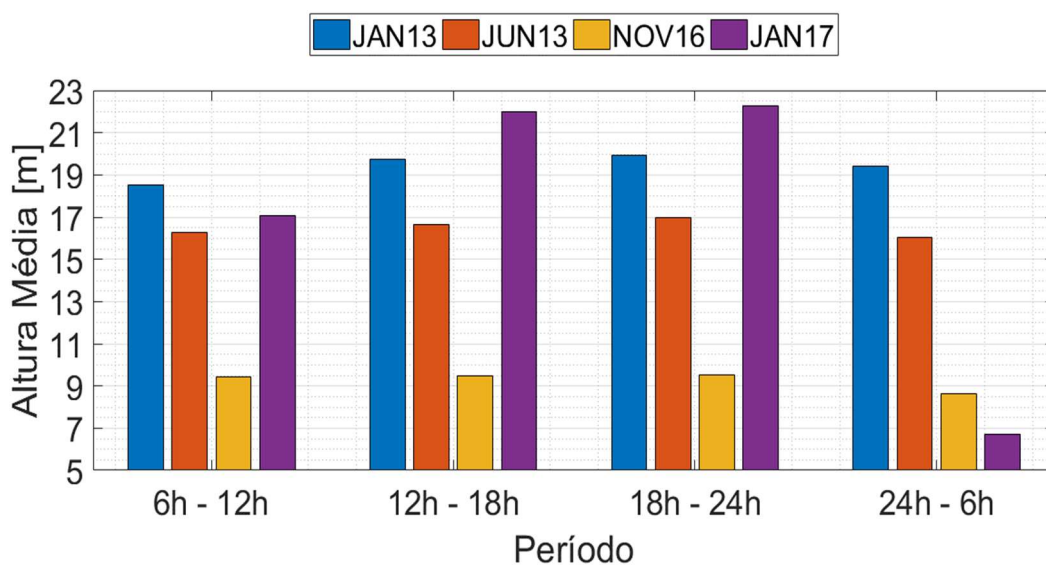


Figura 4.38: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia Porto Seguro por período horário em diversos meses de 2013, 2016 e 2017.

4.3.8 Recife

A boia Recife está localizada no mar do estado de Pernambuco, nas seguintes coordenadas: latitude $8,15^{\circ}$ S e longitude $34,56^{\circ}$ O, conforme apresentado na figura 4.39. Foram utilizadas todas as 9.359 medições, de cada grandeza física, disponibilizadas pelo PNBOIA, distribuídas da seguinte forma: 539 medições em 2014, 7.828 em 2015 e 992 em 2016.



Figura 4.39: Ilustração da localização da boia Recife, utilizando a ferramenta *Google Earth*.

4.3.8.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Recife

Observando-se a figura 4.40, percebe-se que as distribuições das alturas dos dutos de evaporação obedecem a um certo padrão em todos os anos, com maiores ocorrências entre 20 e 25 m.

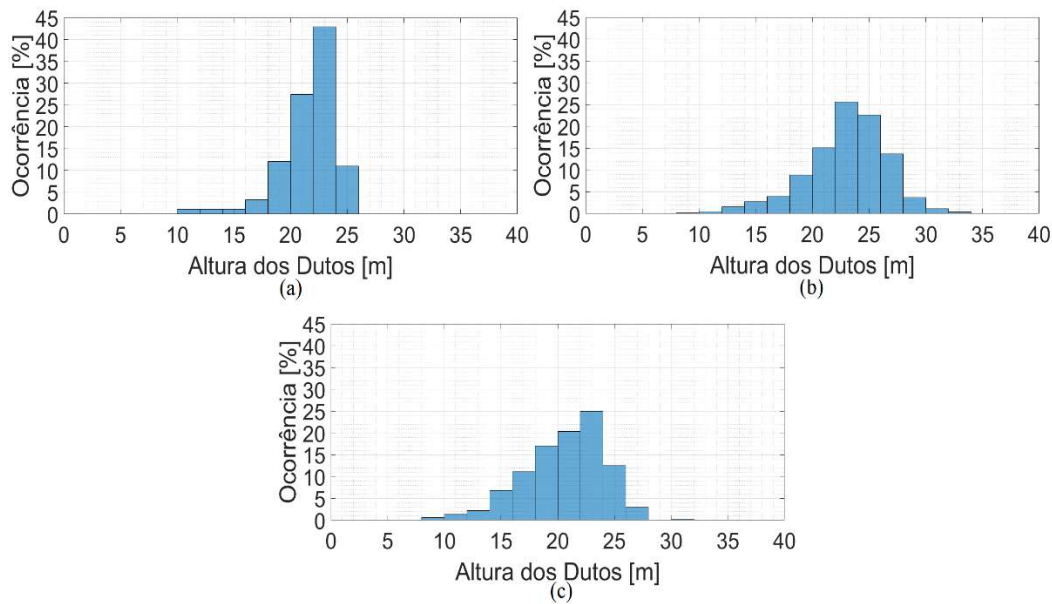


Figura 4.40: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Recife nos anos de: (a) 2014, (b) 2015 e (c) 2016.

É possível então concluir que o comportamento das alturas dos dutos de evaporação, dada uma posição geográfica, pode ser considerado repetitivo anualmente. A figura 4.41 mostra os valores médios das alturas dos dutos de evaporação a cada mês, considerando todas as 9.359 medições e todos os anos disponibilizados (2014, 2015 e 2016).

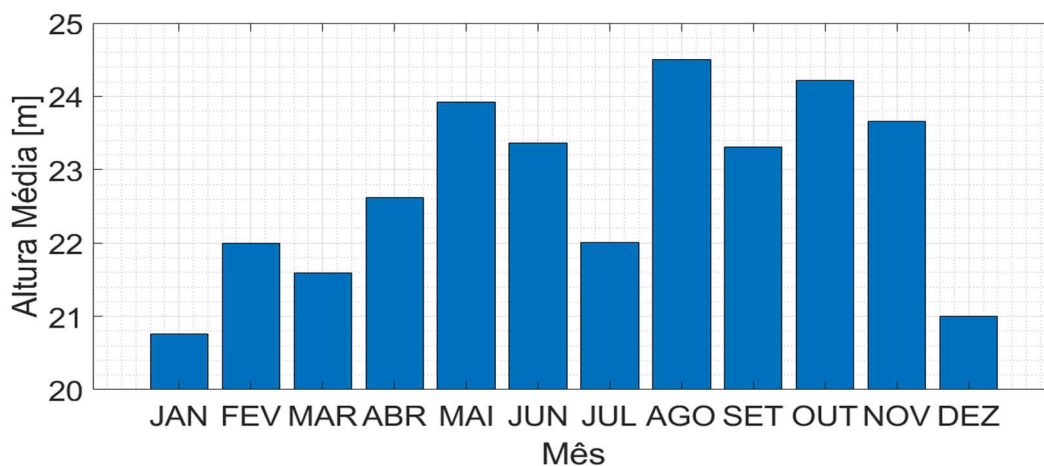


Figura 4.41: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Recife.

Em Recife, foram observados 3 meses em um total de 18 (16,66 %) onde a altura média dos dutos de evaporação em um determinado mês é baixa pela manhã,

aumenta nos períodos da tarde e da noite, e volta a cair na madrugada. Os dados relativos a estes meses podem ser conferidos a seguir, na figura 4.42.

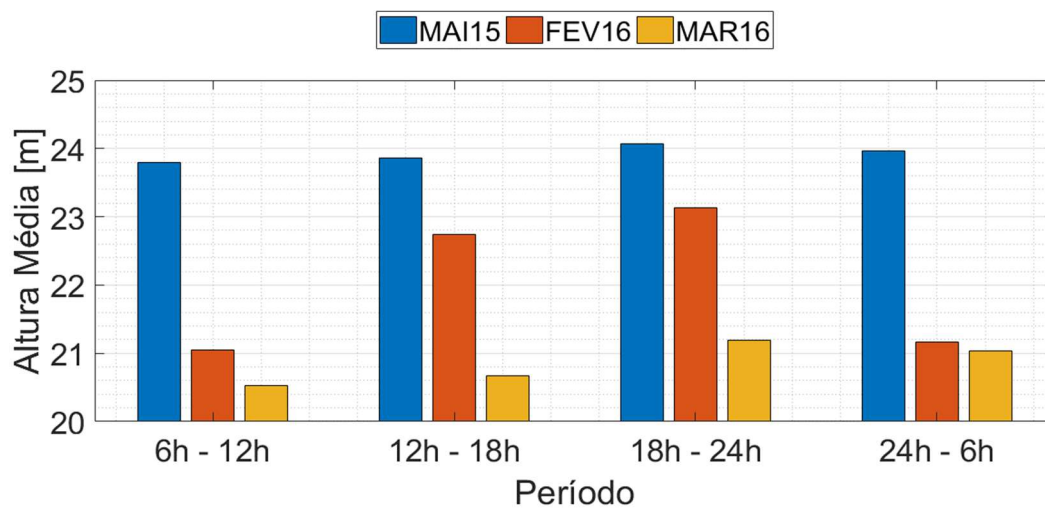


Figura 4.42: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia de Recife por período horário em diversos meses de 2015 e 2016.

4.3.9 Fortaleza

A boia Fortaleza está localizada no mar do estado do Ceará, nas seguintes coordenadas: latitude $3,21^{\circ}$ S e longitude $38,43^{\circ}$ O, conforme apresentado na figura 4.43. Foram utilizadas todas as 2.229 medições, de cada grandeza física, disponibilizadas pelo PNBOIA, distribuídas da seguinte forma: 435 medições em 2016 e 1.794 em 2017.



Figura 4.43: Ilustração da localização da boia Fortaleza, utilizando a ferramenta *Google Earth*.

4.3.9.1 Distribuição das Alturas dos Dutos de Evaporação da Boia Fortaleza

Observando-se a figura 4.44, percebe-se que as distribuições das alturas dos dutos de evaporação obedecem a um certo padrão em todos os anos, com maiores ocorrências entre 20 e 25 m.

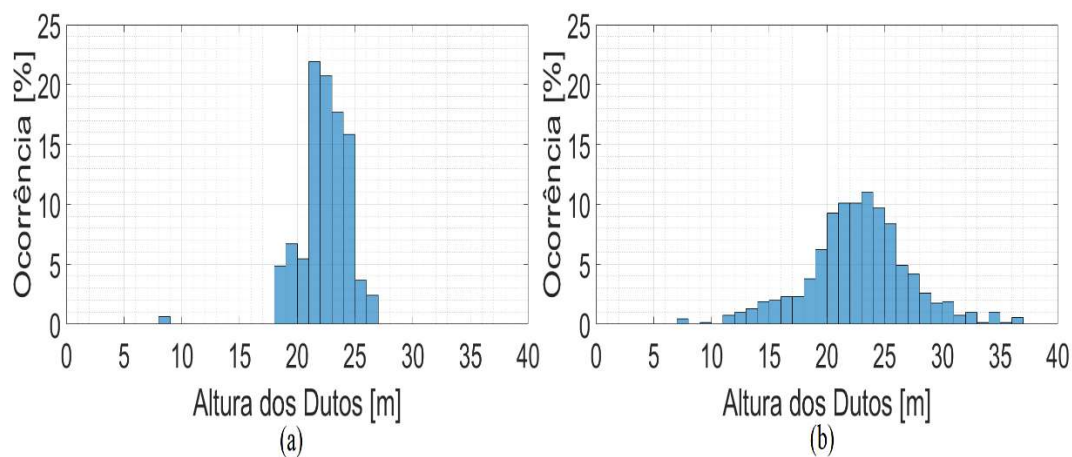


Figura 4.44: Ocorrências das alturas dos dutos de evaporação da boia Fortaleza nos anos de: (a) 2016 e (b) 2017.

É possível então concluir que o comportamento das alturas dos dutos de evaporação, dada uma posição geográfica, pode ser considerado repetitivo anualmente. A figura 4.45 mostra os valores médios das alturas dos dutos de evaporação a cada mês, considerando todas as 2.229 medições e todos os anos disponibilizados (2016 e 2017).

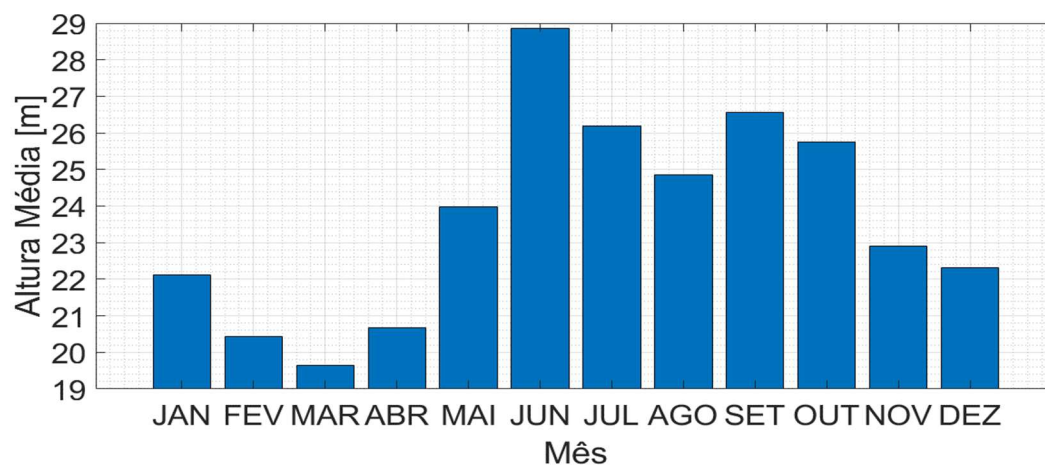


Figura 4.45: Variação das médias mensais das alturas dos dutos de evaporação, para a boia Fortaleza.

Em Fortaleza, foi observado apenas 1 caso em um total de 13 (7,69 %) onde a altura média dos dutos de evaporação em um determinado mês é baixa pela manhã, aumenta nos períodos da tarde e da noite, e volta a cair na madrugada. Os dados relativos a este mês podem ser conferidos a seguir, na figura 4.46.

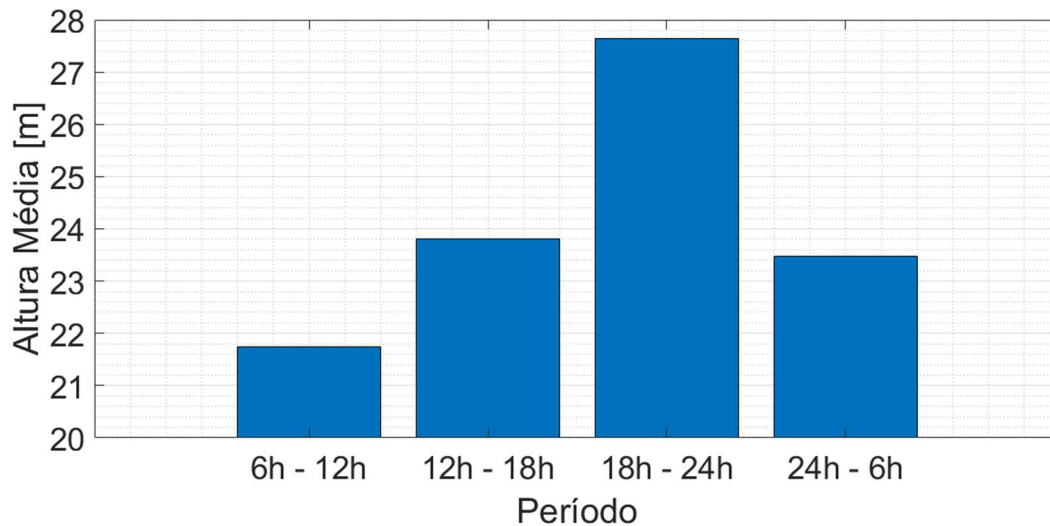


Figura 4.46: Variação da altura média dos dutos de evaporação da boia de Fortaleza por período horário em maio/2017.

4.3.10 Comparações

A seguir, serão apresentadas análises da relação entre o comportamento dos dutos de evaporação e as medições meteorológicas, bem como comparações dos resultados apresentados em um mesmo mês por boias geograficamente distintas.

4.3.10.1 Niterói e Cabo Frio

As boias Niterói e Cabo Frio são geograficamente próximas, sendo ambas localizadas no estado do Rio de Janeiro. Entretanto, apresentam ocorrências de dutos bem diferentes em determinados períodos. Isso ocorre porque a boia Niterói está localizada na entrada da Baía de Guanabara, enquanto que a boia de Cabo Frio está localizada em mar aberto.

As figuras 4.47 e 4.48 apresentam os valores correspondentes às médias de cada período (madrugada, manhã, tarde e noite) para a velocidade do vento,

temperatura do mar, temperatura do ar e umidade relativa em cada dia do mês. Desta forma, cada dia possui, quando disponibilizado pelo PNBOIA, quatro valores para cada grandeza física e, consequentemente, para a altura dos dutos.

As figuras 4.47 e 4.48 mostram que, em março de 2017, os dutos de evaporação de Cabo Frio têm alturas maiores. Observa-se que as temperaturas do mar e do ar nas duas regiões são similares e que, quando a umidade diminui, a altura do duto cresce em ambos os casos.

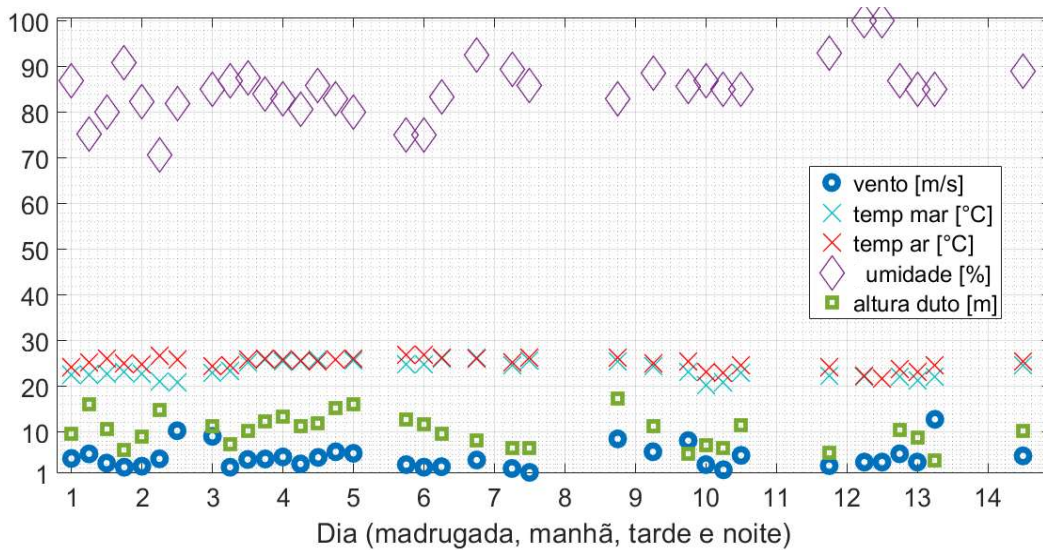


Figura 4.47: Dutos e dados meteorológicos da boia de Niterói no mês de março de 2017.

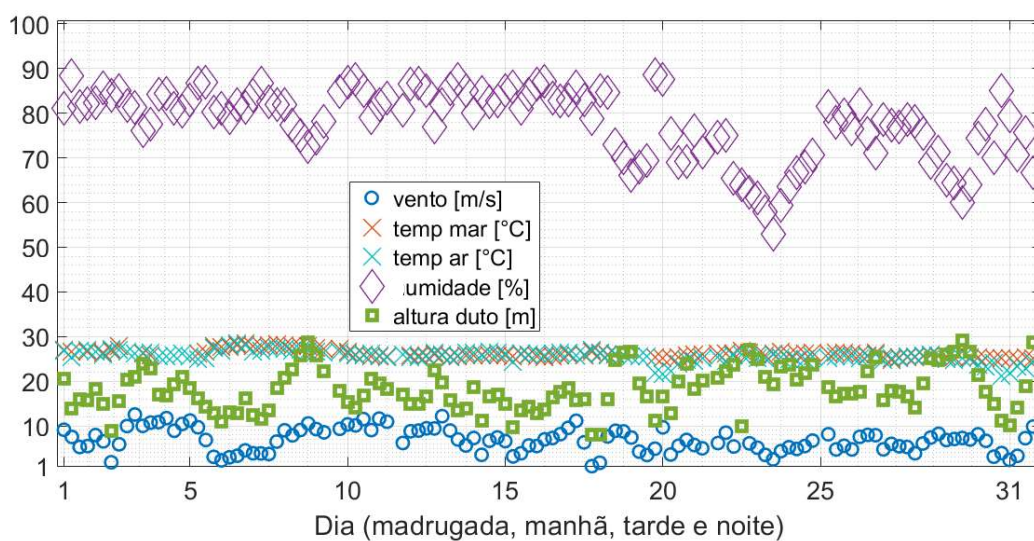


Figura 4.48: Dutos e dados meteorológicos da boia de Cabo Frio no mês de março de 2017.

Este crescimento tem proporções distintas devido à diferença nas velocidades do vento registradas nas duas boias. Utilizando-se as eq. (4.1) a (4.15) e mantendo-se constantes: a temperatura do ar em 27° C, a temperatura do mar em 28° C, a umidade relativa em 73% e a pressão atmosférica em 1.000 mbar, encontram-se as relações entre as velocidades do vento e as alturas dos dutos apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Impacto da variação da velocidade do vento na altura do duto de evaporação.

Vel. Vento (m/s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Alt. Duto (m)	9,9	13,1	15,6	18,6	21,0	22,9	24,6	26,0	27,1	28,2

4.3.10.2 Rio Grande e Itajaí

As boias Rio Grande e Itajaí estão localizadas na região sul do Brasil, mas apresentam comportamentos diferentes para as alturas dos dutos de evaporação. As figuras 4.49 e 4.50 apresentam as condições climáticas e valores de alturas de dutos nas duas regiões no mês de julho de 2012.

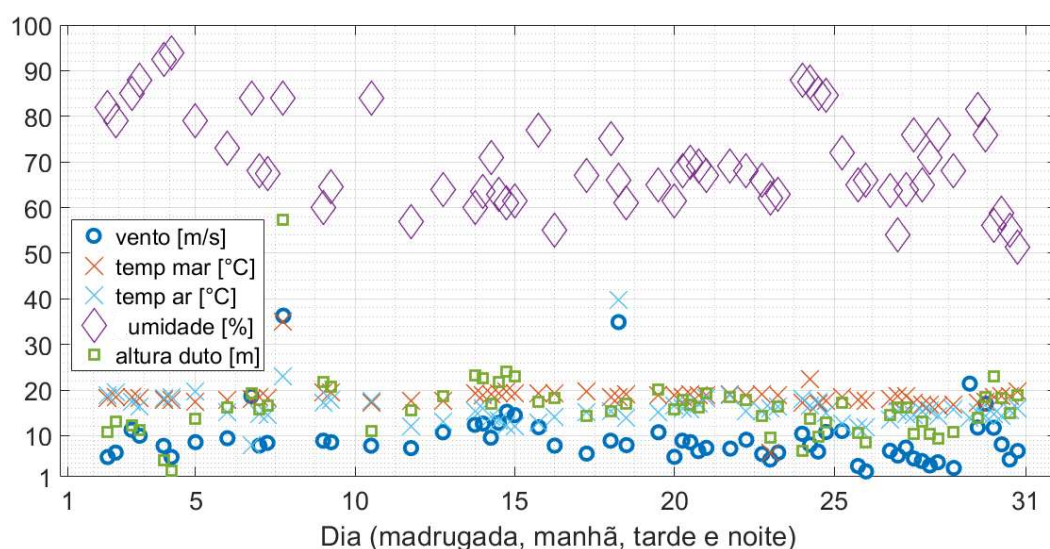


Figura 4.49: Dutos e dados meteorológicos da boia de Rio Grande no mês de julho de 2012.

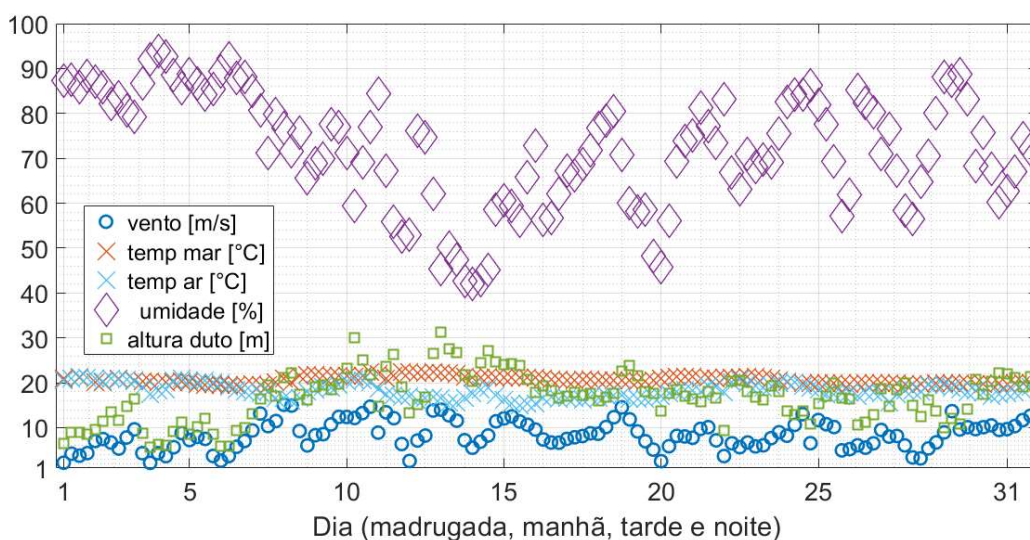


Figura 4.50: Dutos e dados meteorológicos da boia de Itajaí no mês de julho de 2012.

Nota-se que o grande diferencial está na baixa umidade registrada pela boia Itajaí, que ocasiona valores de alturas de dutos bem maiores nesta região. Utilizando-se as eq. (4.1) a (4.15) e mantendo-se constantes: a temperatura do ar em 20° C, a temperatura do mar em 20° C, a velocidade do vento em 10 m/s e a pressão atmosférica em 1.000 mb, encontram-se, apresentadas na tabela 4.2, as relações entre as umidades do ar e as alturas dos dutos.

Tabela 4.2: Impacto da variação da umidade do ar na altura do duto de evaporação.

Umidade Relativa (%)	40	50	60	70	80	90	100
Altura do Duto (m)	35,4	30,1	26,1	21,1	15,8	8,0	0

4.3.10.3 Vitória e Recife

As boias Vitória e Recife estão localizadas, respectivamente, nas regiões sudeste e nordeste do Brasil e apresentam comportamentos diferentes para as alturas dos dutos de evaporação. As figuras 4.51 e 4.52 apresentam as condições climáticas e valores de alturas de dutos nas duas regiões no mês de janeiro de 2016.

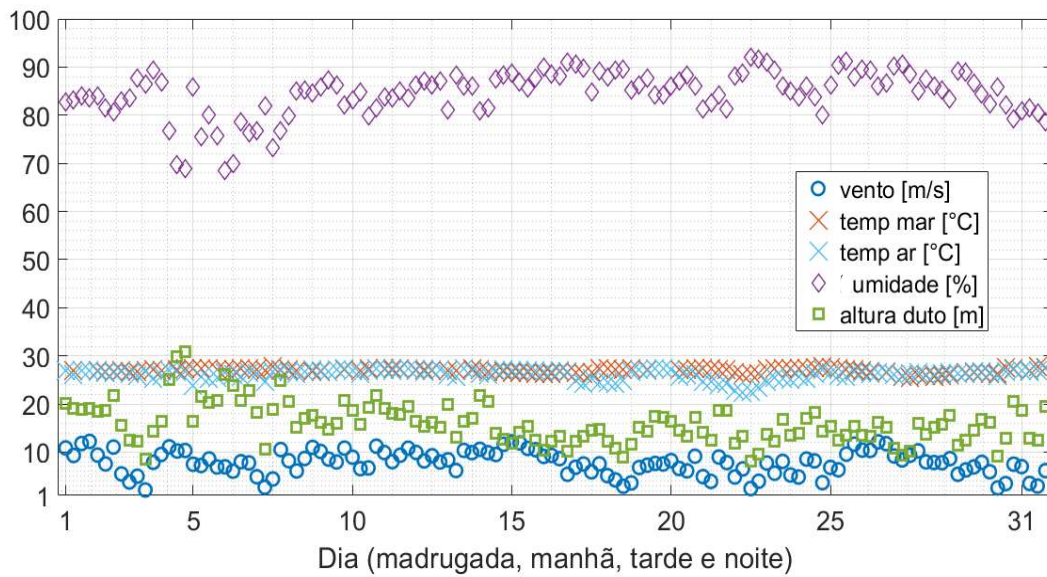


Figura 4.51: Dutos e dados meteorológicos da boia de Vitória no mês de janeiro de 2016.

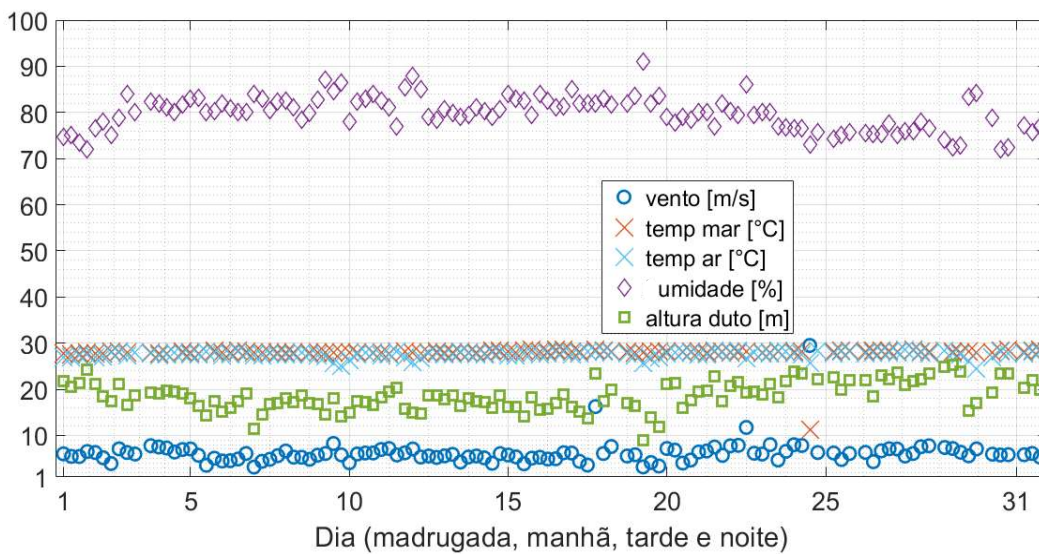


Figura 4.52: Dutos e dados meteorológicos da boia de Recife no mês de janeiro de 2016.

Nota-se que o grande diferencial está, mais uma vez, na baixa umidade registrada pela boia Recife, que ocasiona valores de alturas de dutos maiores nesta região. Até mesmo em casos onde são registrados, na boia de Vitória, valores de velocidade do vento mais altos, próximos de 10 m/s, a alta umidade (entre 80% e 90%) impede a ocorrência de dutos mais elevados. Utilizando-se as eq. (4.1) a (4.15) e mantendo-se constantes: a temperatura do ar em 27° C, a temperatura do

mar em 27° C, a velocidade do vento em 10 m/s e a pressão atmosférica em 1.000 mb, encontram-se, apresentadas na tabela 4.3, as relações entre as umidades do ar e as alturas dos dutos.

Tabela 4.3: Impacto da variação da umidade do ar na altura do duto de evaporação.

Umidade Relativa (%)	65	70	75	80	85	90
Altura do Duto (m)	32,5	29,1	25,6	21,9	17,6	11,7

4.3.10.4 Itajaí e Fortaleza

As boias de Itajaí e Fortaleza estão localizadas em regiões geograficamente distintas. A primeira está localizada no sul do país e a segunda no nordeste.

Observando-se a figura 4.53, é possível constatar que, nos momentos em que a altura do duto ultrapassa 20 m em Itajaí, a umidade está baixa ou a velocidade do vento está elevada. Em alguns casos, há uma combinação de ambos.

No caso de Fortaleza, a figura 4.54 mostra que, nos momentos em que a umidade decresce, a altura do duto ultrapassa 30 m.

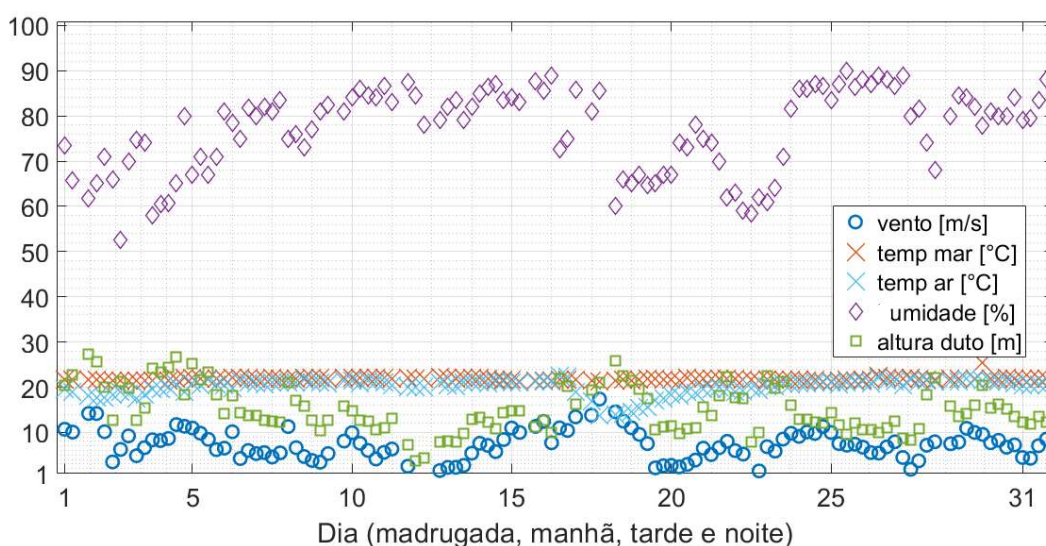


Figura 4.53: Dutos e dados meteorológicos da boia de Itajaí no mês de julho de 2017.

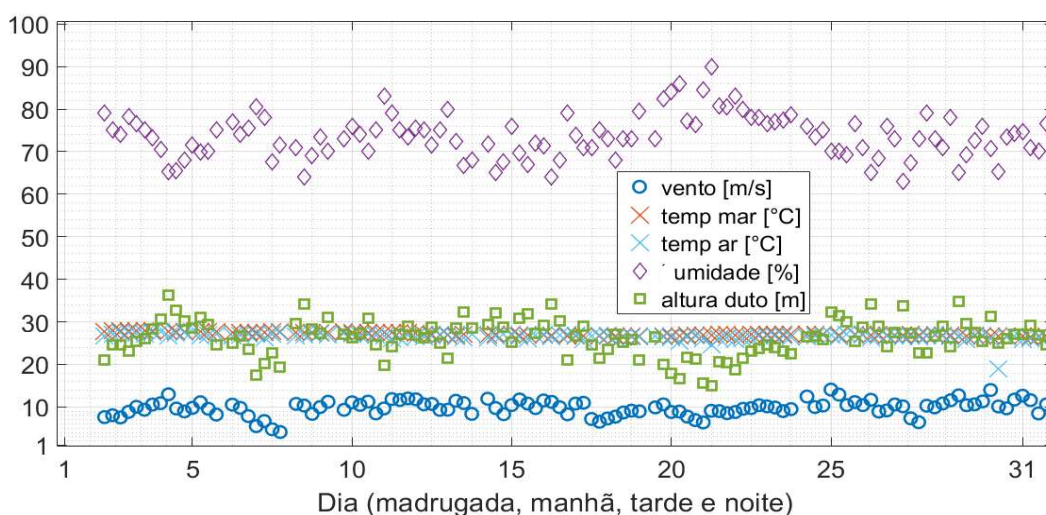


Figura 4.54: Dutos e dados meteorológicos da boia de Fortaleza no mês de julho de 2017.

Comparando as figuras 4.53 e 4.54, percebe-se que a diferença entre as alturas dos dutos é ocasionada pela significativa diferença das temperaturas do mar e do ar das duas regiões, em pleno inverno do hemisfério sul (julho de 2017). Utilizando-se as eq. (4.1) a (4.15) e mantendo-se constantes: a velocidade do vento em 10 m/s, a umidade do ar em 75% e a pressão atmosférica em 1.000 mb, encontram-se, apresentadas na tabela 4.4, as relações entre as temperaturas (do ar e do mar) e as alturas dos dutos.

Tabela 4.4: Impacto da variação das temperaturas na altura do duto de evaporação.

Temperaturas (°C)	16	18	20	22	24	26	28
Altura do Duto (m)	15,1	16,7	18,5	20,3	22,3	24,4	26,7

4.3.10.5 Cabo Frio e Fortaleza

As boias de Cabo Frio e Fortaleza estão localizadas, respectivamente, nas regiões sudeste e nordeste do Brasil. Comparando as figuras 4.55 e 4.56, percebe-se que, em fevereiro de 2017, em pleno verão no hemisfério sul, os valores das alturas dos dutos de Cabo Frio são menores do que os de Fortaleza porque, no primeiro, as temperaturas do mar e do ar são mais baixas e a umidade mais alta.

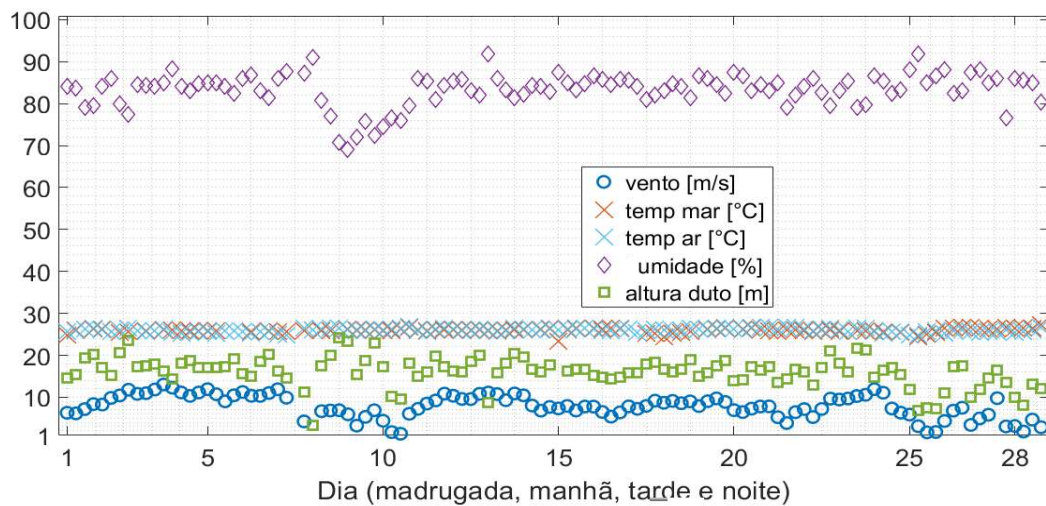


Figura 4.55: Dutos e dados meteorológicos da boia de Cabo Frio no mês de fevereiro de 2017.

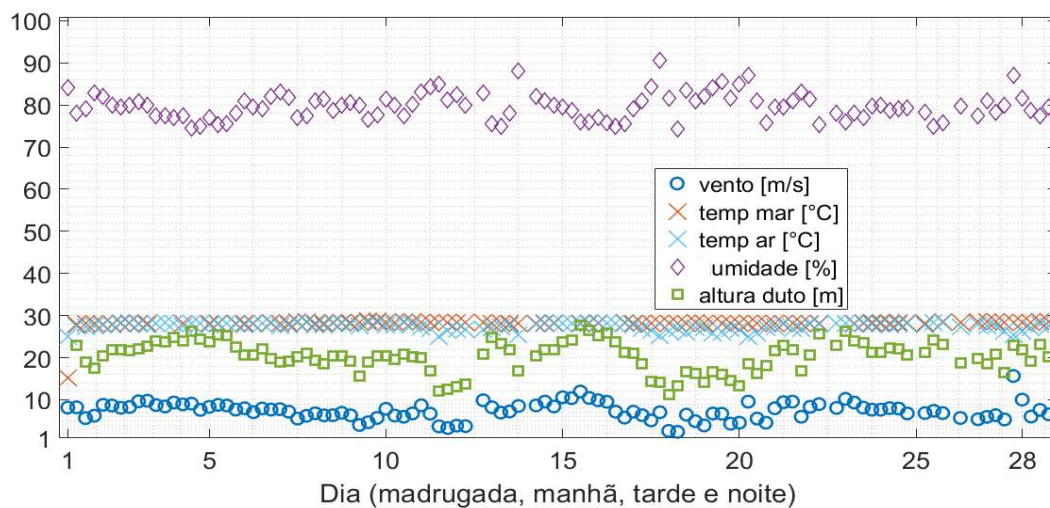


Figura 4.56: Dutos e dados meteorológicos da boia de Fortaleza no mês de fevereiro de 2017.

4.3.11 Comportamento dos Dutos de Evaporação nos Períodos do Dia

Teoricamente, os dutos de evaporação ocorrem com mais frequência no período da tarde devido ao prolongado período de aquecimento solar [18]. Na prática, os resultados apresentados nas seções 4.3.1 a 4.3.9 mostram que este comportamento varia geograficamente. Foram selecionados os casos onde a altura média dos dutos de evaporação em um determinado mês é baixa pela manhã, aumenta nos períodos da tarde e da noite, e volta a cair na madrugada. Na região

sudeste, houve uma maior quantidade relativa de meses onde o referido comportamento ocorreu: 33,33 % em Santos e Cabo Frio, 45 % em Niterói e 78,57% em Vitória. No sul e no nordeste do país, esta quantidade foi menor: 15,22% em Rio Grande, 21,54 % em Itajaí, 14,29 % em Porto Seguro, 16,66 % em Recife e 7,60 % em Fortaleza.

4.3.12 Probabilidade de Ocorrência

A tabela 4.5 mostra as probabilidades percentuais de ocorrência de dutos de evaporação com alturas superiores a 20 m em cada região geográfica para cada mês do ano. Essas probabilidades foram calculadas utilizando-se todos os dados fornecidos pelo PNBOIA e descritos neste trabalho. Observa-se que as boias localizadas no nordeste do país (Porto Seguro, Recife e Fortaleza) sofrem menos variação sazonal e possuem dutos de evaporação com alturas superiores às das boias localizadas no sul e sudeste brasileiro.

Os dados da tabela 4.5 indicam claramente que dutos de evaporação com alturas superiores a 20 m ocorrem com altas percentagens durante diversos meses e locais distribuídos ao longo da costa brasileira.

Tabela 4.5: Probabilidade percentual de ocorrência mensal de dutos de evaporação com alturas superiores a 20 m no litoral brasileiro.

	Rio Grande	Itajaí	Santos	Niterói	Cabo Frio	Vitória	Porto Seguro	Recife	Fortal.
JAN	42	30	1	11	14	15	60	60	85
FEV	29	45	13	9	14	36	68	80	63
MAR	60	63	42	0	27	28	61	74	51
ABR	69	44	34	*	42	50	52	78	61
MAI	56	38	48	3	25	34	44	91	85
JUN	44	27	23	1	0	18	31	76	50
JUL	46	17	21	2	17	39	28	65	93
AGO	37	19	28	2	19	*	60	90	98
SET	22	22	35	3	20	*	38	84	92
OUT	22	20	21	2	17	7	42	97	80
NOV	27	34	21	4	18	12	9	96	94
DEZ	31	33	9	18	16	30	50	71	85
MÉDIA	40	33	25	5	20	27	45	80	78

* Não há dados disponíveis

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS DA PROPAGAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A seguir, serão apresentados os resultados de simulações de propagação eletromagnética por traçado de raios utilizando-se o algoritmo descrito na seção 2.5., aplicado a diversos ambientes, caracterizados por seus mapas de refratividade modificada M . Alguns destes mapas foram encontrados a partir de medições meteorológicas feitas por radiossondas em balões, e outros foram elaborados a partir de modelos ou extraídos diretamente da literatura. Todos os resultados foram comparados com resultados obtidos de simulações feitas com o *software* AREPS, que simula a propagação eletromagnética por intermédio de soluções numéricas de Equação Parabólica (aproximação da equação de Helmholtz que despreza os efeitos do retroespalhamento).

5.1 Mapas com Variação do Gradiente da Refratividade Modificada ∇M ao Longo do Percurso

Para aplicação do traçado de raios em ambientes onde há uma variação do gradiente da refratividade modificada ∇M ao longo do percurso, foram simulados 2 enlaces em 2 mapas de refratividade modificada M disponíveis na literatura.

A figura 5.1a foi adaptada de [3] e mostra um mapa de refratividade modificada M resultante de medições meteorológicas realizadas em Canterbury - Nova Zelândia, por equipamentos de sondagem em terra (utilizando-se caminhões) e no mar (utilizando-se uma aeronave e uma embarcação). A figura 5.1b foi adaptada de [19] e mostra um mapa de refratividade modificada M da região do Canal Inglês.

O ambiente foi discretizado em 90 colunas e 39 linhas (correspondentes a $\Delta x = 2.333$ m, $\Delta h_{0-300m} = 15$ m e $\Delta h_{300-900m} = 33,33$ m, respectivamente) na região de Canterbury, e 126 colunas e 34 linhas (correspondentes a $\Delta x = 1.865$ m e $\Delta h = 15,15$ m, respectivamente), na região do Canal Inglês. Tendo o mapa de refratividade modificada M como dado de entrada, o algoritmo foi capaz de, utilizando a formulação apresentada na seção 3.3., gerar os mapas de gradiente de refratividade

modificada ∇M , traçar os raios e calcular as perdas de propagação, como mostrado nas figuras 5.2 e 5.3.

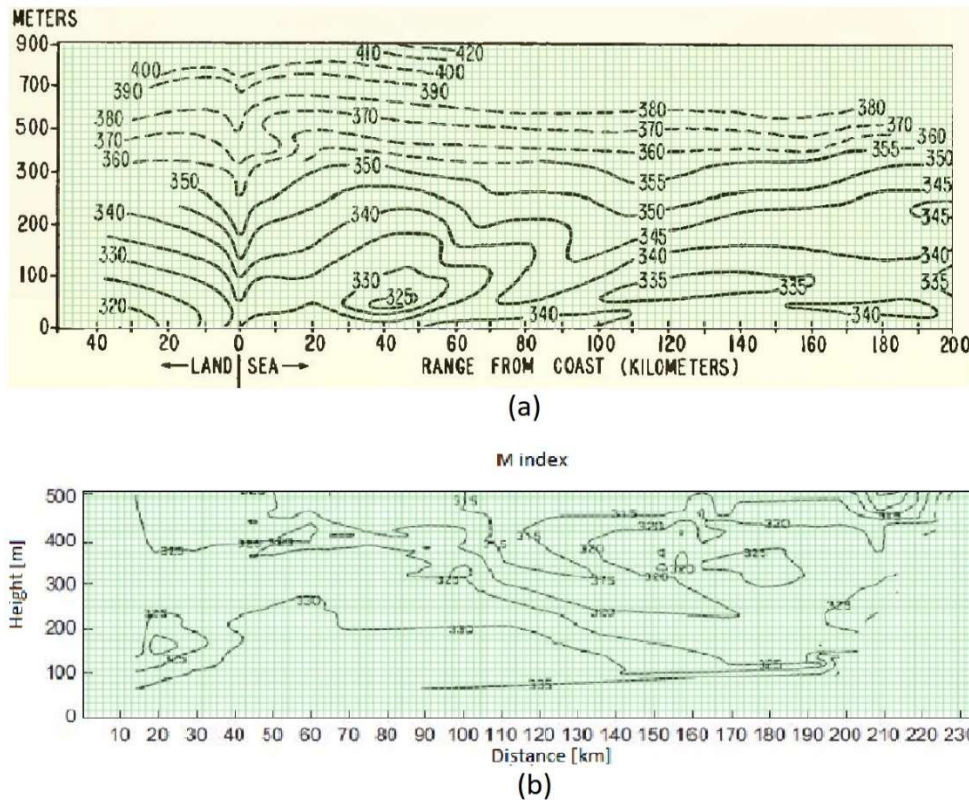


Figura 5.1: Adaptação e discretização do mapa de refratividade modificada M de: a) Canterbury – Nova Zelândia e b) Canal Inglês.

Reproduzidos de [3] e [19], respectivamente.

A figura 5.2 mostra o traçado de raios e a figura 5.3 mostra os valores simulados de Perda de Propagação (PL – *Path Loss*) ao longo do percurso, para as regiões de Canterbury e Canal Inglês, comparados com a atenuação no espaço livre (*Free Space Loss* – FSL). As seguintes configurações foram utilizadas:

- Região de Canterbury:
 - Frequência: 1 GHz a 20 GHz.
 - Altura das Antenas: 15 m.
 - Posição da antena transmissora: -10 km (10 km em terra).
 - Posição da antena receptora: 80 km (a partir do início do mar).
 - Raios lançados: 500 entre -1° e 1° de elevação com a horizontal.
 - Raios que atingiram o receptor: 4.
 - Largura do feixe (Gaussiano) de -3 dB na transmissão: 13° .

- Polarização: horizontal.
- Condutividade do solo: 0,01 S/m em terra e 5 S/m no mar.
- Permissividade relativa do solo: 30 em terra e 75 no mar.
- Região do Canal Inglês:
 - Frequência: 1 GHz a 20 GHz.
 - Altura das Antenas: 15 m.
 - Posição da antena transmissora: 0 km.
 - Posição da antena receptora: 90 km.
 - Raios lançados: 1000 entre -1° e 1° de elevação com a horizontal.
 - Raios que atingiram o receptor: 2.
 - Largura do feixe (Gaussiano) de 3 dB na transmissão: 13° .
 - Polarização: horizontal.
 - Condutividade do solo: 5 S/m.
 - Permissividade relativa do solo: 75.

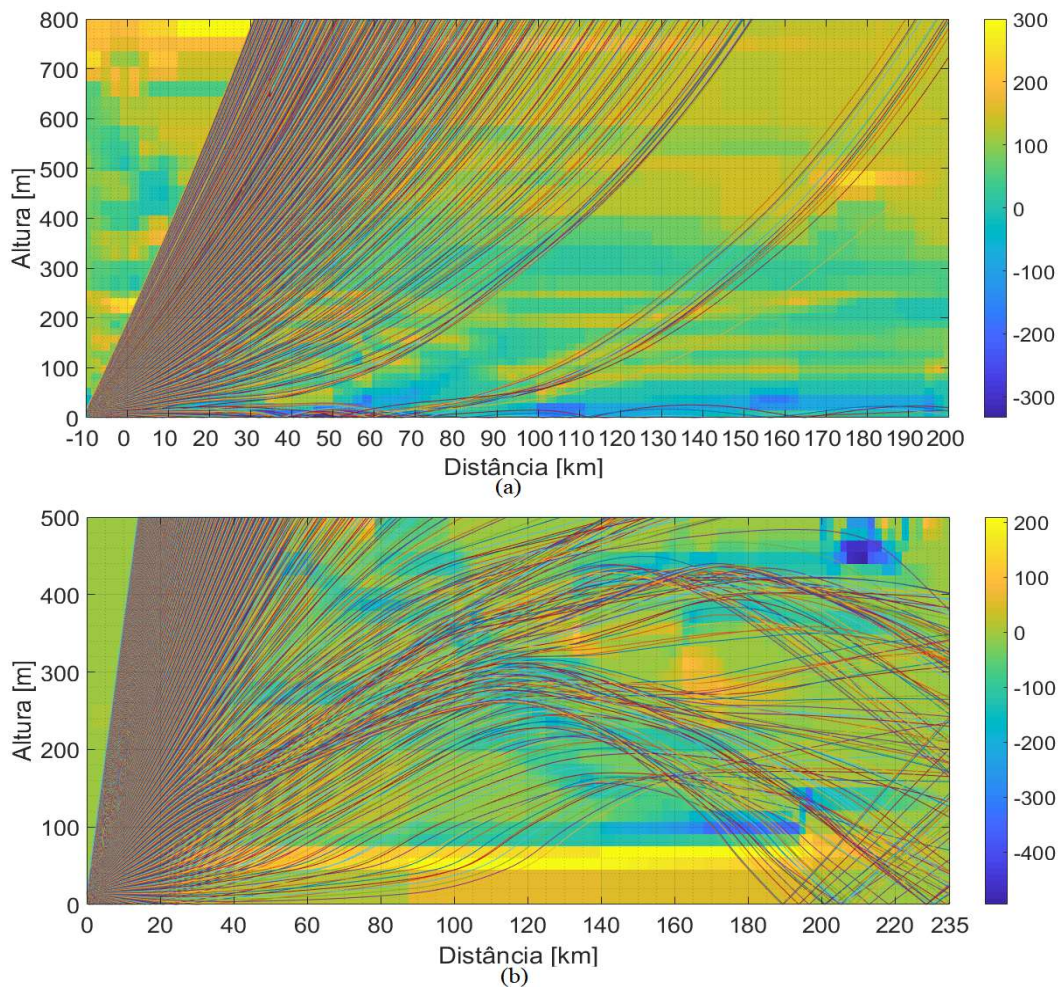


Figura 5.2: Traçado de raios com gradiente de refratividade modificada

∇M colorido ao fundo das regiões de: (a) Canterbury e (b) Canal Inglês.

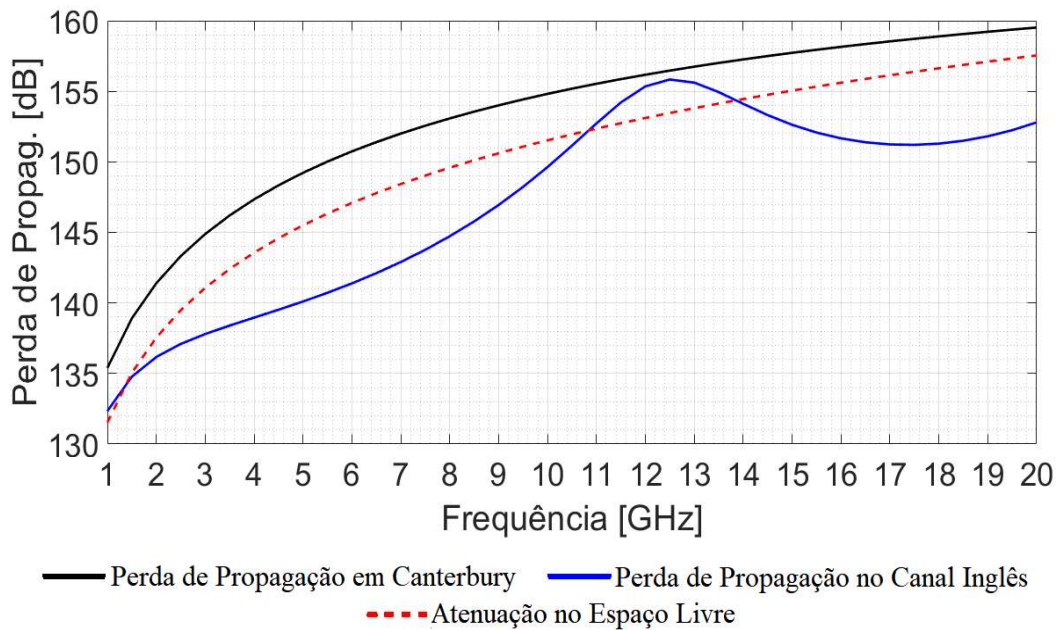


Figura 5.3: Perda de Propagação em função da frequência, para as regiões de Canterbury e Canal Inglês, a 90 km de distância do transmissor.

Na figura 5.2, é possível visualizar a formação de dutos nas duas regiões, viabilizando a comunicação além do horizonte, situado a aproximadamente 32 km. Como mostra a figura 5.2(b), o traçado de raios também possibilita a visualização de: regiões de sombra, como a compreendida entre 120 km e 180 km de distância, abaixo de 100 m de altura; e regiões de multipercursos (por exemplo, na região compreendida entre as distâncias de 140 km a 160 km e alturas de 250 m a 300 m. A figura 5.3 mostra que, em Canterbury, os valores de PL se aproximam dos valores de FSL para frequências entre 1,0 GHz e 1,2 GHz e se distanciam para frequências entre 1,2 GHz e 20,0 GHz. No Canal Inglês, observa-se que o PL é menor que o FSL , de forma praticamente constante, para as frequências de 1 GHz a 20 GHz.

5.2 Mapas Resultantes de Sondagens Atmosféricas

A seguir, serão apresentadas simulações utilizando traçado de raios a partir de perfis de refratividade modificada M baseados em medições atmosférica, realizadas por balões e radiossondas conforme descrito na seção 3.4. Os resultados de perda de propagação são comparados aos resultados encontrados utilizando o

software AREPS, o *FSL* e a combinação de *FSL* com a perda por difração pela curvatura da Terra [20]. As seguintes configurações são comuns a todos os casos:

- Frequência: 1 GHz e 3 GHz.
- Raios lançados: 1000 entre -5° e 5° de elevação com a horizontal.
- Altura das antenas de transmissão e recepção: 30 m.
- Largura do feixe (Gaussiano) de 3 dB na transmissão: 13° .
- Polarização: horizontal.
- Condutividade do solo: 5 S/m.
- Permissividade relativa do solo: 75.

5.2.1 Sondagem do Dia 15/01/2009

A figura 5.4 mostra o traçado de raios em um ambiente caracterizado pelos resultados da sondagem do dia 15/01/2009. Observa-se que, entre o solo e aproximadamente 60 m de altura há uma região de duto, onde $\nabla M \approx -61$ unidade-M/km. Entre 60 m e 150 m de altura, há uma região de sub-refração, onde $\nabla M \approx 163$ unidade-M/km. Os raios foram traçados de uma antena transmissora localizada dentro do duto, permitindo comunicação além de 45 km de distância, limite para a visada direta em um enlace com antenas a 30 m de altura. Este limite foi e será sempre determinado por intermédio da expressão $d_{LOS} = (2a_e)^{1/2}(h_t^{1/2} + h_r^{1/2})$ [20].

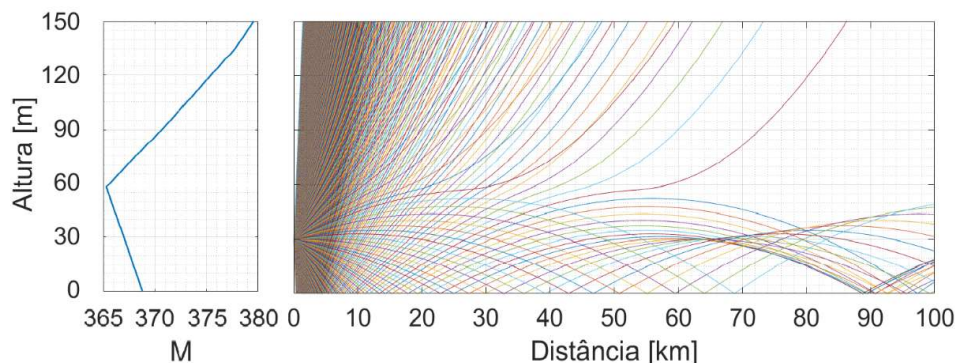


Figura 5.4: Traçado de raios para o perfil vertical da refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 15/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.

Adicionalmente, a figura 5.4 apresenta regiões de interferência, cujos ponto de observação são atingidos por dois ou mais raios, assim como regiões de sombra, não atingidas pelos raios ou cujos raios são relativamente afastados. No segundo caso, a eq. (2.50) mostra que, se a diferença $\delta\theta_0$ entre as elevações consecutivas de dois raios permanece constante e a diferença δh entre suas alturas em torno de um ponto de observação é grande, a razão $\delta h/\delta\theta_0$ será grande e a amplitude do campo pequena.

Os resultados da perda de propagação podem ser vistos na figura 5.5. Assim como as que se seguem, esta figura representa a perda de espaço livre *FSL*, determinada pelos três primeiros termos da eq. (2.81), pela curva verde tracejada. Adicionalmente, combina este termo com a atenuação adicional devida à difração pela curvatura da Terra, determinada pela formulação de [20], na curva preta tracejada. A interseção das duas curvas tracejadas indica o limiar de visibilidade entre as antenas transmissora e receptora. Conforme antecipado na discussão da eq. (2.50), nota-se que, onde há a formação de cáusticas, em torno de 63 km de distância, há uma instabilidade nos valores da perda de propagação fornecidos pelo traçado de raios. Neste mesmo ponto, observa-se que, quando a frequência de operação é de 3 GHz, os resultados do *software* AREPS tendem a se aproximar dos resultados do modelo de traçado de raios, o que não acontece para a frequência de 1 GHz. Apesar das instabilidades identificadas, observa-se que tanto o *software* AREPS quanto o modelo de traçado de raios preveem perdas de propagação ligeiramente inferiores às de espaço livre mesmo na ausência de visibilidade entre as antenas transmissora e receptora.

Uma diferença fundamental entre o *software* AREPS e o modelo de traçado de raios deve ser ressaltada. O primeiro simula a propagação eletromagnética por intermédio de solução numérica de Equação Parabólica. Esta solução determina o campo elétrico em todos os pontos de observação situados em uma grade uniforme (em altura) de pontos de observação situados à mesma distância horizontal ao transmissor. Todos os valores dos campos nos pontos de uma grade são determinados a partir daqueles de uma grade anterior, sendo a distância horizontal entre grades consecutivas mantida constante. Por outro lado, o segundo modelo utiliza inicialmente uma grade de raios cujas elevações no transmissor seguem a especificação da seção 2.5.1. Isto é, a diferença entre as elevações de raios

consecutivos da grade é mantida constante. Quando aplicável, de acordo com a mesma seção, os raios que atingem um ponto de observação especificado (que pode não estar contido na grade utilizada na solução numérica da Equação Parabólica) são determinados com grande precisão. Esta diferença entre os procedimentos pode explicar aquelas diferenças entre os picos de perdas de propagação observadas na região de interferência da figura 5.5 (distâncias inferiores a 8 km e 30 km para 1 GHz e 3 GHz, respectivamente), assim como nas suas semelhantes, que serão apresentadas a seguir.

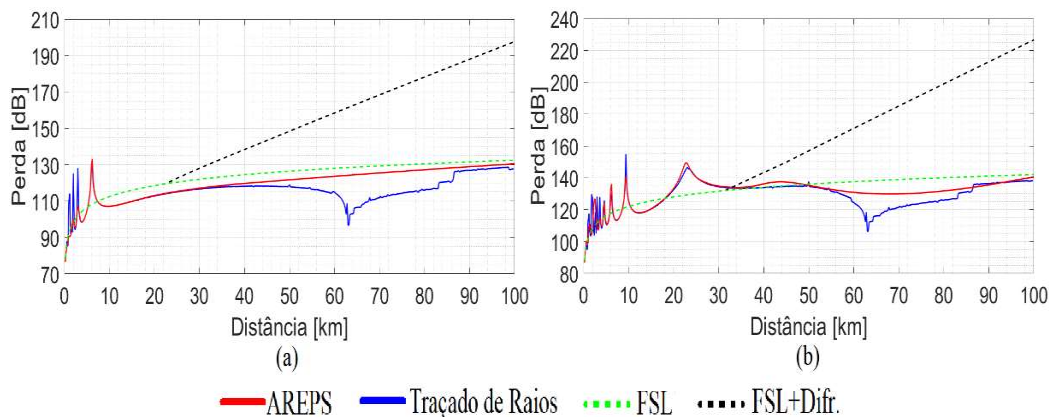


Figura 5.5: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 15/01/2009 para antenas a 30 m de altura:
(a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

5.2.2 Sondagem do Dia 16/01/2009

A figura 5.6 mostra o traçado de raios em um ambiente caracterizado pelos resultados da sondagem do dia 16/01/2009. Observa-se que entre o solo e aproximadamente 60 m de altura há uma região de super-refração, onde $\nabla M \approx 42$ unidade-M/km, e que entre 60 m e 150 m de altura há uma região de atmosfera normal, onde $\nabla M \approx 123$ unidade-M/km. Os raios foram traçados a partir de uma antena localizada dentro da região de super-refração, permitindo a determinação do campo até a distância de 70 km. Esta distância é maior que o limite para a visada direta em um enlace com antenas a 30 m de altura, igual a 45 km. Regiões de interferência ou sombra, análogas às caracterizadas na seção anterior, são observadas.

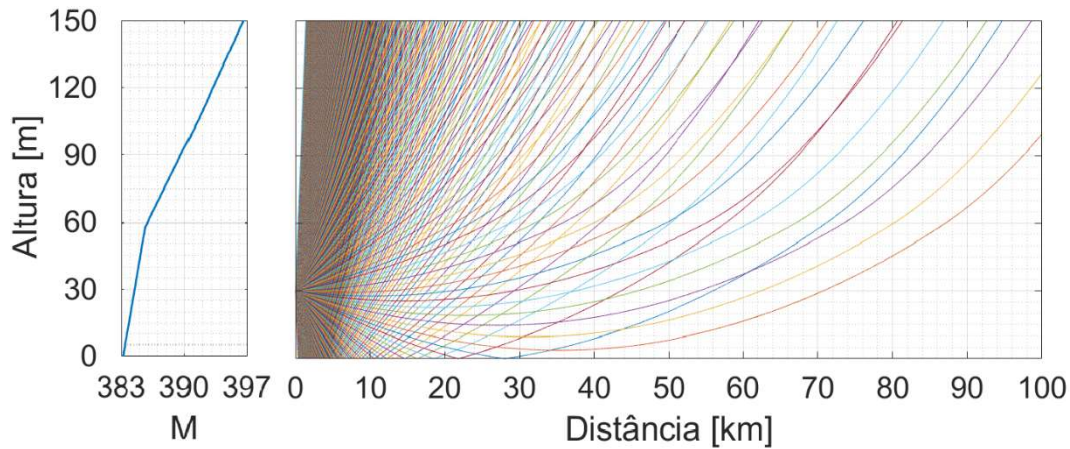


Figura 5.6: Traçado de raios para o perfil vertical de refração modificada $M(h)$ medido no dia 16/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.

Os resultados da perda de propagação podem ser vistos na figura 5.7. Nas frequências de 1 GHz e 3 GHz, os resultados do traçado de raios e do *software* AREPS apresentam boas concordâncias para distâncias inferiores a, aproximadamente, 55 km. Os dois modelos preveem perdas de propagação intermediárias entre as resultantes das formulações FSL e $FSL+Diff_r$ para pontos de observação situados àquela distância da antena transmissora. A perda de propagação fornecida pelo modelo de traçado de raios, entre as distâncias de aproximadamente 55 km e 70 km, é encontrada utilizando-se apenas a contribuição de 1 raio (raio direto). A falta do raio refletido neste intervalo de distância e a ausência dos efeitos de difração pela curvatura da Terra na formulação de traçado de raios ocasionam um afastamento entre os valores fornecidos pelo modelo de traçado de raios e pelo *software* AREPS. Por exemplo, na distância de 70 km, a diferença entre os resultados do *software* AREPS e do modelo de traçado de raios é de aproximadamente 10 dB em 1 GHz e 18 dB em 3 GHz.

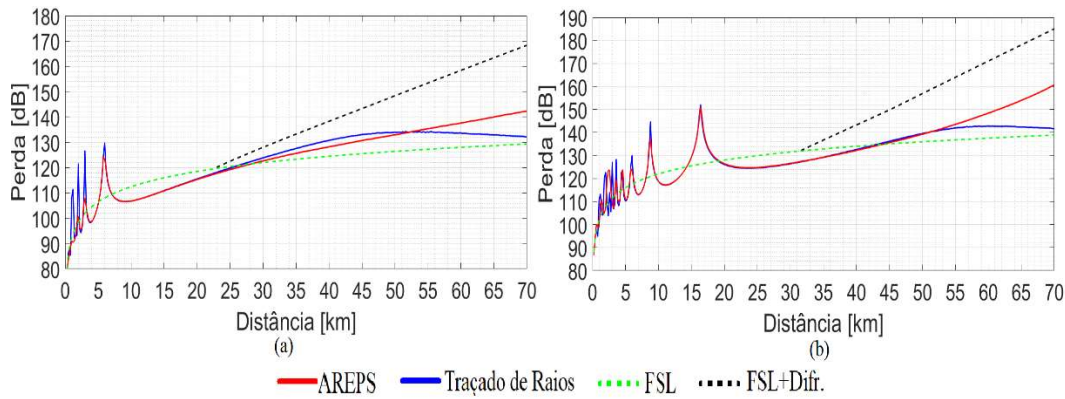


Figura 5.7: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 16/01/2009 para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

5.2.3 Sondagem do Dia 17/01/2009

A figura 5.8 mostra o traçado de raios em um ambiente caracterizado pelos resultados da sondagem do dia 17/01/2009. Observa-se que entre o solo e aproximadamente 65 m de altura há uma região de sub-refração, onde $\nabla M \approx 196$ unidade-M/km, e que entre 65 m e 150 m de altura há uma região de atmosfera normal, onde $\nabla M \approx 110$ unidade-M/km. Os raios foram traçados de uma antena transmissora localizada dentro da região de sub-refração, permitindo comunicação até 35 km. Esta distância é menor que aquela onde há visada direta, de 45 km para um enlace com antenas a 30 m de altura. Observam-se, mais uma vez, regiões de interferência e de sombra.

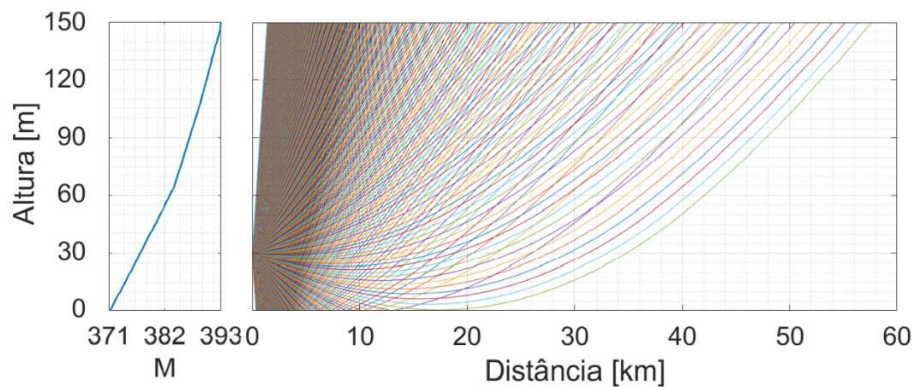


Figura 5.8: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 17/01/2009, com antena transmissora a

30 m de altura.

Os resultados da perda de propagação podem ser vistos na figura 5.9. Na frequência de 1 GHz, os resultados do modelo de traçado de raios e do *software* AREPS coincidem para distâncias entre, aproximadamente, 1 km e 25 km. Na frequência de 3 GHz, os resultados coincidem para distâncias entre aproximadamente 4 km e 28 km. A perda de propagação do modelo de traçado de raios, entre as distâncias de aproximadamente 26 km e 35 km, é encontrada utilizando-se apenas a contribuição de 1 raio (raio direto). A falta do raio refletido neste intervalo de distância e a ausência dos efeitos de difração pela curvatura da Terra na formulação de traçado de raios ocasionam um afastamento entre os valores fornecidos pelo modelo de traçado de raios e pelo *software* AREPS, na frequência de 1 GHz. Em 3 GHz, o afastamento entre resultados começa a ocorrer a partir de 28 km de distância. Na distância de 35 km, a diferença entre os resultados fornecidos pelo *software* AREPS e pelo modelo de traçado de raios é de aproximadamente 15 dB nas duas frequências. Observa-se, ainda, que as perdas de propagação previstas pelos dois modelos, inicialmente inferiores às de espaço livre, tornam-se maiores que as resultantes da formulação *FSL+Diffr.* A transição entre os dois regimes ocorre nas distâncias de 17 km e 25 km, para as frequências de 1 GHz e 3 GHz, respectivamente.

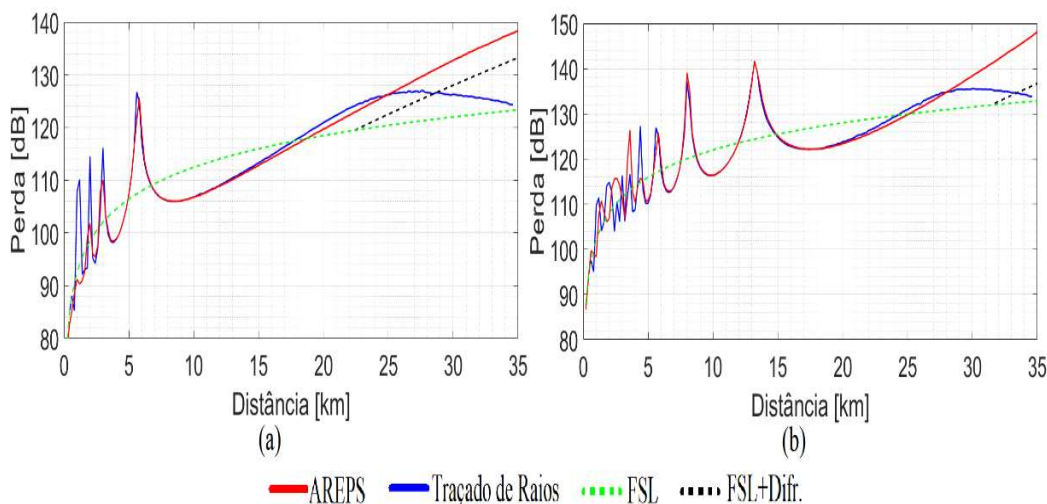


Figura 5.9: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 17/01/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

5.2.4 Sondagem do Dia 19/01/2009

A figura 5.10 mostra o traçado de raios em um ambiente caracterizado pelos resultados da sondagem do dia 19/01/2009. Observa-se que, entre o solo e aproximadamente 70 m de altura, há uma região de sub-refração, onde $\nabla M \approx 244$ unidade-M/km, e que, entre 70 m e 150 m de altura, há uma região de atmosfera normal, onde $\nabla M \approx 104$ unidade-M/km. Os raios foram traçados de uma antena transmissora localizada dentro da região de sub-refração, permitindo comunicação até 31 km. Esta distância é menor que aquela onde há visada direta, de 45 km para um enlace com antenas a 30 m de altura.

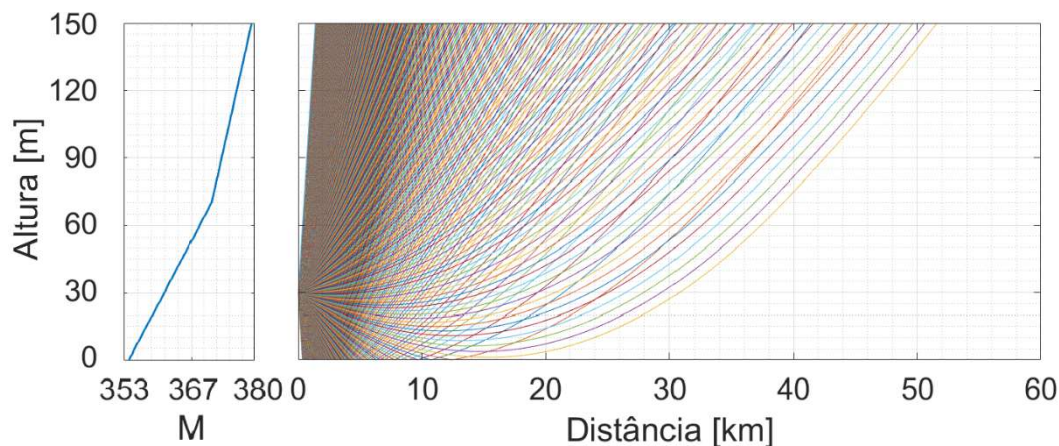


Figura 5.10: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 19/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.

Os resultados da perda de propagação podem ser vistos na figura 5.11. Na frequência de 1 GHz, os resultados do modelo de traçado de raios e do *software* AREPS coincidem para distâncias entre aproximadamente 1 km e 22 km. Na frequência de 3 GHz, os resultados coincidem para distâncias entre aproximadamente 4 km e 27 km. A perda de propagação do traçado de raios, entre as distâncias de aproximadamente 25 km e 30 km, é encontrada utilizando-se apenas a contribuição de 1 raio (raio direto). A falta do raio refletido neste intervalo de distância e a ausência dos efeitos de difração pela curvatura da Terra na formulação de traçado de raios ocasionam um afastamento entre os valores

fornechos pelo modelo de traçado de raios e pelo *software* AREPS, na frequência de 3 GHz. Em 1 GHz o afastamento ocorre a partir de 23 km de distância. Na distância de 30 km, a diferença entre o *software* AREPS e o traçado de raios é de aproximadamente 14 dB em 1 GHz e 12 dB em 3 GHz.

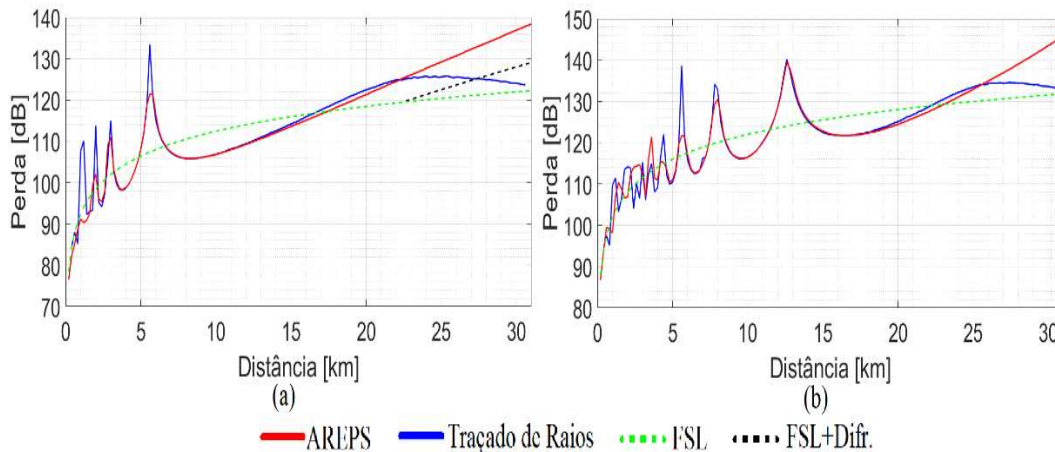


Figura 5.11: Perda de propagação para o perfil vertical de refração modificada $M(h)$ medido no dia 19/01/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

5.2.5 Sondagem do Dia 24/01/2009

A figura 5.12 mostra o traçado de raios em um ambiente caracterizado pelos resultados da sondagem do dia 24/01/2009. Observa-se que, entre o solo e aproximadamente 13 m de altura, há uma região de duto, onde $\nabla M \approx -1630$ unidade-M/km, e que, entre 13 m e 73 m de altura, há uma região de atmosfera normal, onde $\nabla M \approx 121$ unidade-M/km. Os raios foram traçados de uma antena transmissora localizada dentro da região de atmosfera normal. Entretanto, a presença de um duto de 10 m de altura permite comunicação somente até 34 km. Esta distância é menor que o limiar para a visada direta, de 45 km para um enlace com antenas a 30 m de altura. Os efeitos do intenso gradiente no perfil vertical da refração modificada $M(h)$ nos desvios das direções dos raios que se refletem na interface são claramente observados na figura 5.12.

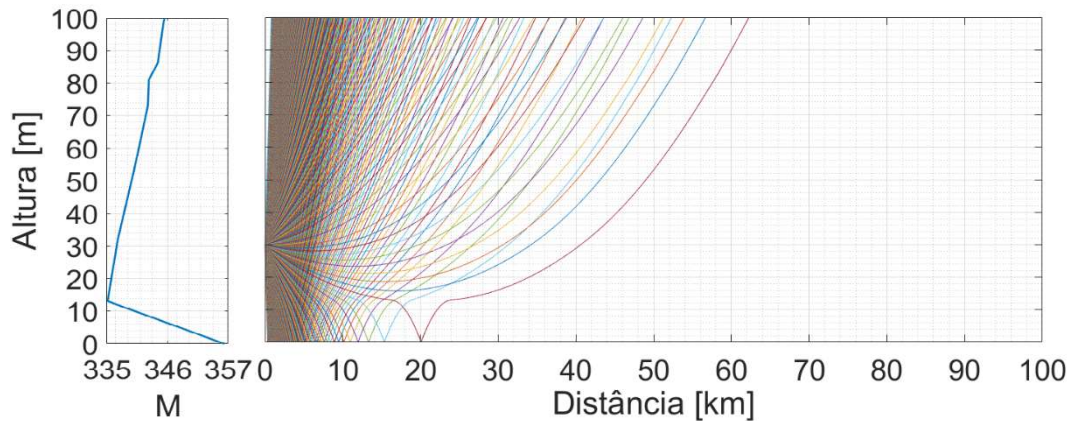


Figura 5.12: Traçado de raios para o perfil vertical de refração modificada $M(h)$ medido no dia 24/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.

Os resultados da perda de propagação podem ser vistos na figura 5.13. Na frequência de 1 GHz, os resultados do modelo de traçado de raios e do *software* AREPS coincidem para distâncias entre aproximadamente 1 km e 13 km. Na frequência de 3 GHz, os resultados coincidem para distâncias entre aproximadamente 4 km e 25 km. A perda de propagação do traçado de raios, entre as distâncias de aproximadamente 37,5 km e 40 km, é encontrada utilizando-se apenas a contribuição de 1 raio (raio refletido). A falta do raio direto neste intervalo de distância ocasiona uma grande variação na amplitude (aproximadamente 18 dB), tanto na frequência de 1 GHz quanto em 3 GHz.

Observa-se também uma grande instabilidade nos resultados correspondentes ao modelo de traçado de raios da figura 5.13., que pode ser minimizada, para as distâncias entre 0 km e 33 km, utilizando-se apenas os raios lançados inicialmente, sem a realização de bisseções, como mostra a figura 5.14. Esta instabilidade, ocasionada pela grande variação da relação $\delta h / \delta \theta_0$ da eq. (2.79) para os raios refletidos no solo, ao longo do percurso, piora à medida que $\delta \theta_0$ diminui.

Na figura 5.14(a), observa-se, ainda, uma diferença entre os resultados dos dois modelos para a frequência de 1 GHz. Enquanto o modelo de traçado de raios prevê perdas de propagação sempre inferiores às de espaço livre, o *software* AREPS prevê uma transição deste regime para o de perdas de propagação intermediárias entre as curvas FSL e $FSL + Diff_r$. Por outro lado, para a frequência de 3 GHz, os dois modelos concordam com uma transição do regime de perdas de propagação

inferiores às de espaço livre para outro em que as perdas excedem as previstas pela curva $FSL+Diff$, como indica a figura 5.14(b).

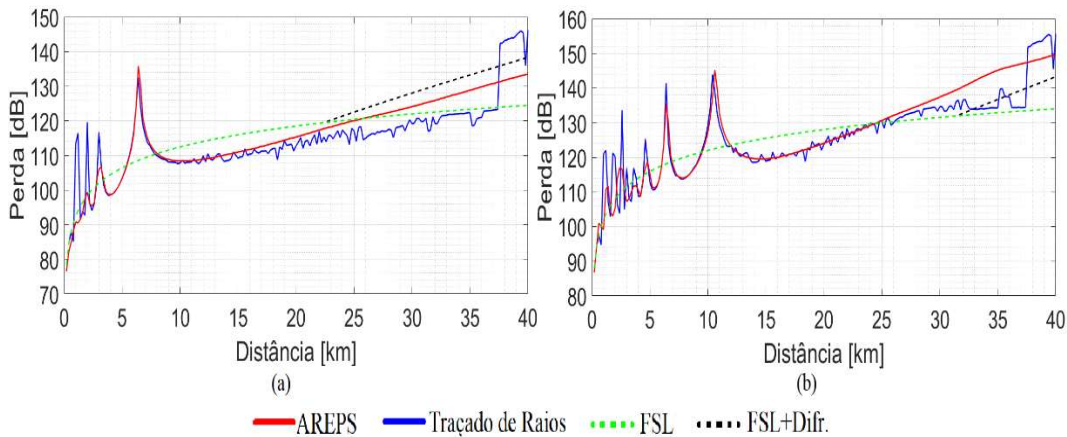


Figura 5.13: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 24/01/2009 para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

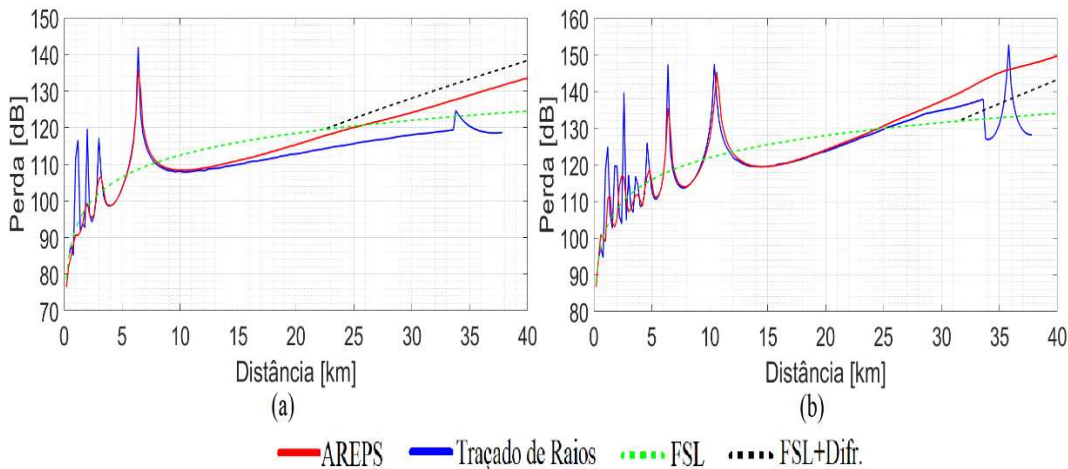


Figura 5.14: Perda de propagação, sem utilizar a bisseção, para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 24/01/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

5.2.6 Sondagem do Dia 25/01/2009

A figura 5.15 mostra o traçado de raios em um ambiente caracterizado pelos resultados da sondagem do dia 25/01/2009. Observa-se que, entre o solo e

aproximadamente 77 m de altura, há uma região de atmosfera normal, onde $\nabla M \approx 138$ unidade-M/km, e que, entre 77 m e 150 m de altura, há uma região de super-refração, onde $\nabla M \approx 62$ unidade-M/km. Os raios foram traçados de uma antena transmissora localizada dentro da região de atmosfera normal, permitindo comunicação até aproximadamente 40 km. Esta distância é menor que o limiar para visada direta, de 45 km para um enlace com antenas a 30 m de altura.

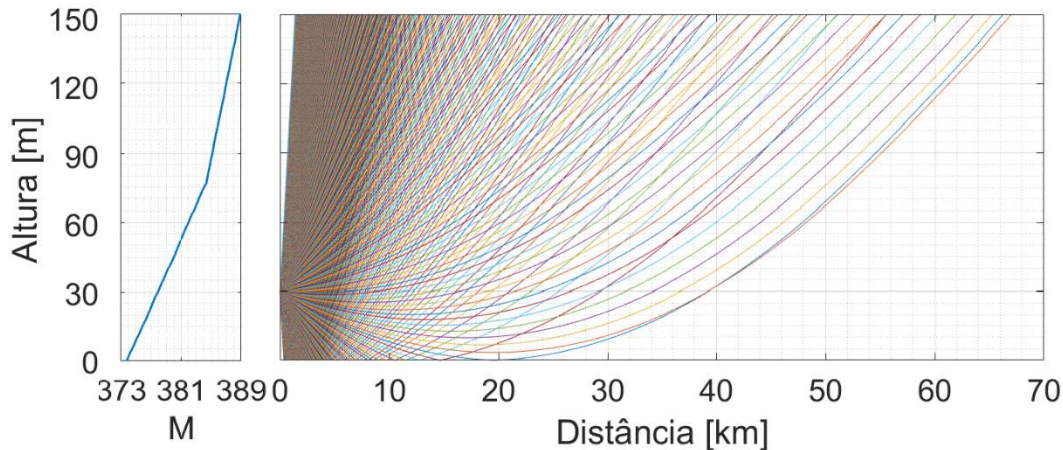


Figura 5.15: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 25/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.

Os resultados da perda de propagação podem ser vistos na figura 5.16. Nas frequências de 1 GHz e 3 GHz, os resultados do traçado de raios e do *software* AREPS apresentam boas concordâncias para distâncias inferiores a 28 km e 33 km, respectivamente. A perda de propagação do modelo de traçado de raios, entre as distâncias de aproximadamente 29 km e 40 km, é encontrada utilizando-se apenas a contribuição de 1 raio (raio direto). A falta do raio refletido neste intervalo de distância ocasiona um afastamento entre os valores previstos pelos dois modelos, na frequência de 1 GHz. Em 3 GHz, o afastamento ocorre a partir de 33 km de distância. Na distância de 39 km, a diferença entre os resultados previstos pelo *software* AREPS e pelo modelo de traçado de raios é de aproximadamente 12 dB em 1 GHz e 9 dB em 3 GHz.

Apesar das diferenças entre as nomenclaturas (sub-refração, refração normal e super-refração) aplicáveis aos perfis verticais de refratividade $M(h)$ discutidos nas seções 5.2.3, 5.2.4 e na presente, os resultados observados nas figuras

correspondentes são qualitativamente semelhantes. Portanto, os presentes resultados não serão discutidos mais detalhadamente.

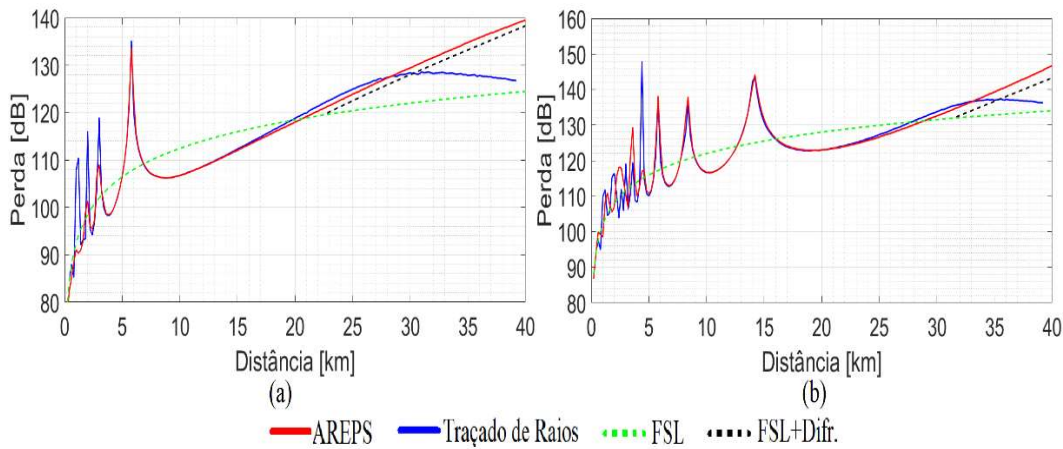


Figura 5.16: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 25/01/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

5.2.7 Sondagem do Dia 27/01/2009

A figura 5.17 mostra o traçado de raios em um ambiente caracterizado pelos resultados da sondagem do dia 27/01/2009. Observa-se que, entre o solo e aproximadamente 77 m de altura, há uma região de atmosfera normal, onde $\nabla M \approx 135$ unidade-M/km, e que, entre 77 m e 136 m de altura, há uma região de super-refração, onde $\nabla M \approx 60$ unidade-M/km. Os raios foram traçados de uma antena transmissora localizada dentro da região de atmosfera normal, permitindo comunicação até aproximadamente 40 km. Esta distância é menor que o limiar para visada direta, igual a 45 km para um enlace com antenas a 30 m de altura.

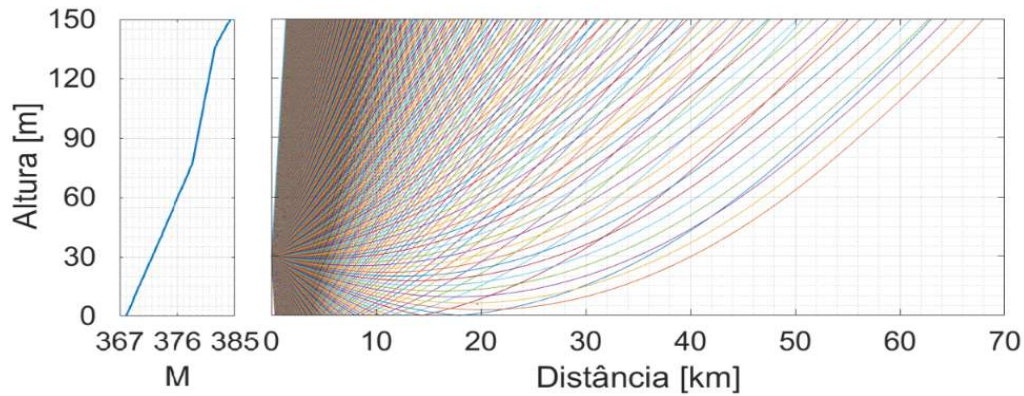


Figura 5.17: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 27/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.

Os resultados da perda de propagação podem ser vistos na figura 5.18. Nas frequências de 1 GHz e 3 GHz, os resultados do traçado de raios e do *software* AREPS apresentam boas concordâncias para distâncias inferiores a 32 km e 35 km, respectivamente. A perda de propagação do traçado de raios, entre as distâncias de aproximadamente 29 km e 40 km, é encontrada utilizando-se apenas a contribuição de 1 raio (raio direto). A falta do raio refletido neste intervalo de distância ocasiona um afastamento entre os valores previstos pelo modelo de traçado de raios e pelo *software* AREPS, na frequência de 1 GHz. Em 3 GHz, o afastamento ocorre a partir de 33 km de distância. Na distância de 39 km, a diferença entre as previsões do *software* AREPS e do modelo de traçado de raios é de aproximadamente 12 dB em 1 GHz e 9 dB em 3 GHz.

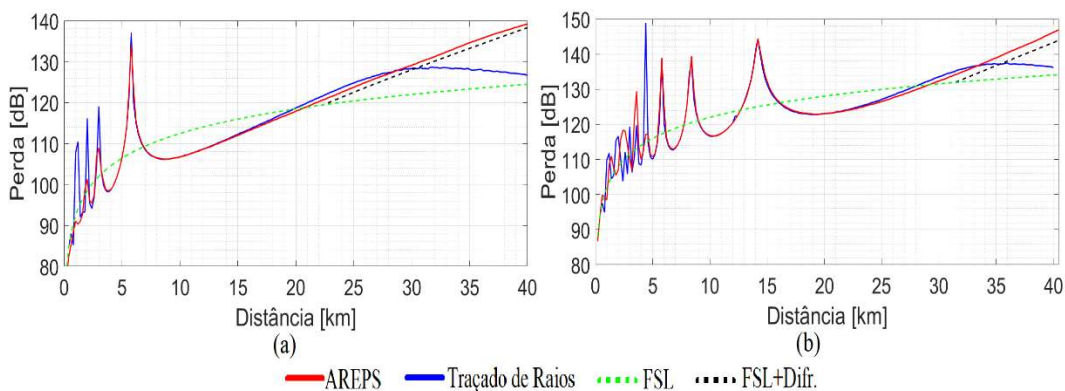


Figura 5.18: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 27/01/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

Mais uma vez, apesar das diferenças entre as nomenclaturas (sub-refração, refração normal e super-refração) aplicáveis aos perfis verticais de refratividade $M(h)$ discutidos nas seções 5.2.3, 5.2.4, 5.2.6 e na presente, os resultados observados nas figuras correspondentes são qualitativamente semelhantes. Portanto, os presentes resultados também não serão discutidos mais detalhadamente.

5.2.8 Sondagem do Dia 31/01/2009

A figura 5.19 mostra o traçado de raios em um ambiente caracterizado pelos resultados da sondagem do dia 31/01/2009. Observa-se que, entre o solo e aproximadamente 135 m de altura, há uma região de duto de superfície, caracterizada pelos gradientes da refratividade modificada $\nabla M \approx -45$ unidade-M/km até 60 m de altura e $\nabla M \approx -216$ unidade-M/km entre 60 m e 135 m de altura. Os raios foram traçados a partir de uma antena transmissora localizada dentro do duto, permitindo comunicação além de 45 km de distância, limiar para visada direta de um enlace com antenas a 30 m de altura.

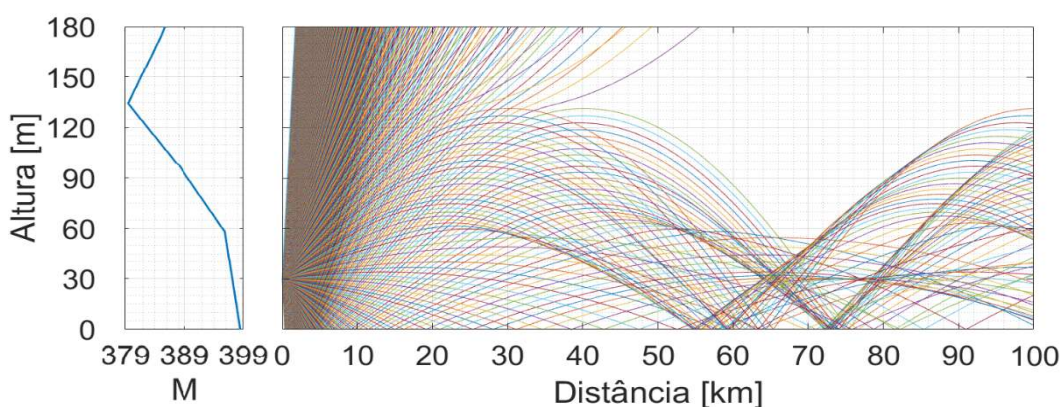


Figura 5.19: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 31/01/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.

Os resultados da perda de propagação podem ser vistos na figura 5.20. Nota-se que, onde há a formação de cáusticas, em torno de 45 km de distância, há também

uma instabilidade nos valores da perda de propagação fornecidos pelo modelo de traçado de raios. Neste mesmo ponto, observa-se que quando a frequência de operação é de 3 GHz, os resultados do *software* AREPS tendem a se aproximar dos resultados do modelo de traçado de raios, o que não acontece para a frequência de 1 GHz.

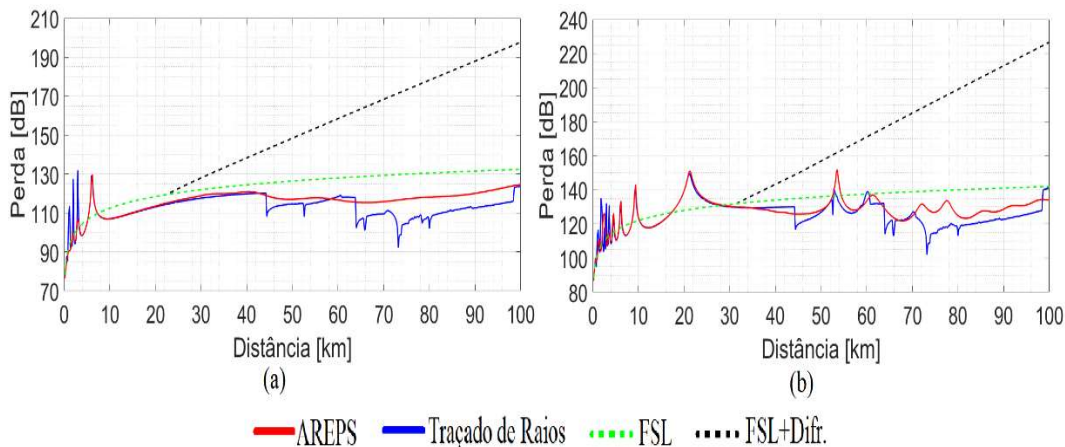


Figura 5.20: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 31/01/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

5.2.9 Sondagem do Dia 01/02/2009

A figura 5.21 mostra o traçado de raios em um ambiente caracterizado pelos resultados da sondagem do dia 01/02/2009. Observa-se que, entre o solo e aproximadamente 134 m de altura, há uma região de duto de superfície, caracterizada pelos gradientes da refratividade modificada $\nabla M \approx -33$ unidade-M/km até 60 m de altura, $\nabla M \approx -169$ unidade-M/km entre 60 m e 100 m de altura e $\nabla M \approx -268$ unidade-M/km entre 100 m e 134 m de altura. A região compreendida entre 134 m e 180 m é classificada como padrão, e não interfere nos resultados do enlace de interesse. Os raios foram traçados a partir de uma antena transmissora localizada dentro do duto, permitindo comunicação além de 45 km de distância, limiar para visada direta de um enlace com antenas a 30 m de altura.

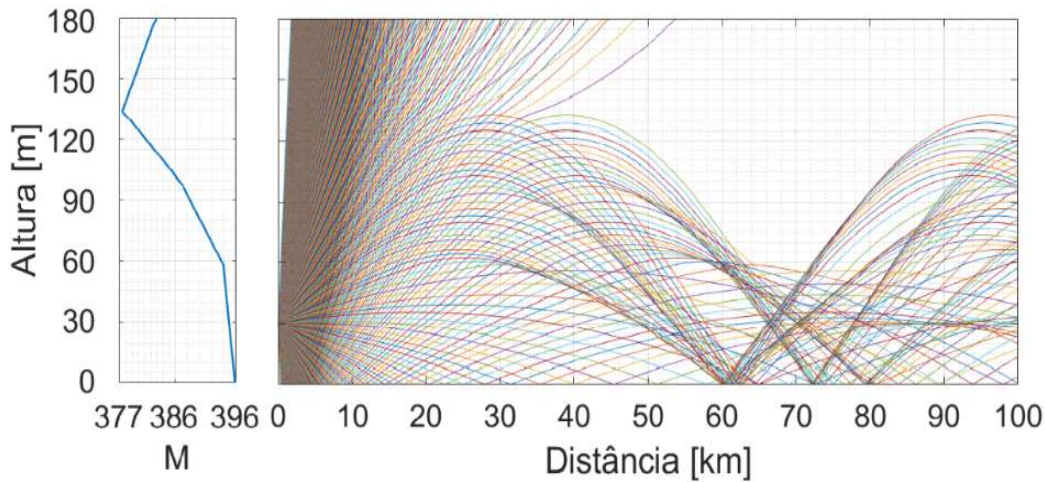


Figura 5.21: Traçado de raios para o perfil vertical de refração modificada $M(h)$ medido no dia 01/02/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.

Os resultados da perda de propagação podem ser vistos na figura 5.22. Nota-se que onde há a formação de cóusticas, em torno de 48 km de distância, há uma instabilidade nos valores da perda fornecidos pelo traçado de raios. Neste mesmo ponto, observa-se que, quando a frequência de operação é 3 GHz, os resultados do *software* AREPS tendem a se aproximar daqueles do modelo de traçado de raios, o que não acontece para a frequência de 1 GHz.

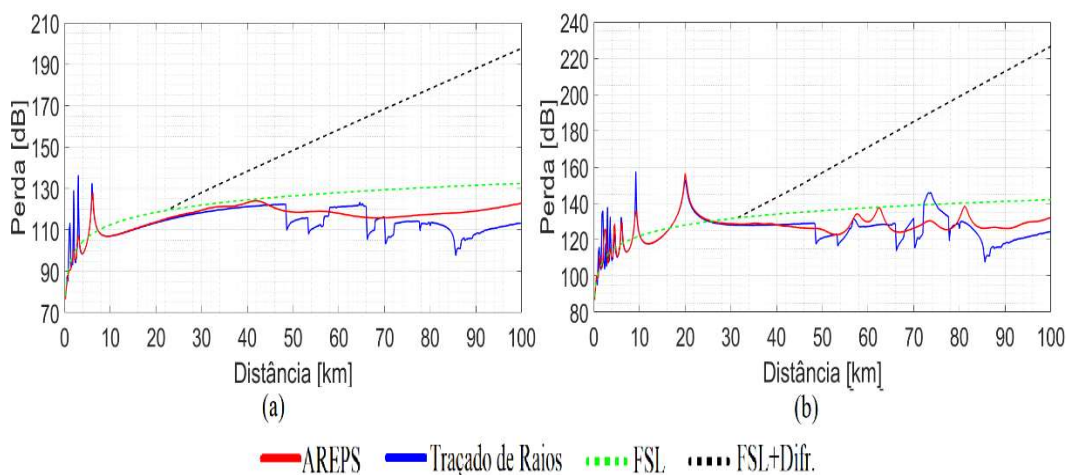


Figura 5.22: Perda de propagação para o perfil vertical de refração modificada $M(h)$ medido no dia 01/02/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

Apesar das diferenças entre aos valores dos gradientes do perfil vertical da refratividade modificada $M(h)$ apresentados na seção imediatamente anterior e na presente, os resultados observados nas figuras correspondentes são qualitativamente semelhantes. Portanto, os presentes resultados não serão discutidos mais detalhadamente.

5.2.10 Sondagem do Dia 02/02/2009

A figura 5.23 mostra o traçado de raios em um ambiente caracterizado pelos resultados da sondagem do dia 02/02/2009. Observa-se que, entre o solo e aproximadamente 77 m de altura, há uma região de duto, onde $\nabla M \approx -38$ unidade-M/km, e que entre 77 m e 135 m de altura há uma região de sub-refração, onde $\nabla M \approx 185$ unidade-M/km. A região compreendida entre 135 m e 150 m de altura é classificada como padrão e não interfere nos resultados do enlace de interesse. Os raios foram traçados a partir de uma antena transmissora localizada dentro do duto, permitindo comunicação além de 45 km de distância, limiar para visada direta de um enlace com antenas a 30 m de altura.

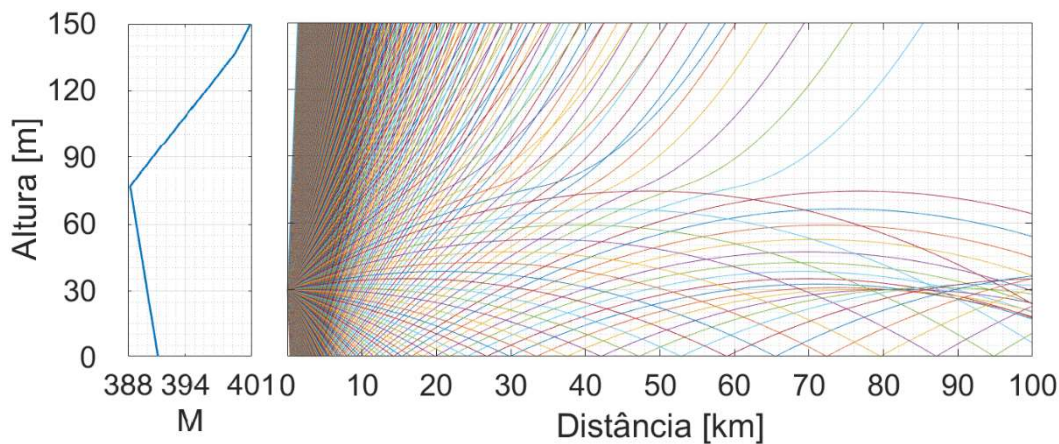


Figura 5.23: Traçado de raios para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 02/02/2009, com antena transmissora a 30 m de altura.

Os resultados da perda de propagação podem ser vistos na figura 5.24. Nota-se que, onde há a formação de cáusticas, em torno de 80 km de distância, há uma instabilidade nos valores da perda fornecidos pelo modelo de traçado de raios.

Próximo a este ponto, observa-se que, quando a frequência de operação é de 3 GHz, os resultados do *software* AREPS apresenta uma discreta oscilação, o que não acontece para a frequência de 1 GHz.

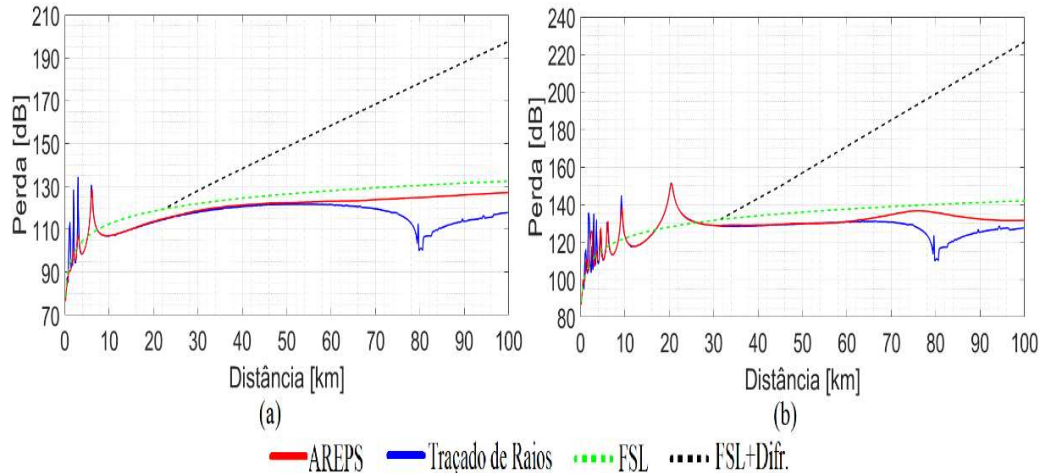


Figura 5.24: Perda de propagação para o perfil vertical de refratividade modificada $M(h)$ medido no dia 02/02/2009, para antenas a 30 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

É importante ressaltar que, de acordo com as três últimas seções, tanto o *software* AREPS quanto o modelo de traçado de raios (apesar das instabilidades observadas) preveem perdas de propagação substancialmente inferiores às de espaço livre, mesmo para pontos de observação que, em condições de referência, estariam situados profundamente na região de difração devida à curvatura da Terra. Os efeitos dos dutos sobre a intensidade do sinal recebido podem ser estimados pelas diferenças entre os valores fornecidos pelas curvas referentes aos dois modelos e à formulação $FSL+Diffr.$

5.3 Mapas Resultantes de Cenários Hipotéticos

A seguir, serão considerados cenários hipotéticos de ambientes com perfil vertical de terreno e duto de evaporação.

5.3.1 Perfil Vertical de Terreno em Ambiente de Atmosfera Padrão

A figura 5.25 mostra os traçados de raios na presença de atmosfera padrão com $\nabla M = 118$ unidade-M/km e de perfil vertical de terreno triangular com 20 m de altura. As seguintes configurações foram utilizadas para os traçados de raios, sendo os resultados do cálculo da perda de propagação apresentados na figura 5.26:

- Frequência: 1 GHz.
- Raios lançados:
 - (a) 500 entre -4° e 4° de elevação com a horizontal.
 - (b) 30 entre $-0,05^\circ$ e 0° de elevação com a horizontal.
- Altura das antenas de transmissão e recepção: 20 m.
- Largura do feixe (Gaussiano) de 3 dB na transmissão: 13° .
- Polarização: horizontal.
- Condutividade do solo: 0,001 S/m.
- Permissividade relativa do solo: 75.

Observa-se que o traçado de raios não considerou os efeitos da difração devida ao vértice do obstáculo triangular, ocasionando uma região de sombra após o 10 km de distância.

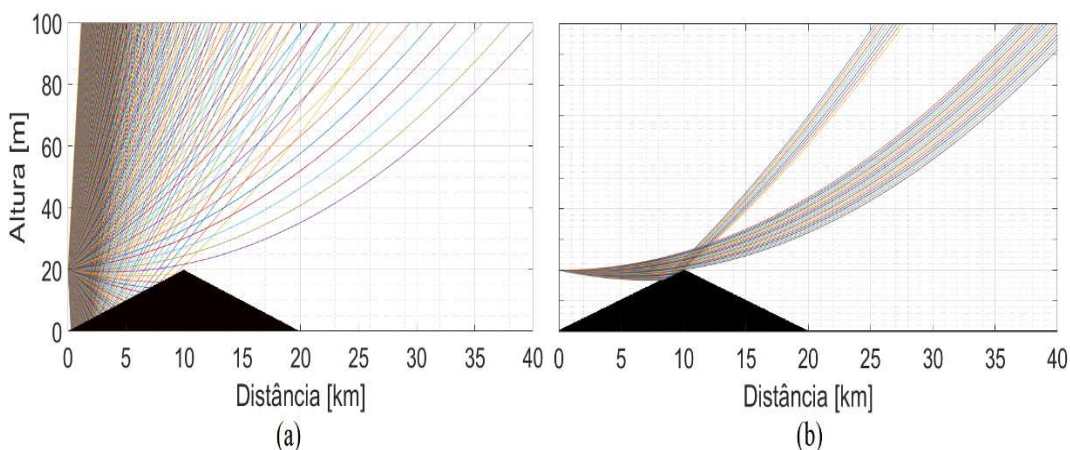


Figura 5.25: Traçado de raios para uma atmosfera padrão, com perfil vertical de terreno e antena transmissora a 20 m de altura: (a) 500 raios entre -4° e 4° e (b) 30 raios entre $-0,05^\circ$ e 0° .

Observando os resultados apresentados na figura 5.26a, nota-se uma dificuldade da técnica de traçado de raios na obtenção da perda de propagação entre as distâncias de 9,4 km e 10 km. Esta dificuldade foi minimizada após o lançamento de raios que atingissem apenas a zona de interesse, aproximadamente entre 9 km e 10 km, com espaçamento entre raios menor. Desta forma foi possível calcular a perda de propagação utilizando a contribuição dos 2 raios (direto e refletido) em regiões bem próximas ao vértice do obstáculo triangular. A figura 5.26b apresenta a combinação do cálculo da perda de propagação dos 2 lançamentos de raios observados na figura 5.25.

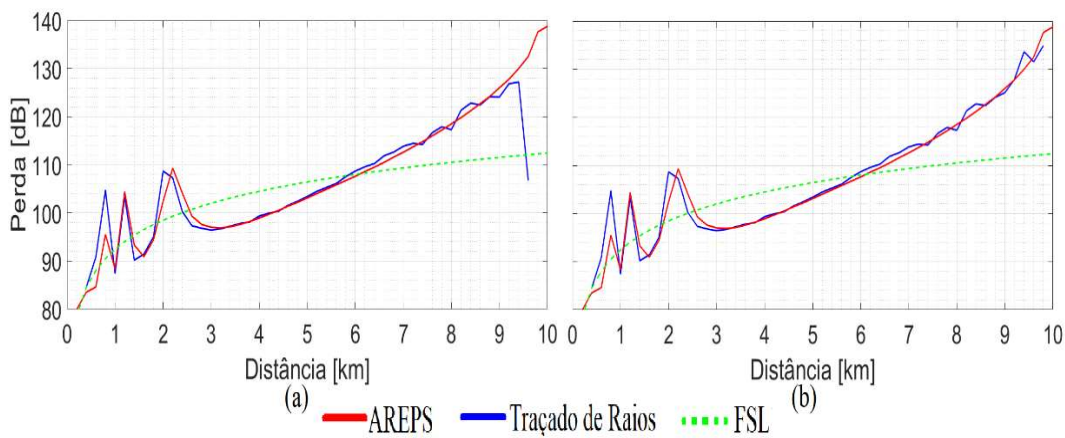


Figura 5.26: Perda de propagação para uma atmosfera padrão com perfil vertical do terreno, antenas a 20 m de altura e frequência de 1 GHz: (a) configuração com 500 raios e (b) combinação das configurações de 500 e 30 raios.

5.3.2 Duto de Evaporação

A seguir, serão apresentadas simulações de traçado de raios e resultados do cálculo da perda de propagação em um ambiente onde ocorre um duto de evaporação de 20 m de altura, sendo o perfil vertical da refratividade modificada $M(h)$ gerado a partir da eq. (4.16).

5.3.2.1 Antena Transmissora Acima do Duto

A figura 5.27 mostra o traçado de raios para a antena transmissora localizada acima do duto e a figura 5.28 mostra os resultados do cálculo da perda de propagação, utilizando-se as configurações abaixo:

- Frequência: 1 GHz e 3 GHz.
- Raios lançados: 1000 entre -5° e 5° de elevação com a horizontal.
- Altura das antenas de transmissão e recepção: 35 m.
- Largura do feixe (Gaussiano) de 3 dB na transmissão: 13° .
- Polarização: horizontal.
- Condutividade do solo: 5 S/m.
- Permissividade relativa do solo: 75.

É possível visualizar raios até, aproximadamente, 82 km de distância. Esta distância é maior que o limiar de visada direta, aproximadamente igual a 49 km para um enlace com antenas a 35 m de altura.

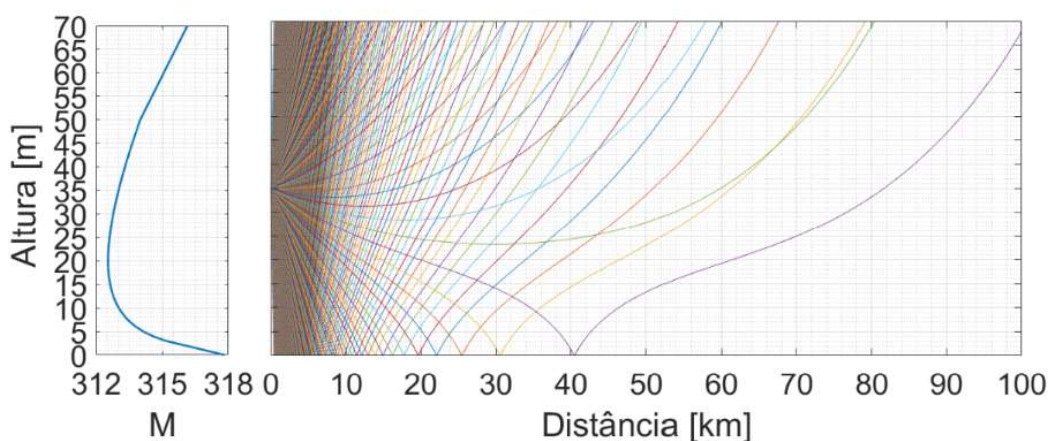


Figura 5.27: Traçado de raios para uma atmosfera com duto de evaporação de 20 m e antena transmissora a 35 m de altura.

Observando os resultados apresentados na figura 5.28, nota-se que, na frequência de 1 GHz, os resultados do modelo de traçado de raios e do *software* AREPS coincidem para distâncias entre aproximadamente 1 km e 25 km. Na frequência de 3 GHz, os resultados coincidem para distâncias entre

aproximadamente 4 km e 80 km. Observa-se uma grande instabilidade nos resultados, que pode ser minimizada, para as distâncias entre 0 km e 60 km, utilizando-se apenas os raios lançados inicialmente, sem realização de bisseções, como mostra a figura 5.29. Esta instabilidade é ocasionada pela grande variação da relação $\delta h/\delta \theta_0$ da eq. (2.79) dos raios refletidos no solo, ao longo do percurso, e piora à medida que $\delta \theta_0$ diminui.

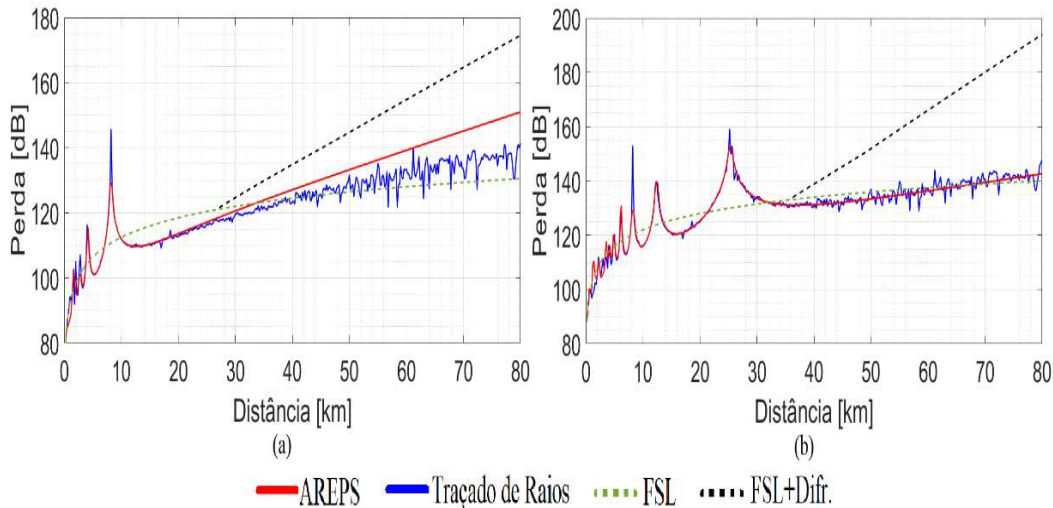


Figura 5.28: Perda de propagação para uma atmosfera com duto de evaporação de 20 m e antenas a 35 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

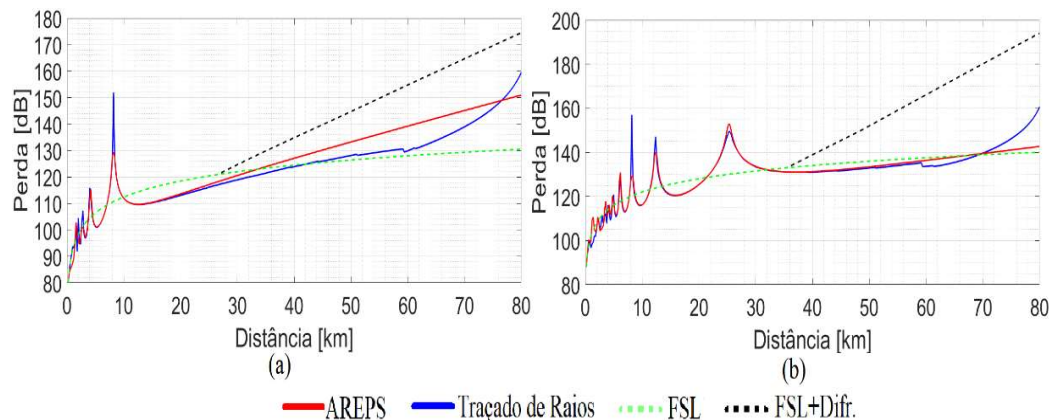


Figura 5.29: Perda de propagação, sem utilizar a bisseção, para uma atmosfera com duto de evaporação de 20 m e antenas a 35 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

A figura 5.29(a), mostra uma diferença entre as previsões dos dois modelos para a frequência de 1 GHz. Enquanto o modelo de traçado de raios prevê perdas de propagação sempre próximas às de espaço livre para distâncias inferiores a 60 km, o *software* AREPS prevê uma transição deste regime para o de perdas de propagação intermediárias entre as curvas *FSL* e *FSL+Diffraction*. Por outro lado, para a frequência de 3 GHz, os dois modelos concordam com um regime de perdas de propagação sempre próximas às de espaço livre para distâncias inferiores a 70 km, como indica a figura 5.29(b).

5.3.2.2 Antena Transmissora Dentro do Duto

A figura 5.30 mostra o traçado de raios para o caso em que a antena transmissora está localizada dentro do duto e a figura 5.31 mostra o resultado do cálculo da perda de propagação, utilizando-se as configurações abaixo:

- Frequência: 1 GHz e 3 GHz.
- Raios lançados: 1000 entre -5° e 5° de elevação com a horizontal.
- Altura das antenas de transmissão e recepção: 15 m.
- Largura do feixe (Gaussiano) de 3 dB na transmissão: 13° .
- Polarização: horizontal.
- Condutividade do solo: 5 S/m.
- Permissividade relativa do solo: 75.

É possível visualizar raios além da linha de visada, cujo limiar está situado a aproximadamente 32 km para um enlace com antenas a 15 m de altura.

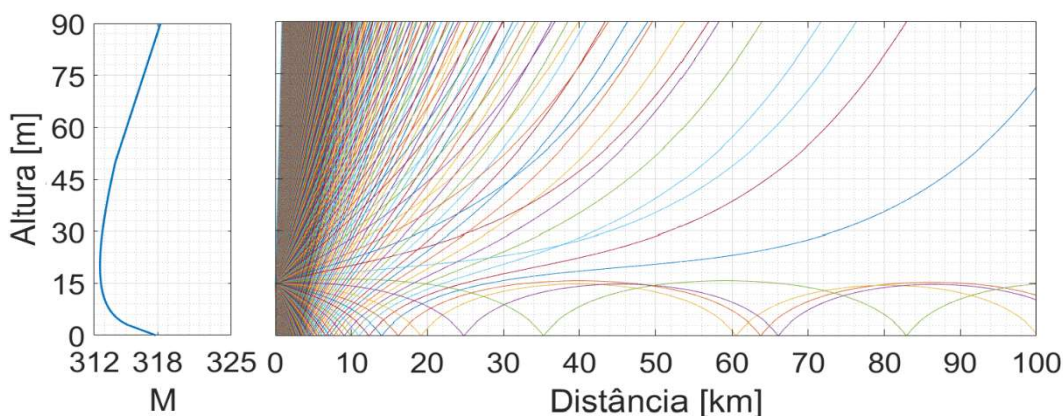


Figura 5.30: Traçado de raios para uma atmosfera com duto de evaporação de 20 m e antena a 15 m de altura.

Observando os resultados apresentados na figura 5.31, nota-se que, na frequência de 1 GHz, os resultados do modelo de traçado de raios e do *software* AREPS coincidem para distâncias entre aproximadamente 1 km e 10 km. Na frequência de 3 GHz, os resultados coincidem para distâncias entre aproximadamente 2 km e 20 km. Nota-se que, onde há a formação de cáusticas, a partir de aproximadamente 46 km de distância, há instabilidades nos valores da perda de propagação fornecidos pelo traçado de raios. Testes realizados mostraram que, quando os terminais se encontram no interior do duto, evitar a utilização da bisseção não é uma técnica eficiente para a mitigação dos efeitos das instabilidades no cálculo da relação $\delta h / \delta \theta_0$.

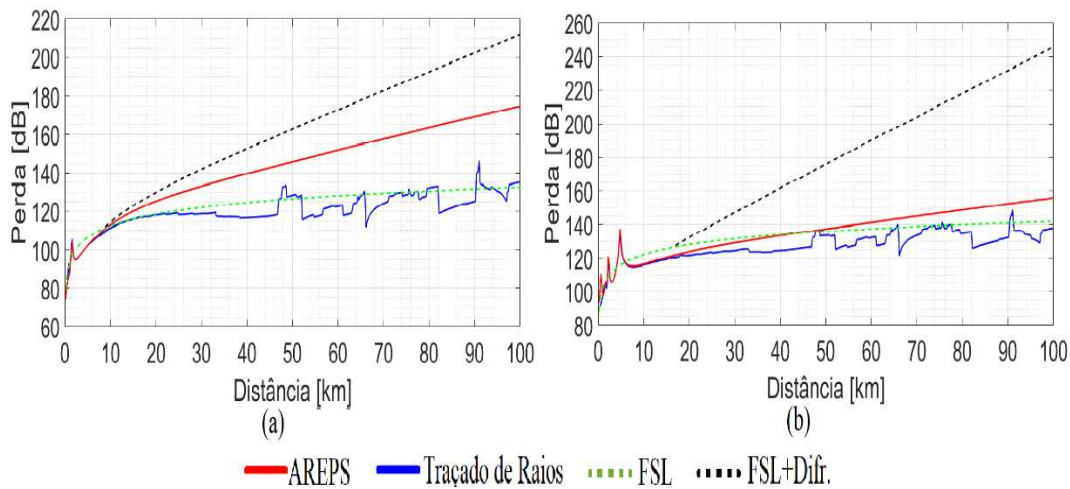


Figura 5.31: Perda de propagação para uma atmosfera com duto de evaporação de 20 m e antenas a 15 m de altura: (a) frequência = 1 GHz e (b) frequência = 3 GHz.

Os comentários apresentados no último parágrafo da seção anterior também se aplicam aos presentes resultados.

6 CONCLUSÃO

Este capítulo é dividido em duas seções. Na primeira, são apresentadas as contribuições da pesquisa realizada pelo autor, com uma breve análise dos resultados encontrados. Na segunda, são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros que possam dar continuidade às presentes contribuições.

6.1 Contribuições da Pesquisa

Um dos objetivos da presente dissertação foi o desenvolvimento de um modelo de traçado de raios em meios onde o perfil vertical seccionalmente linear da refratividade modificada $M(h)$ pode variar ao longo de um percurso. Normalmente as ferramentas que utilizam o método de traçado de raios consideram o perfil vertical de $M(h)$ invariantes ao longo do percurso [22]. Os resultados das simulações realizadas por intermédio deste modelo mostraram, para longas distâncias, grandes diferenças entre a propagação eletromagnética nestes meios e em outros (simplificados) nos quais o gradiente ∇M é constante em todo o percurso. Sendo o ambiente marítimo brasileiro o de maior interesse deste trabalho, foram realizadas estimativas de alturas de dutos de evaporação utilizando-se dados registrados por boias oceanográficas posicionadas na costa brasileira, pertencentes ao PNBOIA, aplicados ao modelo de Paulus-Jeske [7]. Alguns dados fornecidos foram descartados por serem considerados fisicamente improváveis. Como pode ser visto em [23], falhas técnicas podem ocorrer tanto nas medições feitas pelos sensores, quanto na transmissão dos dados, e em alguns casos estas falhas estão associadas a ações de vandalismo. Os resultados demonstraram uma alta ocorrência de dutos de evaporação com alturas superiores a 20 m, em particular na região nordeste, assim como uma baixa ocorrência no interior da Baía de Guanabara (boia Niterói). Foram realizadas análises do comportamento dos dutos de evaporação ao longo do dia e ao longo do ano em localizações geográficas distintas. Também foram realizadas comparações entre regiões com alturas de dutos de evaporação distintas, demonstrando, caso a caso, qual grandeza física foi mais relevante para

as diferenças identificadas. Em resumo, dutos de evaporação são comuns em ambientes marítimos. Os resultados comprovam a importância de se considerar dutos de evaporação nas comunicações em ambientes marítimos na costa brasileira.

Por isso, foi simulada a propagação eletromagnética por intermédio do modelo de traçados de raios na presença de um duto de evaporação hipotético de 20 m de altura. Foram considerados dois cenários, com antenas localizadas acima (a 35 m de altura) ou no interior (a 15 m de altura) do duto de evaporação. Em ambos os casos, as previsões do modelo de traçado de raios e do *software* AREPS demonstraram uma diferença para a frequência de 1 GHz. Enquanto o modelo de traçado de raios previu perdas de propagação sempre próximas às de espaço livre para distâncias inferiores a 60 km, o *software* AREPS previu uma transição deste regime para o de perdas de propagação intermediárias entre as curvas *FSL* e *FSL+Diffrr*. Por outro lado, para a frequência de 3 GHz, os dois modelos concordam com um regime de perdas de propagação sempre próximas às de espaço livre para distâncias inferiores a 70 km. Portanto, ao serem comparados com os resultados do *software* AREPS, os valores da perda de propagação previstos pelas duas técnicas apresentaram diferenças na frequência de 1 GHz e novamente se aproximaram em 3 GHz.

Os cálculos da intensidade de campo pelo modelo de traçado de raios apresentaram instabilidades numéricas, em particular em regiões onde houve a formação de cáusticas. Esta é uma limitação bem conhecida da ótica geométrica. Entretanto, ambos os modelos sempre concordaram que, na presença de dutos de evaporação, o campo a grandes distâncias é mais intenso que o previsto pela associação da perda de espaço livre com a atenuação adicional devida à difração pela curvatura da Terra.

A utilização de dados meteorológicos, provenientes de radiossondas transportada por balões, também possibilitou a análise da propagação eletromagnética em ambientes marítimos verticalmente estratificados. Estes dados permitiram examinar os efeitos na radiopropagação tanto de meios de refratividades modificadas próximas à normal (de referência) quanto de dutos de superfície. Em ambos os casos, a técnica de traçado de raios foi utilizada não só para visualização do percurso dos raios, mas também para o cálculo da perda de propagação em pontos onde as antenas tinham alturas constantes e distâncias variáveis. As comparações com os resultados obtidos em simulações feitas com o *software*

AREPS mostram, em geral, boas concordâncias nas regiões de validade do modelo de traçado de raios. Mais uma vez, alguns cálculos da intensidade de campo pelo modelo de traçado de raios apresentaram instabilidades numéricas, em particular em regiões onde houve a formação de cóusticas. As observações sobre concordância entre os resultados dos dois modelos em função das frequências apresentadas acima também se aplicam aos casos tratados no presente parágrafo.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Sugere-se a realização de campanhas de medições meteorológicas em pontos de observação variáveis em altura e distância, com intuito de determinar e apresentar mapas de refratividade modificada que possam ser empregados no algoritmo de traçado de raios utilizado neste trabalho. Deve ser lembrado que o perfil vertical seccionalmente linear da refratividade modificada $M(h)$ pode variar ao longo de um percurso.

Medições de radiopropagação em paralelo com as medições meteorológicas possibilitariam comparações entre os resultados simulados utilizando tanto o modelo de traçado de raios, quanto o *software* AREPS. Estas medições também possibilitariam uma melhor análise das diferenças encontradas pelas simulações entre as frequências de 1 GHz e 3 GHz.

Outra sugestão é a utilização de embarcações e equipamentos de telecomunicações para medições de radiopropagação em ambientes próximos às boias oceanográficas do PNBOIA, permitindo assim uma análise que utilizaria os dados destas medições, resultados de estimativas de alturas de dutos de evaporação e resultados de simulações utilizando o modelo de traçado de raios e o *software* AREPS.

É igualmente importante o desenvolvimento de procedimentos estáveis para o cálculo da intensidade de campo pelo modelo de traçado de raios, nos limites de validade da ótica geométrica. Existem resultados parciais encorajadores para a realização analítica destes cálculos. É importante ressaltar que um modelo de traçado de raios estável pode fornecer diversas informações sobre um canal de faixa larga de forma natural. Entre estas informações, encontram-se ângulos de chegada

e partida, funções de transferência, bem como respostas ao impulso de um canal, assim com parâmetros tais com retardo médio e *rms delay spread*.

7 Referências bibliográficas

- 1 **Prospects for Maritime Satellite Communications Report 2018 - Sector Dynamics, Analysis and Forecasts for the Maritime Satcom Market - ResearchAndMarkets.com.** Journal of Engineering, p. 1141, março 2018. Disponível em: <<http://link.galegroup.com/apps/doc/A532177861/AONE?u=capex&sid=AONE&xid=5c8bd51a>>. Acesso em: 16 jul. 2018.
- 2 DANKLMAYER, A. et al. **Radar Propagation Experiment in the North Sea: The Sylt Campaign.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 56, n. 2, p. 835-846, 2018.
- 3 BEAN, B. R.; DUTTON, E. J. **Radio Meteorology.** National Bureau of Standards, Colorado, EUA, 1966.
- 4 DINC, E.; AKAN, O. B. **Beyond-line-of-sight communications with ducting layer.** IEEE Communications Magazine, Vol. 52, n. 10, p. 37-43, 2014.
- 5 BABIN, S. M.; YOUNG, G. S.; CARTON, J. A. **A New Model of the Oceanic Evaporation Duct.** Journal of Applied Meteorology, Vol. 36, n. 3, p. 193-204, 1997.
- 6 PINHEIRO, F. R. **Estudo sobre a ocorrência de dutos de evaporação na região oceânica ao largo do Estado do Rio Grande do Sul.** Monografia (Graduação em meteorologia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.
- 7 PAULUS, R. A. **Specification for Evaporation Duct Height Calculations.** NOSC Technical Document 1596. San Diego, Califórnia, EUA, 1989.

- 8 International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector. **The radio refractive index: its formula and refractivity data.** Recommendation ITU-R P.453-13, Genebra, Suíça, 2017.
- 9 BORN, M.; WOLF, E. **Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation Interference and Diffraction of Light.** 7^a ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- 10 COSTA, E. **Notas de aula da disciplina propagação troposférica.** CETUC/PUC-Rio, 2017.
- 11 BALANIS, C. A. **Advanced Engineering Electromagnetics.** John Wiley & Sons, 1989.
- 12 OZGUN, O. et al. **PETOOL: MATLAB-based one-way and two-way split-step parabolic equation tool for radiowave propagation over variable terrain.** Computer Physics Communications, Vol. 182, n. 12, p. 2638-2654, 2011.
- 13 FRIIS, H. T. **A Note on a Simple Transmission Formula.** Proceedings of IRE, Vol. 34, n. 5, p. 254-256, 1946.
- 14 International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector. **Handbook on Radiometeorology 2013.** Genebra, 2013.
- 15 JESKE, H. **State and limits of prediction methods of radar wave propagation conditions over sea.** Modern topics in microwave propagation and air-sea interaction. Institutes series (series C – Mathematical and Physical Sciences), Vol. 5, p. 130-148, Springer, Dordrecht, 1973.
- 16 PAULUS, R. A. **Evaporation duct effects on sea clutter.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 38, n. 11, p. 1765-1771, 1990.

- 17 PAULUS, R. A. **Practical application of an evaporation duct model.** Radio Science, Vol. 20, n. 4, p. 887-896, 1985.
- 18 HALL, M. P. M. **Effects of the troposphere on radio communication.** Madison: P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1979.
- 19 BARCLAY, L. W. **Propagation of radiowaves.** 3^a ed. Londres: The Institution of Engineering and Technology, 2013.
- 20 International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector. **Propagation by diffraction.** Recommendation ITU-R P.526-14, 2018.
- 21 PAULUS, R. A. **Evaporation duct effects on sea clutter.** IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 38, n. 11, p. 1765-1771, 1990.
- 22 SEVGI, L. A **Ray-Shooting Visualization MATLAB Package For 2D Ground-Wave Propagation Simulations.** IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 46, n. 4, p. 140-145, 2004.
- 23 PEREIRA, H. P. P **CONTRIBUIÇÕES PARA O CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS DE BOIAS METEO-OCEANOGRÁFICAS NA COSTA BRASILEIRA.** Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.