

MOISES FERNANDES DE SOUZA

ESTUDO DE ECOS DE TERRENO EM SISTEMAS DE RADAR METEOROLÓGICO  
A PARTIR DA ÓPTICA GEOMÉTRICA

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de Mestre, no Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Dartora

Coorientador: Dr. Reinaldo B. Silveira

Curitiba

2015

---

S729e

Souza, Moises Fernandes de

Estudo de ecos de terreno em sistemas de radar meteorológico a partir da óptica geométrica/ Moises Fernandes de Souza. – Curitiba, 2015.  
85 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2015.

Orientador: César Augusto Dartora – Co-orientador: Reinaldo B. Silveira.  
Bibliografia: p. 75-79.

1. Radar meteorológico. 2. Ótica geométrica. 3. Topografia. 4. Ondas eletromagnéticas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Dartora, César Augusto. III. Silveira, Reinaldo B. . IV. Título.

CDD: 551.6353

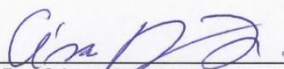
---

## TERMO DE APROVAÇÃO

Moises Fernandes de Souza

Estudo de Ecos de Terreno em Sistemas de Radar Meteorológico a  
Partir da Óptica Geométrica

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de  
Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal do Paraná.



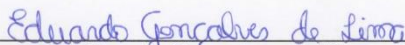
---

Prof. Dr. César Augusto Dartora – Orientador  
Universidade Federal do Paraná



---

Prof. Dr. Reinaldo Bonfim da Silveira – Coorientador  
Sistema Meteorológico do Paraná - SIMEPAR



---

Prof. Dr. Eduardo Gonçalves de Lima – Convidado  
Universidade Federal do Paraná



---

Prof. Dr. Roberto Vicente Calheiros – Convidado  
Universidade Estadual Paulista

Curitiba, 17 de junho de 2015

*À minha filha Raissa*

## AGRADECIMENTOS

Meu especial agradecimento ao Prof. Dr. César Augusto Dartora, pelo incentivo e orientação deste trabalho.

Ao Dr. Reinaldo B. Silveira pela coorientação.

Ao Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). Em especial aos diretores, Dr. Eduardo Alvim Leite, Diretor Presidente e Dr. Cesar A. Beneti. Diretor Executivo, por autorizarem o uso dos radares meteorológicos de Teixeira Soares e Cascavel.

Ao Mestre Itamar Moreira, Coordenador da área de infraestrutura, por facilitar as condições para realização deste trabalho.

E aos Colegas de trabalho, Engenheiro Sidney Fernando Chila e ao Mestre Mauro Cezar Klinguelfus, pelos exaustivos *brainstorms* sobre os radares.

E a todos os demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Homo sum, humani nihil a me alienum puto.”

Publius Terentius

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estimador numérico de ecos de terreno para radares meteorológicos a partir dos princípios da óptica geométrica. Como principais parâmetros de entrada do algoritmo de cálculo têm-se o diagrama de radiação da antena e os dados topográficos da região onde o radar está localizado. Para a base de dados topográficos, utilizou-se os dados *SRTM* fornecidos pela *NASA*, obtidas pela missão de 2002 do ônibus espacial Endeavour com resolução espacial de 90m. Procurou-se caracterizar a propagação de sinais de radar a partir da óptica geométrica, modelando-se o diagrama de radiação da antena de radar como ondas eletromagnéticas irradiadas a partir do centro focal da antena, considerando-se a trajetória dos diversos raios compreendidos dentro do ângulo de abertura de feixe dos lóbulos da antena do radar, sendo o método validado utilizando-se dados de radares reais instalados no Estado do Paraná. Espera-se que este trabalho possa auxiliar no projeto de sistemas de radar meteorológico, sobretudo na escolha do local de instalação que tenha melhor resposta em relação ao eco de terreno.

Palavras-chave: Estimador numérico, Ecos de terreno, Radar, Projeto de Radares Meteorológicos, Óptica geométrica, Diagrama de radiação, Antena, Dados topográficos *SRTM*, Ondas eletromagnéticas.

## **ABSTRACT**

A numerical estimator for predicting the effects of groundclutter in meteorological radar systems based on the principles of geometric optics is presented in this work. The main entries of the algorithm are the antenna radiation pattern and the topographic data related to the radar site. In order to obtain the topographic data it is used, the SRTM data provided by NASA with spatial resolution of 90 m, which collected the information from the Endeavour mission in the year of 2002 was used. Electromagnetic signal propagation was entirely described by means of geometric optics, the radiation pattern of the radar antenna was modeled like electromagnetics waves radiated from the focal center, taking into consideration the rays trajectories comprehended within the aperture angle of the antenna lobes. The method was validated using the data from meteorological radars already in use in the Paraná State. It is expected that the present work can help the design of future radar systems, mainly related to the choice of the installation site presenting the best response concerning groundclutter effects.

Key-words: Numerical estimator, Groundclutter, Radar, Weather radar design, Geometric optics, Radiation pattern, Antenna, Topographic data SRTM, Electromagnetics waves.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REFLEXÃO ESPECULAR ENTRE DOIS MEIOS COM INTERFACE PLANA PERFEITAMENTE LISA .....	6
FIGURA 2 – REFLEXÃO DIFUSA.....	7
FIGURA 3 - DENSIDADE DE POTÊNCIA RADIADA.....	12
FIGURA 4 - DIAGRAMA DE RADIAÇÃO TÍPICO DE UMA ANTENA.....	15
FIGURA 5 - GRÁFICO DA FUNÇÃO GANHO PARA UMA ANTENA PARABÓLICA.....	17
FIGURA 6 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM RADAR.....	18
FIGURA 7 - FORMA DO SINAL ELETROMAGNÉTICO.....	19
FIGURA 8 – COMPRIMENTO DE PULSO.....	24
FIGURA 9 – ECOS DE TERRENO.....	25
FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE ESTIMAÇÃO. PARTE 1.....	29
FIGURA 11 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DE ESTIMAÇÃO. PARTE 2.....	30
FIGURA 12 - ILUSTRAÇÃO DA TORRE DO RADAR DE TEIXEIRA SOARES.....	32
FIGURA 13 – RAIO DE COBERTURA DO RADAR.....	33
FIGURA 14 - MATLAB USANDO API DO GOOGLE.....	35
FIGURA 15 - ILUSTRAÇÃO DA ABERTURA DOS LÓBULOS DA ANTENA E POSIÇÃO DOS FEIXES EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA.....	36
FIGURA16 - DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DA ANTENA DE RADAR 2,8 GHZ, 45 DBI.....	37
FIGURA 17 - FEIXES SOBREPOSTOS AO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DA ANTENA.....	38
FIGURA 18 - ITERAÇÃO DO PADRÃO DE RADIAÇÃO COM O RELEVO.....	39
FIGURA 19 - ABERTURA DO FEIXE DA ANTENA.....	40
FIGURA 20 - ABERTURA DOS FEIXES SOBREPOSTO AO LADO ESQUERDO DO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DA ANTENA.....	41
FIGURA 21 - PERFIL DO RELEVO / FEIXES LÓBULOS PRINCIPAL E SECUNDÁRIOS.....	42
FIGURA 22 – PROJEÇÃO DA ABERTURA DO FEIXE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE ELEVAÇÃO.....	43
FIGURA 23 - ESQUEMA DE ABERTURA DO FEIXE.....	44

FIGURA 24 - ESCALA DE PRIORIDADES DOS LÓBULOS.....	46
FIGURA 25 - CLASSIFICADOR DE PROCEDÊNCIA DE ECOS. ....	48
FIGURA 26 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0°..	49
FIGURA 27 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,1°. .....	49
FIGURA 28 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,2°.. .....	50
FIGURA 29 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,3°.. .....	50
FIGURA 30 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,4°.. .....	51
FIGURA 31- ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,5°.. .....	51
FIGURA 32 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,6°.. .....	52
FIGURA 33 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,7°.. .....	52
FIGURA 34 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,8°.. .....	53
FIGURA 35 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,9°.. .....	53
FIGURA 36 - OBSTÁCULOS DETECTADOS COM ELEVAÇÃO DE 0,9°.....	54
FIGURA 37 - CAMINHO DOS FEIXES COM ELEVAÇÕES DISTINTAS. ....	55
FIGURA 38 - ECOS DE TERRENO DETECTADOS PELO RADAR DE TEIXEIRA SOARES. ....	56
FIGURA 39 - ECOS DE TERRENO DETECTADOS PELO RADAR DE TEIXEIRA SOARES. FONTE: [47] .....	57
FIGURA 40 - COMPARATIVO ENTRE A MEDIÇÃO E ESTIMAÇÃO DE ECOS DE TERRENO.....	58
FIGURA 41 - ESTIMAÇÃO SOBREPOSTA AO MAPA RODOVIÁRIO. ....	59
FIGURA 42 - APROXIMAÇÃO NO MAPA DOS ECOS DE TERRENO .....	60
FIGURA 43 - ECOS DE TERRENO DOS LÓBULOS SECUNDÁRIOS .....	61
FIGURA 46 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0°..	62

FIGURA 46 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,1°..	62
.....	
FIGURA 44 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0°..	62
FIGURA 47 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,2°..	63
.....	
FIGURA 48 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,3°..	63
.....	
FIGURA 49 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,4°..	64
.....	
FIGURA 50 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,5°..	64
.....	
FIGURA 51 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,6°..	65
.....	
FIGURA 52 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,7°..	65
.....	
FIGURA 53 - ECOS DE TERRENO MEDIDOS PELO RADAR.....	66
FIGURA 55 - ECOS DE TERRENO SOBREPOSTO A MAPA RODOVIÁRIO.....	70
FIGURA 56 - MAPA HIBRIDO (SATÉLITE/RODOVIÁRIO) SOBREPOSTO AOS ECOS DE TERRENO.....	71
FIGURA 57 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0°.....	80
FIGURA 58 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,1°... 81	
FIGURA 59 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,2°... 81	
FIGURA 60 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,3°... 82	
FIGURA 61 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,4°... 82	
FIGURA 62 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,5°... 83	
FIGURA 63 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,6°... 83	
FIGURA 64 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,7°... 84	
FIGURA 65 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,8°... 84	
FIGURA 66 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,9°... 85	

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES IMPORTANTES PARA $k$ E PARA O GRADIENTE DE REFRATIVIDADE.....	11
TABELA 2 - SIGLAS UTILIZADAS.....	28
TABELA 3 - DADOS DE ENTRADA DO ESTIMADOR .....	31
TABELA 4 - DADOS EXTRAÍDOS DO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO.....	39
TABELA 5 - ÂNGULO DE ABERTURA PARA CADA LÓBULO .....	40
TABELA 6 - DEFINIÇÃO DAS ALTURAS DOS FEIXES.....	45
TABELA 7 - INDICAÇÕES DE ECOS DE TERRENO .....	46
TABELA 8 - PARÂMETROS PARA ESTIMAÇÃO DOS ECOS DE TERRENO PARA O RADAR DE CASCAVEL .....	62

## LISTA DE SIGLAS

VHF	- <i>Very High Frequency</i>
RADAR	- <i>Radio Detection and Ranging</i>
R.D.F.	- <i>Radio Direction Finding</i>
NASA	- <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
SRTM	- <i>Space Shuttle Radar Topography Mission</i>
SIMEPAR	- Sistema Meteorológico do Paraná
RF	- <i>Radio Frequency</i>
CW	- <i>Continuous Wave</i>
FM	- <i>Frequency Modulation</i>
BIN	- <i>Be It in raNge</i>
GIS	- <i>Geographic Information System</i>
PRF	- <i>Pulse Repetition frequency</i>
MATLAB	- <i>Matrix Laboratory</i>
API	- <i>Application Programming Interface</i>
LP1	- Primeiro feixe do Lóbulo principal
LPC	- Feixe central do lóbulo principal
LP2	- Segundo feixe do lóbulo principal
1LS1	- Primeiro feixe do primeiro lóbulo secundário
1LSC	- Feixe central do primeiro lóbulo secundário
1LP2	- Segundo feixe do primeiro lóbulo secundário
2LS1	- Primeiro feixe do segundo lóbulo secundário
2LSC	- Feixe central do segundo lóbulo secundário
2LP2	- Segundo feixe do segundo lóbulo secundário
3LS1	- Primeiro feixe do terceiro lóbulo secundário
3LSC	- Feixe central do terceiro lóbulo secundário
3LP2	- Segundo feixe do terceiro lóbulo secundário
ITU-R	- <i>International Telecommunication Union Radio.</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$k_e$	- Fator correspondente à condição de atmosférica padrão
$\theta_i$	- Ângulo de incidência
$\theta_r$	- Ângulo de reflexão
$\theta_t$	- Ângulo de refração
$\eta_1, \eta_2$	- Índices de refração dos meios 1 e 2
$\eta_{ar}$	- Índice de refração do ar
$N_G$	- Gradiente de refratividade
$D$	- Diâmetro de abertura do paraboloide
$(r, \theta, \varphi)$	- Ponto em coordenadas polares
$S_{rad}$	- Densidade de potência
$P_{in}$	- Potência nos terminais de alimentação da antena
$r$	- Distância medida a partir do centro de emissão da antena
$G(\theta, \varphi), G_0$	- Ganho da antena
$\mathcal{P}_{rad}$	- Potência total radiada
$T_0$	- Período da onda portadora
$\tau$	- Largura do pulso transmitido
$T$	- Intervalo de tempo entre pulsos
$f$	- Frequência da onda portadora
$\Delta\theta$	- Ângulo de abertura da antena
$P_R$	- Potência de sinal refletida na antena do radar
$P_t$	- Potência de sinal Transmitida.
$G$	- Ganho da antena
$H$	- Largura do pulso
$K$	- Constante dielétrica da água
$L$	- Fator de perdas atmosféricas
$Z$	- Fator de refletividade do alvo
$\lambda$	- Comprimento de onda do Transmissor
$R$	- Distância do radar ao alvo
$m_{bin}$	- Menor distância entre células

$c$	- Velocidade da luz
$r_{max}$	- Máxima distância sem ambiguidade
$\sigma_{sc}$	- Refletividade
$A_{ef}$	- Área efetiva
$Lat_{pto}$	- Latitude do raio de cobertura
$Lon_{pto}$	- Longitude do raio de cobertura
$\Delta$	- Distância do raio de cobertura
$\theta$	- Ângulo do raio de cobertura
$Lat_{or}$	- Latitude da localização do radar
$Lon_{or}$	- Longitude da localização do radar
$s$	- Abertura do feixe
$R$	- Raio real da terra
$h$	- Altura do feixe
$\theta_e$	- Ângulo de inclinação da antena
$\psi$	- Ângulo de elevação da antena
$s$	- Abertura do feixe
$a$	- Projeção da abertura do feixe

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>vii</b>
<b><i>ABSTRACT</i> .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE SIGLAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. - CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. - MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	3
1.3. - OBJETIVOS .....	3
1.3.1.- Objetivo geral .....	3
1.3.2.- Objetivo específico .....	4
1.4. - METODOLOGIA.....	4
1.5. - APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	4
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>6</b>
<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>6</b>
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	6
2.2. ELEMENTOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA.....	6
2.3. PROPAGAÇÃO .....	8
2.3.1.Refratividade .....	8
2.3.2.Raio equivalente da terra.....	9
2.4. FUNDAMENTOS DE ANTENAS .....	11
2.5. DEFINIÇÃO DO GANHO DA ANTENA.....	12
2.6. ANTENAS DE ABERTURA .....	15
2.7. TEORIA BÁSICA DO RADAR.....	18

2.8. EQUAÇÃO DO RADAR METEOROLÓGICO DE PROBERT-JONES.....	22
2.9. LARGURA DE PULSO E RESOLUÇÃO.....	24
2.10. ECOS DE TERRENO.....	25
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>27</b>
<b>ESTIMADOR DE ECOS DE TERRENO.....</b>	<b>27</b>
3.1. INTRODUÇÃO.....	27
3.2. SOFTWARE DE DESENVOLVIMENTO.....	27
3.3. FLUXOGRAMA.....	28
3.4. DADOS DE ENTRADA.....	31
3.5. CÁLCULO DA ÁREA DE COBERTURA.....	32
3.6. CONEXÃO AO <i>GOOGLEMAPS</i> .....	34
3.7. BANCO DE DADOS TOPOGRÁFICOS <i>SRTM</i> .....	35
3.8. MODELAMENTO DOS FEIXES DO RADAR METEOROLÓGICO.....	36
3.9. EQUAÇÃO DA ALTURA MÉDIA DO FEIXE DO RADAR EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA.....	41
3.10. EQUAÇÃO DA ABERTURA DO FEIXE DO RADAR EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA.....	43
3.11. CLASSIFICADOR DE OBSTRUÇÃO DOS FEIXES.....	45
3.11.1. Cores do lóbulo principal.....	46
3.11.2. Cores dos lóbulos secundários.....	47
3.11.3. Resolução espacial dos ecos de terreno.....	47
3.11.4. Composição dos feixes.....	47
3.12. VERIFICAÇÃO DO RESULTADO DA ESTIMAÇÃO.....	48
3.13. ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS ELEVAÇÕES.....	54
3.14. ANÁLISE DOS FEIXES EM PERFIL.....	55
3.15. ECOS DE TERRENO MEDIDOS PELO RADAR DE TEIXEIRA SOARES.....	56
3.16. ANÁLISE DOS ECOS MEDIDOS PELO RADAR.....	57
3.17. COMPARAÇÃO ENTRE OS ECOS MEDIDOS E OS ESTIMADOS.....	57

3.18. VISUALIZAÇÃO DOS ECOS DE TERRENO ESTIMADOS SOBREPOSTO AO MAPA RODOVIÁRIO .....	59
3.19. ESTIMAÇÃO DOS ECOS DE TERRENO DO RADAR DE CASCAVEL.....	61
3.20. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA ESTIMAÇÃO. ....	66
3.21. ECOS DE TERRENO MEDIDOS PELO RADAR DE CASCAVEL.....	66
3.22. ANÁLISE DOS ECOS MEDIDOS PELO RADAR DE CASCAVEL.....	67
3.23. COMPARAÇÃO ENTRE OS ECOS DE TERRENO MEDIDOS E OS ESTIMADOS DO RADAR DE CASCAVEL. ....	67
3.24. VISUALIZAÇÃO DOS ECOS DE TERRENO ESTIMADOS DO RADAR DE CASCAVEL SOBREPOSTO AO MAPA RODOVIÁRIO .....	69
3.25. VISUALIZAÇÃO DOS ECOS DE TERRENO ESTIMADOS DO RADAR DE CASCAVEL SOBREPOSTO AO MAPA HÍBRIDO (SATÉLITE/RODOVIÁRIO) .....	70
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>72</b>
<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>72</b>
4.1. CONCLUSÕES .....	72
4.2. TRABALHOS FUTUROS.....	73
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>80</b>
<b>VARIAÇÃO DA ALTITUDE DOS FEIXES EM PERFIL .....</b>	<b>80</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1.- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Na última década, pesquisas sobre mudanças climáticas, tais como a apresentada em [1], a qual relaciona a concentração de CO<sub>2</sub> ao aquecimento global, têm chamado atenção da comunidade científica, bem como de governos de diversos países, sobre os impactos da ocupação humana e da industrialização sobre o clima do planeta. No Brasil, no ano de 2008 foi apresentado pelo Governo Federal o “Plano Nacional sobre Mudança do Clima” [2], o qual incentiva o desenvolvimento de ações no Brasil em colaboração ao esforço mundial de combate ao problema e ao mesmo tempo, cria condições para o enfrentamento de suas consequências. Uma das medidas tomadas pelo Governo Federal foi a criação em 2011 do CEMADEN - Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, com o objetivo de gerenciar informações emitidas por radares, pluviômetros e previsões climáticas. O Estado do Paraná, por sua vez, pioneiro em questões ambientais desde 1993 através do decreto estadual nº 1752 instituiu o SIMEPAR - Sistema Meteorológico do Paraná que, monitora, coleta e processa informações meteorológicas através da utilização de estações meteorológicas automáticas, sensores de detecção de raios, radares meteorológicos e modelos de previsão climática.

Neste contexto, o emprego da tecnologia de radares meteorológicos é de extrema importância para antever eventos naturais extremos, como chuvas fortes, granizo e na parametrização de fenômenos físicos que ocorrem na atmosfera.

Atualmente, sistemas de radares meteorológicos comerciais têm alcances desde 15 km até 500 km a partir de sua localização perfazendo varreduras de 360<sup>o</sup>. Cada varredura pode levar desde poucos segundos até vários minutos dependendo da resolução escolhida e limitações de ordem construtiva de cada radar. Sendo a capacidade de detecção de cada um dependente de uma gama de fatores, tais como; frequência, potência, tipo de antena e capacidade de processamento.

Por opção, os órgãos de monitoramento meteorológico do Brasil utilizam radares de alta potência de transmissão operando nas bandas C ou S com

capacidades de detecção na ordem de 480 km de distância. Estes radares possuem excelente desempenho, sendo os mais utilizados no mundo em aplicações meteorológicas.

Entretanto, no monitoramento de eventos a grandes distâncias, estes radares necessitam operar com ângulos de elevação baixos, entre  $0,3^{\circ}$  e  $0,5^{\circ}$ , como visto em [3]. Isto implica que nas regiões próximas o feixe radiado pela antena se propagará a uma altitude extremamente baixa, pois inicialmente o ângulo de abertura do feixe faz com que o feixe se aproxime do solo, sendo susceptível a interagir com o relevo, o que provoca ecos contaminantes das informações coletadas nestas regiões. A princípio pode-se argumentar que uma solução seria compor varreduras com uma elevação para alvos distantes seguida de outra varredura com elevação para alvos próximos. Esta abordagem, apesar de plausível, pode causar erros de interpretação dos dados coletados, pois a composição dos dados terá dados coletados em tempos diferentes, podendo uma varredura estar deslocada vários minutos de uma para outra. Outra possibilidade, apresentada em [4] e [5], é a utilização de filtros para retirar a contaminação após a coleta da informação. Mas esta solução está longe de ser definitiva, pois os sinais provenientes dos ecos de terreno são mais intensos que os meteorológicos, mascarando qualquer sinal meteorológico na mesma região, assim sendo toda informação meteorológica que ocorre na região em que os ecos de terreno estiverem presentes é perdida na aplicação do filtro.

Face a diversidade de soluções para mitigação da contaminação dos ecos de terreno, como tratado em [6], é de consenso entre profissionais da área que o problema seja tratado desde antes da implantação de um sistema de radar, pois a escolha de um local adequado pode resolver vários problemas de contaminação de dados.

Inserir-se neste ponto este trabalho, no qual apresenta-se a elaboração de uma ferramenta capaz de estimar a contaminação por ecos de terreno nos dados coletados de um radar meteorológico, antes mesmo de sua implantação, utilizando-se para tal, o ambiente de programação MATLAB e os dados de topografia *SRTM*.

## **1.2. - MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA**

A estimador de ecos de terreno a ser abordado neste trabalho apresenta um diferencial em relação às outros que utilizam o mesmo método de traçamento de raios, tais como [7],[8],[9] e [10], pois aqui o modelamento do diagrama de radiação das antenas parabólicas é tratado de forma a considerar não somente o centro do feixe principal radiado para traçar raios, mas também o traçado dos raios provenientes dos lóbulos secundários e suas respectivas aberturas relativas, utilizando-se dos conceitos da óptica geométrica para estimação da propagação, levando em conta a topografia.

Desta forma, elaborou-se um algoritmo no qual todos os ecos de terreno e obstruções são marcados e classificados em uma imagem georreferenciada e sobreposta a mapas rodoviários e híbridos de satélite. Esta informação estimada é análoga à obtida com um radar em operação.

Como parâmetros de entrada para o algoritmo estimador foram definidas: As coordenadas de latitude e longitude do site desejado, altitude da antena e ângulo de elevação da antena.

Obtém-se ao final do processamento do algoritmo estimador uma imagem georreferenciada contendo as informações de tamanho da área contaminada com ecos de terreno, distâncias entre áreas de contaminação, distinção entre obstruções parciais e totais do feixe irradiado pela antena do radar bem como a classificação de contaminações separadas por lóbulos.

Assim sendo, com o emprego deste estimador o processo de análise e projeto para implantação de novos *sites* de sistemas de radares meteorológicos e redes de radar torna-se menos complexo.

## **1.3. - OBJETIVOS**

### **1.3.1. - Objetivo geral**

Estudar o efeito da topografia para a propagação de ondas eletromagnéticas em sistemas de radar meteorológicos através da óptica geométrica.

### **1.3.2. - Objetivo específico**

Desenvolver um algoritmo capaz de estimar a contaminação causada pelos efeitos da topografia em sistemas de radar, denominada eco de terreno. Validar os resultados da estimação, comparando o padrão obtido numericamente aos dados medidos pelos radares do SIMEPAR.

## **1.4. - METODOLOGIA**

Devido ao fato da contaminação causada por ecos da topografia nos sinais de sistemas de radar mostrar-se complexo, necessitou-se incluir diversos aspectos desde propagação de ondas eletromagnéticas até o georreferenciamento dos resultados da estimação.

Optou-se primeiramente pela fundamentação teórica dos seguintes tópicos: Propagação de ondas eletromagnéticas; radar; atenuações; diagrama de radiação de antenas. Após a fundamentação teórica, elaborou-se um estimador que se baseia na óptica geométrica (trajetória de raios) de propagação de sinais de um radar utilizando-se o MATLAB como ferramenta de desenvolvimento. Incluíram-se neste estimador os dados de topografia provenientes da *SRTM*, fornecidos gratuitamente pela *NASA*.

Para validação, são inseridas no estimador as coordenadas geográficas dos radares do Instituto Tecnológico SIMEPAR, alturas em relação ao solo, tipos de antena e frequência de operação. Após a estimação comparam-se as informações medidas com as simuladas. Com base em tais informações, verifica-se a aplicabilidade do estimador bem como suas restrições.

## **1.5.- APRESENTAÇÃO DO TRABALHO**

No CAPÍTULO 1, é apresentado um breve relato sobre a importância dos sistemas de radar. O objetivo é posicionar o leitor e ao mesmo tempo fornecer uma síntese do cenário atual. Ainda neste capítulo são abordados os objetivos, justificativas e metodologia deste trabalho.

No CAPÍTULO 2, é descrita a fundamentação teórica de sistemas de radar, seus conceitos básicos e a fundamentação necessária para a caracterização dos problemas e desafios estudados nesta dissertação.

No CAPÍTULO 3, é apresentada a concepção detalhada do estimador, sua conexão com os dados topográficos e o modelamento do diagrama de radiação de uma antena parabólica. Para validação dos resultados, obteve-se com o SIMEPAR dados de ecos de terreno dos radares de Teixeira Soares e Cascavel para comparação com os resultados do estimador.

No CAPÍTULO 4, São feitas considerações finais e conclusões obtidas a partir do estudo realizado, bem como perspectivas para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

# FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo descreverá de forma tão clara e sucinta quanto possível os principais fundamentos teóricos que serão empregados na modelagem dos efeitos de eco de terreno. O modelo está baseado no traçamento de raios, conforme os preceitos da óptica geométrica, com a trajetória corrigida pelo fator de curvatura da Terra. Uma vez que o diagrama de radiação é importante para estabelecer o ângulo de abertura do feixe principal e os lóbulos secundários, serão abordados os conceitos essenciais da teoria de antenas para o presente modelo. Alguns aspectos mais importantes para o radar meteorológico também serão apresentados.

### 2.2. ELEMENTOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA

Uma vez que o modelo proposto está baseado no traçamento de raios, alguns conceitos importantes serão aqui apresentados. A óptica geométrica considera a descrição da propagação de ondas eletromagnéticas como raios que não se curvam em um meio homogêneo, mas podem ser refletidos por objetos e superfícies ou refratados (desviados) ao passarem para um meio distinto do primeiro ou então podem viajar de forma não retilínea se o meio for não-homogêneo. A óptica geométrica permite apenas analisar os aspectos cinemáticos da propagação, não permitindo inferir intensidade dos sinais refletidos ou refratados, nem mesmo efeitos de interferência ondulatória, [11] e [12].

Considere a Figura 1 que ilustra a interface entre dois meios de índices de refração distintos

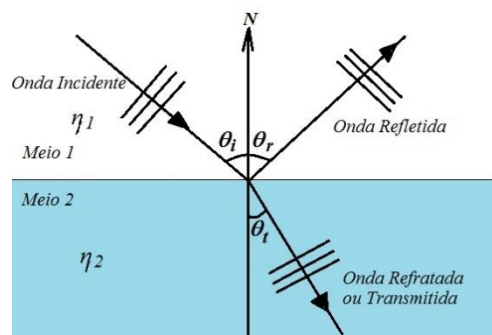


FIGURA 1 - REFLEXÃO ESPECULAR ENTRE DOIS MEIOS COM INTERFACE PLANA PERFEITAMENTE LISA

A cinemática prevista pela óptica geométrica é resumida pelas leis de Snell, observadas nas Equações 2.1 e 2.2:

$$\theta_i = \theta_r \quad , \quad (2.1)$$

$$\eta_1 \text{ sen } \theta_i = \eta_2 \text{ sen } \theta_t \quad , \quad (2.2)$$

onde,

$\theta_i$  = ângulo de incidência;

$\theta_r$  = ângulo de reflexão;

$\theta_t$  = ângulo de refração;

$\eta_1$  e  $\eta_2$  = índices de refração dos meios 1 e 2.

As leis de Snell estabelecem que o ângulo da onda refletida em relação ao eixo normal à interface é exatamente igual ao ângulo de incidência,[13].

O índice de refração  $\eta$  é definido como a razão entre a velocidade de uma onda eletromagnética propagando-se no vácuo pela velocidade de propagação dessa onda em um meio finito, expresso pela Equação 2.3:

$$\eta = c/v \quad , \quad (2.3)$$

onde,

$\eta$  = Índice de refração;

$c$  = velocidade da luz no vácuo [ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ];

$v$  = velocidade da onda no meio material [m/s].

Quando a interface entre dois meios é irregular e rugosa, o eixo normal muda de ponto para ponto, produzindo assim a chamada reflexão difusa. Essa situação é ilustrada na Figura 2.

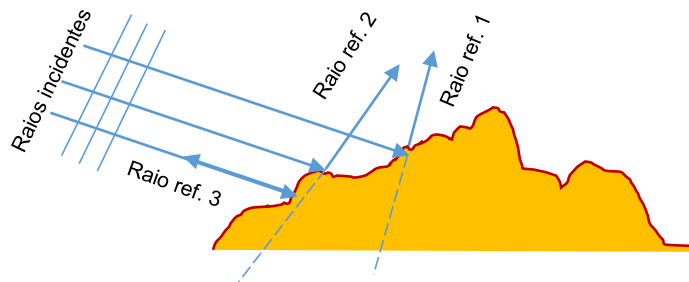


FIGURA 2 – REFLEXÃO DIFUSA. FONTE: O AUTOR

Em geral a ocorrência da reflexão difusa depende da relação entre o comprimento de onda  $\lambda$  da onda incidente e a dimensão característica da rugosidade da superfície. Se as imperfeições são muito menores que  $\lambda$  então pode-se considerar a superfície lisa ( $d < \lambda/10$ ), tendo em vista a propagação de ondas na faixa das micro-ondas ( $\lambda \sim 10cm$ ) e a superfície da terra onde elas incidem, temos uma mistura de reflexões especulares e difusas, que geram fenômenos de interferências que escapam à capacidade de predição do modelo da óptica geométrica.

Para fins de análise no presente modelo iremos considerar a trajetória dos raios provenientes do diagrama de radiação da antena do radar, sendo afetados pela refração do ar atmosférico e corrigida pela curvatura da Terra e com potencial para produzir ruído caso o raio seja interceptado pelo solo, devido à reflexão especular/difusa.

O solo por sua vez, em regiões com vegetação e cobertura distintas, tem índices de refração que variam de ponto a ponto, mas uma vez que esse é claramente distinto do índice de refração do ar atmosférico ( $\eta_{ar} \simeq 1$ ), pode-se assumir que uma onda interceptada por uma região de relevo será fortemente refletida. Embora a amplitude e exata direção da reflexão não seja fácil determinação. No modelo será assumido o pior caso em que o raio refletido no ponto de interceptação tem alto potencial para produzir ruído, conhecido como “eco de terreno”.

## 2.3. PROPAGAÇÃO

### 2.3.1. Refratividade

O feixe emitido pelo radar em determinada direção é mapeado em uma trajetória curva relativa ao raio efetivo da terra, ajustado pelo gradiente de refratividade, consultar [31], [41] e [42]. Como o índice de refração da atmosfera é muito próximo da unidade (da ordem de 1,0003), define-se o parâmetro refratividade, dado pela Equação 2.4:

$$N = (\eta - 1) \times 10^6 \quad , \quad (2.4)$$

onde,

$N$  = refratividade;

$\eta$  = índice de refração.

O valor da refatividade para frequências abaixo de 100GHz é dado pela Equação 2.5.

$$N = 77,6 \frac{P}{T} + 3,732 \times 10^5 \frac{Pe}{T^2} \quad , \quad (2.5)$$

onde,

$P$  = pressão [mBar];

$T$  = temperatura absoluta [K];

$Pe$  = pressão parcial do vapor d'água [mBar].

O valor de  $N$  varia com a altitude pois a pressão, temperatura e umidade também variam com a temperatura. A pressão e a umidade decrescem exponencialmente com a altitude enquanto a temperatura decresce linearmente com a altitude a uma taxa de  $-6^\circ\text{C}$  por km.

Para atmosfera padrão a refatividade pode ser expressa pela Equação 2.6:

$$N(h) = N_0 e^{\left(-\frac{h}{h_0}\right)} \quad , \quad (2.6)$$

onde,

$N_0$  = valor de  $N$  na superfície;

$h$  = altura sobre a superfície;

$h_0$  = fator de escala da altura.

Segundo o ITU-R, a atmosfera padrão é definida por  $N_0 = 315$  unidades e  $h_0 = 7,35$  km.

Para altitudes abaixo de 1 km, o gradiente de refatividade pode ser aproximado segundo a Equação 2.7:

$$N_G = \frac{dN}{dh} \quad , \quad (2.7)$$

### 2.3.2. Raio Equivalente da Terra

Devido à refração, as ondas eletromagnéticas não se propagam em linha reta. A trajetória das ondas é dependente do gradiente de refatividade em cada ponto ao longo do caminho percorrido pela onda, [48].

Se for considerado um valor médio do gradiente de refração ao longo do caminho, pode-se assumir que o feixe segue uma trajetória curva. Considera-se o feixe se propagando em um arco cujo raio é  $r$ . Este raio é inversamente proporcional ao valor médio do gradiente do índice de refração do caminho percorrido, como mostra a Equação 2.8:

$$1/r = dn/dh \quad , \quad (2.8)$$

onde,

$r$  = raio do arco de propagação;

$dn/dh$  = valor médio do gradiente do índice de refração.

O raio efetivo da Terra  $R_e$  é o raio real  $R$  multiplicado por um fator " $k$ " que é dependente do gradiente de refração, descrito na Equação 2.9:

$$R_e = k \cdot R \quad , \quad (2.9)$$

onde,

$R_e$  = Raio efetivo da Terra;

$k$  = Fator dependente do gradiente de refração;

$R$  = Raio real da Terra.

O fator  $k$  relaciona-se com o índice de refração dado pela Equação 2.10:

$$k = \frac{1}{\left(1 + R \frac{dn}{dh}\right)} = \frac{1}{\left(1 + R \frac{dN}{dh \cdot 10^{-6}}\right)} \quad , \quad (2.10)$$

onde,

$R$  = raio real da Terra [6371 km].

Substituindo-se  $R$  na Equação 2.10 tem-se:

$$k = \frac{157}{\left(157 + \frac{dN}{dh}\right)} = \frac{157}{(157 + N_G)} \quad ,$$

A Tabela 1 mostra a relação entre valores de  $k$  e  $N_G$

TABELA 1 – VALORES IMPORTANTES PARA  $k$  E PARA O GRADIENTE DE REFRAATIVIDADE

Fator $k$ [unidade-km/M]	Gradiente de Refratividade $N_G$
1	0
4/3	-40
$\infty$	-157
$k < 1$	$N_G > 0$

## 2.4. FUNDAMENTOS DE ANTENAS

A antena é um elemento capaz de emitir radiação (radiar) de modo eficiente quando atua como transmissora, ou capturar eficientemente a energia de ondas eletromagnéticas que passam pelas suas imediações quando na função de recepção,[14]. Dentre suas principais características, destaca-se a diretividade, ou seja, a capacidade que a antena tem de concentrar a radiação em determinada região do espaço, quando atua como transmissora,[15].

No espaço livre a densidade de potência gerada por uma fonte de extensão finita e com capacidade de potência finita, a um ponto  $(r, \theta, \varphi)$ , segue a lei do inverso do quadrado da distância, ou seja, na Equação 2.11 e Figura 3:

$$\mathcal{S}_{rad} = \frac{G(\theta, \varphi)P_{in}}{4\pi r^2} \quad , \quad (2.11)$$

onde,

$\mathcal{S}_{rad}$  = densidade de potência [ $W/m^2$ ];

$P_{in}$  = potência disponível nos terminais de alimentação da antena [ $W$ ];

$r$  = distância medida a partir do centro de emissão da antena [ $m$ ];

$G(\theta, \varphi)$  = ganho da antena.

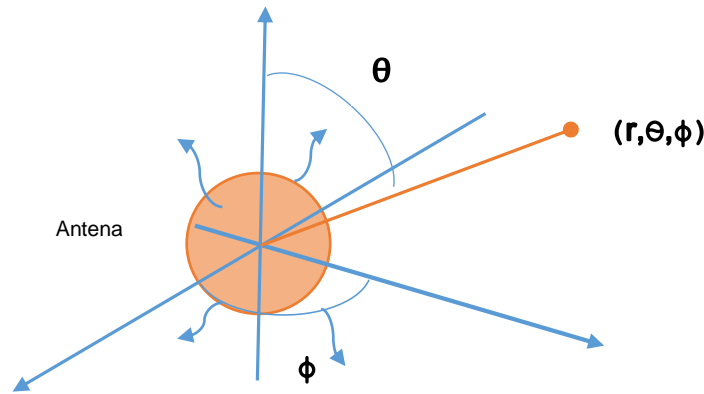


FIGURA 3 - DENSIDADE DE POTÊNCIA RADIADA. FONTE: O AUTOR

Nota-se que a lei  $1/r^2$  na densidade de potência radiada fica manifestada para  $r \gg \lambda$ , o chamado campo distante ou zona de Fraunhofer.

## 2.5. DEFINIÇÃO DO GANHO DA ANTENA

O ganho de uma antena é a razão entre a densidade de potência gerada pela antena considerada em um dado ponto  $(r, \theta, \varphi)$  e a densidade de potência produzida nesse mesmo ponto por uma antena ideal cuja função é conhecida. Essa antena de referência é usualmente o radiador isotrópico, que tem a propriedade de distribuir a radiação uniformemente sobre a superfície da esfera de raio  $r$ , onde localiza-se o ponto  $(r, \theta, \varphi)$ . Nesse caso, alimentando-se uma antena isotrópica com potência  $P_{in}$ , a densidade de potência isotrópica ideal é simplesmente a potência de entrada no radiador isotrópico dividida pela área de uma esfera de raio  $r$ , como o observado na Equação 2.12:

$$S_{rad}^{ISO} = \frac{P_{in}}{4\pi r^2} \quad (2.12)$$

É claramente independente dos ângulos de azimute e elevação  $(\theta, \varphi)$ . Tomando o emissor isotrópico como referência o ganho é dado pelas Equações 2.13 e 2.14:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{S_{rad}(r, \theta, \varphi)|_{P_{in}}}{S_{rad}^{ISO}} = \quad , \quad (2.13)$$

$$= \frac{4\pi r^2 S_{rad}(r, \theta, \varphi)|_{P_{in}}}{P_{in}} \quad , \quad (2.14)$$

Onde  $P_{in}$  é a potência de entrada nos terminais da antena considerada.

Note que, da Equação 2.13 chega-se à Equação 2.12, e embora  $\mathcal{S}_{rad}$  dependa da distância  $r$ , ela é conhecida e dada na forma  $1/r^2$  e portanto a função de ganho  $G(\theta, \varphi)$ , pela definição da Equação 2.14 torna-se independente de  $r$ . Deve-se medir o ganho sempre a uma distância  $r \gg \lambda$  (geralmente  $5\lambda$  já é suficiente).

Observando que a densidade de potência, quando integrada sobre toda a superfície da esfera, nos dá a potência total irradiada, observada na Equação 2.15.

$$\mathcal{P}_{rad} = \int_{\theta'=0}^{\pi} \int_{\varphi'=0}^{2\pi} r^2 \mathcal{S}_{rad}(r, \theta', \varphi') \sin \theta' \delta\theta' \delta\varphi' \quad , \quad (2.15)$$

E uma vez que para uma antena real nem toda potência incidente na entrada  $P_{in}$  converte-se em radiação, podemos definir a eficiência de radiação na Equação 2.16.

$$n = \frac{\mathcal{P}_{rad}}{\mathcal{P}_{in}} \quad , \quad (2.16)$$

Observe que a eficiência  $n$  não pode ser maior do que a unidade,  $0 \leq n \leq 1$ . Utilizando as Equações 2.15 e 2.16 na Equação 2.14 obtém-se a Equação 2.17:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{n \cdot 4\pi r^2 \mathcal{S}_{rad}(r, \theta, \varphi)}{\int_{\theta'=0}^{\pi} \int_{\varphi'=0}^{2\pi} r^2 \mathcal{S}_{rad}(r, \theta', \varphi') \sin \theta' \delta\theta' \delta\varphi'} \quad , \quad (2.17)$$

Essencialmente a função de ganho  $G(\theta, \varphi)$  é capaz de medir o quão diretiva é uma antena, ou seja, quão capaz de concentrar ou distribuir a radiação no espaço uma antena é.

Usualmente o valor máximo da função  $G(\theta, \varphi)$  é denominada  $G_0$  e pode ser dado em escala de decibel, como na Equação 2.18:

$$G_0(dB) = 10 \log_{10}(G_0) \quad , \quad (2.18)$$

O diagrama de radiação normalizado é o gráfico cartesiano ou polar da função observada na Equação 2.19.

$$\frac{G_0(\theta, \varphi)}{G_0} = g(\theta, \varphi) \quad , \quad (2.19)$$

Em valores adimensionais, fica claro que:

$$0 \leq g(\theta, \varphi) \leq 1 \quad ,$$

Uma propriedade da função  $G(\theta, \varphi)$  é que, para eficiência unitária (caso ideal),  $G(\theta, \varphi)$  tem a seguinte integral:

$$\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} G(\theta, \varphi) \sin \theta \, \delta\varphi \delta\theta = 4\pi \quad ,$$

Uma antena isotrópica ideal, pela definição da Equação 2.8 tem ganho  $G(\theta, \varphi) = 1$ , e o gráfico em três dimensões, em função de  $(\theta, \varphi)$  resulta numa esfera de raio unitário. Se  $n = 1$ , a “área” dessa superfície é conservada, independentemente do tipo de antena.

$$\int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} G(\theta, \varphi) \sin \theta \, \delta\varphi \delta\theta = 4\pi \quad ,$$

É usual, ao invés de um gráfico  $(\theta, \varphi)$  versus  $G(\theta, \varphi)$  em três dimensões, apresentar cortes em planos específicos desse diagrama de radiação 3D. Os gráficos obtidos nesses planos também são denominados diagramas de radiação. A Figura 4 apresenta um diagrama de radiação normalizado típico.

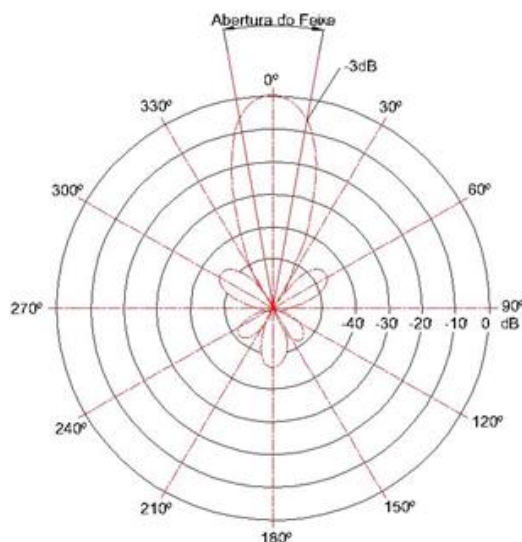


FIGURA 4 - DIAGRAMA DE RADIAÇÃO TÍPICO DE UMA ANTENA. FONTE: O AUTOR

No gráfico normalizado o ganho máximo vale 1, e a abertura angular de feixe nesse plano,  $\Delta\theta$ , é medido entre os dois pontos onde a intensidade de radiação cai à metade (-3dB) em relação ao máximo ganho da antena considerada.

Os lóbulos laterais usualmente têm intensidades menores que 0,5 (ou -3dB).

Um tipo de antena de particular interesse para o caso de aplicação em radares são as chamadas antenas de abertura, onde enquadram-se os refletores parabólicos.

## 2.6. ANTENAS DE ABERTURA

As antenas de abertura são amplamente empregadas em situações que requerem alto ganho ( $G_0 > 20\text{dBi}$ ). Porém, devido à física que rege seu princípio de funcionamento são viáveis apenas em altas frequências, ou seja, a partir do espectro de VHF e sobretudo nas micro-ondas,[15] e [16].

É demonstrado que o ganho máximo de uma antena parabólica é dado através da expressão observada na Equação 2.20, [15].

$$G_0 = n_a \left( \frac{\pi D}{\lambda} \right)^2, \quad (2.20)$$

onde,

$n_a$  = eficiência de abertura, tipicamente entre 0,5 e 0,8;

$D$  = diâmetro de abertura do parabolóide [m];

$\lambda$  = comprimento de onda de operação [m].

Adota-se para  $n_a$  o valor de 0,65 em geral.

Observa-se da equação do ganho  $G_0$  que ao dobrar a frequência  $f$  o ganho deve ser multiplicado por 4, sendo tudo o mais constante, (Lembrando que  $\lambda = \frac{c}{f}$ ).

Para uma antena de abertura há uma relação entre o ângulo de abertura do feixe e a relação  $\frac{D}{\lambda}$ , dada abaixo pela Equação 2.21, [15].

$$\Delta\theta = 70^\circ \frac{\lambda}{D} \quad , \quad (2.21)$$

onde,

$\Delta\theta$  = Ângulo de abertura do lóbulo principal [graus];

$\lambda$  = comprimento de onda de operação [m];

$D$  = diâmetro de abertura do parabolóide [m].

Observa-se que dobrar a frequência reduz o ângulo de abertura à metade.

Em radares meteorológicos, a antena empregada de diâmetro de 8,2m operando em 2800MHz tem  $\Delta\theta = 1^\circ$ .

Para uma antena parabólica com lóbulo principal alinhado ao eixo z, a função de ganho tem a forma definida pela Equação 2.22:

$$g(\theta, \varphi) = 4 \left| \frac{J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right|^2 \quad , \quad (2.22)$$

onde,

$$k = 2\pi/\lambda ;$$

$$a = D/2 = \text{raio de abertura.}$$

A Figura 5 ilustra o gráfico:

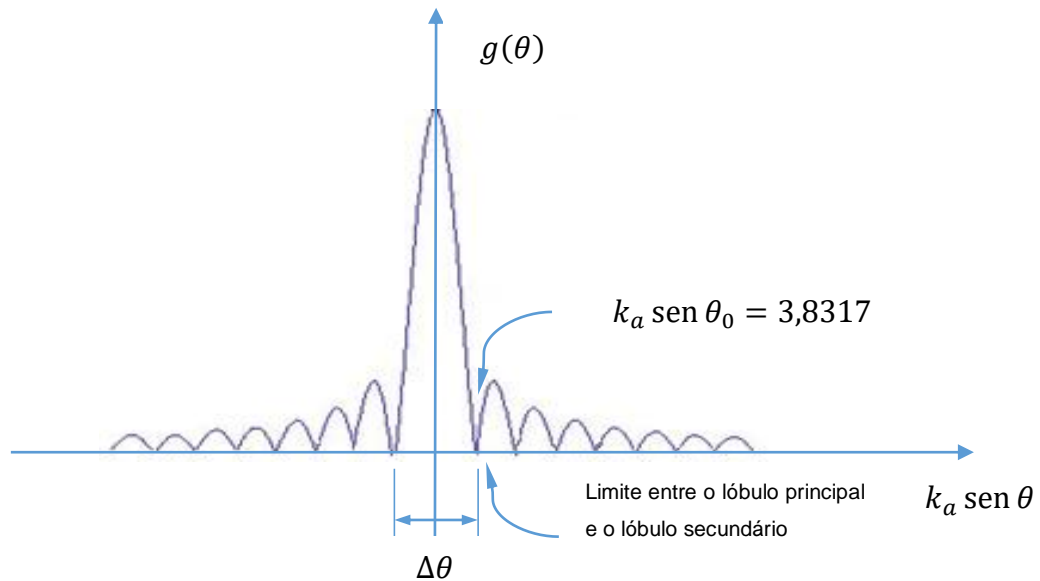


FIGURA 5 - GRÁFICO DA FUNÇÃO GANHO PARA UMA ANTENA PARABÓLICA. FONTE: O AUTOR.

A função  $J_1(x)/x$  tem seu primeiro zero no ponto  $x \neq 0$  onde  $J_1(x)$  anula-se, correspondendo a  $x_1 = 3,8317$ . Desse modo,

$$ka \operatorname{sen} \theta_0 = 3,8317 \quad ,$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} a \operatorname{sen} \theta_0 = 3,8317 \quad ,$$

se  $\theta_0 \ll \pi/2$  podemos fazer a aproximação  $\operatorname{sen} \theta_0 \approx \theta_0$  e temos:

$$\theta_0 = \frac{3,8317 \lambda}{2\pi a} = 0,61 \frac{\lambda}{a} \quad ,$$

uma vez que,

$$\Delta\theta = 2\theta_0 \text{ temos:}$$

$$\Delta\theta = 1,22 \frac{\lambda}{a} \text{ rad}$$

convertendo em graus tem-se:

$$\Delta\theta = 1,22 \frac{\lambda}{a} \frac{180^\circ}{\pi} \quad ,$$

$$\Delta\theta = 70^\circ \frac{\lambda}{a} \quad ,$$

conforme a expressão da Equação 2.21.

O ângulo de abertura de (-3dB) é menor, no entanto, sendo dado aproximadamente pela Equação 2.23:

$$\Delta\theta_{-3dB}^\circ \cong 30^\circ \frac{\lambda}{a} \quad . \quad (2.23)$$

## 2.7. TEORIA BÁSICA DO RADAR

Um radar, do inglês (*radio detecting and ranging*), é um sistema capaz de determinar distância e/ou velocidade de alvos remotos de modo mais ou menos preciso, através do uso de radiação eletromagnética, tipicamente na faixa de micro-ondas devido à possibilidade de uso de antenas de alto ganho (maior que 30dBi),[17]. Além disso a teoria da difração prevê que a resolução de um objeto detectado está associada ao comprimento de onda da operação do sistema de detecção. Nesse caso quer-se determinar propriedades de um objeto com dimensão  $d$  devemos usar  $\lambda \leq d$ . Tipicamente os alvos pontuais em sistema de radar têm dimensões na escala de poucos metros ou maiores, fazendo com que a faixa de micro-ondas seja amplamente empregada com boa resolução de detecção.

Um radar que utiliza a mesma antena para emitir e receber o sinal eletromagnético é denominado monoestático e é o mais usual no uso em aplicações meteorológicas.

Esquemáticamente um sistema de radar é apresentado na Figura 6.

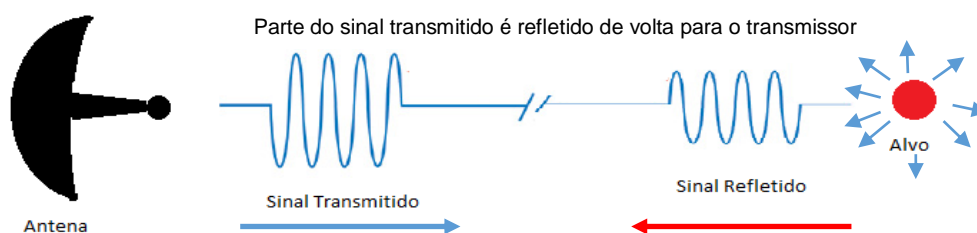


FIGURA 6 - ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM RADAR. FONTE: O AUTOR.

Supondo um alvo localizado em um ponto  $(r, \theta, \varphi)$  em relação ao sistema de referência do radar, cuja antena está na origem e sabendo-se que uma onda eletromagnética de frequência  $f$  desloca-se no ar com velocidade  $c \cong 3 \times 10^8 \text{m/s}$  podemos emitir um pulso de largura temporal  $\tau$  modulando a portadora  $f$ , numa direção do espaço para o qual o par de azimute e elevação  $\varphi$  e  $\alpha$  estejam correspondendo a direção de máximo ganho do lóbulos principal da antena.

Se um alvo está localizado em  $(r, \theta, \varphi)$  então espera-se que parte da onda espalhada retorne para a antena do radar.

A forma do sinal eletromagnético emitido pela antena é mostrado na Figura 7.

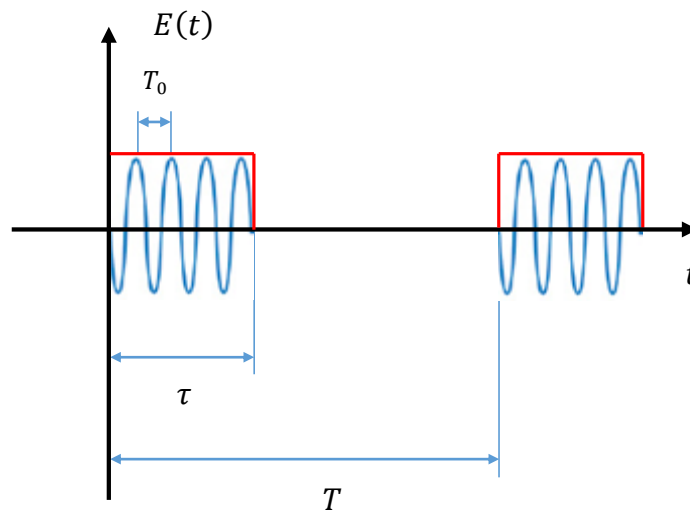


FIGURA 7 - FORMA DO SINAL ELETROMAGNÉTICO. FONTE: O AUTOR.

Onde,

$T_0 = \frac{1}{f}$  é o período da portadora de 2800 MHz.

$\tau \gg T_0$  é a largura do pulso emitido.

$T \gg \tau$  é o intervalo entre a emissão de um pulso e o próximo. Uma vez emitido um pulso o sistema espera receber um retorno no intervalo de tempo até emitir um novo pulso. A taxa de repetição de um radar é dada pela Equação 2.24, [18].

$$PRF = \frac{1}{T} \quad (2.24)$$

Obviamente um alvo à distância  $r$  do radar espalhará uma onda na direção do radar que levará um tempo  $\Delta t$  entre a emissão do pulso no radar e o seu retorno, ou seja:

$$c\Delta t = 2r \quad .$$

A distância percorrida pela onda é dada pelo percurso de ida de tamanho  $r$  e de volta, que também vale  $r$ , uma vez que o movimento do alvo pode ser desprezado, devido à baixa velocidade em comparação à velocidade da luz. Então:

$$r = c \frac{\Delta t}{2} \quad ,$$

uma vez que  $\Delta t$  deve satisfazer a condição:

$$\Delta t < T \quad ,$$

sob pena de ambiguidade, porque se  $\Delta t$  excede o período transcorrido entre um pulso e outro é impossível praticamente saber se o pulso retornado deve-se ao espalhamento do novo pulso emitido, ou ainda do antigo, define-se a máxima distância de alcance para detecção de alvos sem ambiguidade:

$$\Delta t < T \quad ,$$

$$\frac{2r}{c} < T = \frac{1}{PRF} \quad ,$$

de onde encontra-se a expressão da Equação 2.25.

$$r_{max} \cong \frac{c}{2PRF} \quad , \quad (2.25)$$

onde,

$r_{max}$  = máxima distância sem ambiguidade [m];

$PRF$  = frequência de repetição do pulso [Hz];

$c$  = Velocidade da luz (assumida a do vácuo) [ $3 \times 10^8$ m/s].

A velocidade radial de um alvo pode ser tomada pela medida de distância em dois instantes diferentes, ou por efeito *Doppler*. Supondo  $T_0 \ll \tau$ , a teoria da relatividade prevê um desvio na frequência da portadora, dependente da velocidade do alvo na forma expressa na Equação 2.26:

$$\Delta f = \pm 2 \frac{v}{c} f_0 \quad , \quad (2.26)$$

onde  $f_0$  é a frequência da portadora,  $v$  a velocidade do alvo, o sinal “+” corresponde à aproximação do alvo e o sinal “-” ao afastamento.

Do ponto de vista da análise de potência, se o radar tem uma potência disponível para transmitir  $P_t$ , a densidade de potência disponível que chega ao alvo é dada pela Equação 2.27:

$$S_{rad}(r, \theta, \varphi) = \frac{G(\theta, \varphi) P_T}{4\pi r^2} \quad , \quad (2.27)$$

conforme visto nos aspectos básicos de antenas.

Para um alvo pontual supõe-se uma seção de choque ou de espalhamento efetivo de alvo  $\sigma_{sc}$ . Idealmente o alvo absorve toda a potência incidente sobre sua seção de choque  $\sigma$  e reemite isotropicamente, ou seja, em todas as direções.

Embora a seção de choque de alvos reais dependa dos fatores geométricos do alvo e do ângulo de incidência da onda emitida pelo radar, a aproximação de seção de choque isotrópica permite boas estimativas da potência que será retornada pelo alvo para a antena do radar, [19], [20] e [21].

Temos então a Equação 2.28:

$$P_{alvo}^R = S_{rad}(r, \theta, \varphi) \cdot \sigma_{sc} = \frac{G(\theta, \varphi) P_T \sigma_{sc}}{4\pi r^2} \quad , \quad (2.28)$$

onde  $P_{alvo}^R$  é a potência absorvida pelo alvo na sua seção de choque  $\sigma_{sc}$ . Se o alvo re-irradia isotropicamente, ele cria uma densidade  $S'_{rad}(r, \theta', \varphi')$  na antena do radar definida pela Equação 2.29:

$$S'_{rad} = \frac{P_{alvo}^R}{4\pi r^2} \quad , \quad (2.29)$$

substituindo a Equação 2.28 em 2.29 encontra-se a Equação 2.30:

$$S'_{rad} = \frac{G(\theta, \varphi)P_T\sigma_{sc}}{(4\pi)^2r^4} \quad , \quad (2.30)$$

a potência coletada na antena do radar  $P_R$  depende de sua área efetiva, definida pela Equação 2.31:

$$A_{ef} = \frac{G\lambda^2}{4r} \quad , \quad (2.31)$$

na forma  $P_R = S'_{rad}A_{ef}$  definida pela Equação 2.32 ou seja:

$$P_R = \frac{P_T G^2 \sigma_{sc}}{(4\pi)^3 r^4} \lambda^2 \quad (2.32)$$

No caso de radar meteorológico não temos um alvo pontual e sim um conjunto de espalhadores, então a potência encontra-se definida pela Equação 2.33:

$$P_R \cong \frac{P_T \lambda^2}{(4\pi)^3} \int_{vol} \frac{G^2(\theta, \varphi) \sigma_{sc}}{r^4} r^2 \sin \theta \, dr \, d\theta \, d\varphi \quad , \quad (2.33)$$

onde,  $vol$  é o volume da região de espalhadores. Uma aproximação é conhecida como equação de Probert-Jones.

O ganho da antena e conseqüentemente o seu diagrama de radiação entram na determinação da potência recebida pelo radar que presumivelmente foi espalhado por um alvo que se quer detectar.

## 2.8. EQUAÇÃO DO RADAR METEOROLÓGICO DE PROBERT-JONES

A equação de [22] é a equação básica que define o funcionamento de todos os sistemas de radar meteorológicos. Ela relaciona todos os parâmetros operacionais

com a quantidade de energia refletida pelos hidrometeoros alvos. A relação de *Probert-Jones* é descrita na Equação 2.34.

$$P_R = \frac{P_t G^2 \theta^2 H \pi^3 K^2 L Z}{1024 (\ln 2) \lambda^2 R^2} \quad , \quad (2.34)$$

onde,

$P_R$  = Potência de sinal refletida na antena do radar [W];

$P_t$  = Potência de sinal Transmitida [W];

$G$  = Ganho da antena;

$\theta$  = Abertura do feixe da antena [graus];

$H$  = Largura do pulso [s];

$K^2$  = Constante dielétrica da água [adimensional];

$L$  = Fator de perdas atmosféricas (valor muito próximo de 1);

$Z$  = Fator de refletividade do alvo [ $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ];

$\lambda$  = Comprimento de onda do Transmissor [m];

$R$  = Distância do radar ao alvo [m].

O valor de  $K^2$  está relacionado ao valor da constante dielétrica da água (tipicamente 0,93 para chuva e 0,197 para gelo), para chuva seu valor é aproximadamente 1.

Da análise da Equação 2.34 observa-se que a potência do sinal refletida na antena do radar está correlacionada diretamente a parâmetros proporcionais tais como  $P_t$ ,  $G^2$ ,  $\theta^2$ ,  $H$ ,  $K^2$ ,  $L$  e  $Z$  e inversamente proporcionais a  $\lambda^2$  e  $R^2$ . Sabendo-se que a potência de sinal refletida na antena do radar depende da refletividade dos alvos e sendo os valores da potência de sinal transmitida, do ganho da antena, da abertura do feixe e do comprimento de onda fixos e inalterados pode-se duplicar a energia refletida dos alvos (precipitação) dobrando-se a largura de pulso. Esta técnica tem a desvantagem de diminuir a resolução dos *bins* do radar.

## 2.9. LARGURA DE PULSO E RESOLUÇÃO

Define-se a largura de pulso de um radar como sendo a menor distância visível entre alvos. No caso de um radar meteorológico é a menor distância entre duas células de tempestade separadas ao longo da linha central do feixe de radar, ou seja, na direção radial. Células de tempestade ou alvos que estiverem mais próximos que esta distância mínima, serão exibidas no radar como uma única célula chamada de *bin*. A resolução de azimute é determinada pela largura de feixe da antena,[3] e [23].

A resolução do alcance máximo é metade do comprimento do pulso pois considera-se o tempo de ida e volta do sinal. Esta é a resolução máxima definida pela física básica de radar. Esse valor pode ser calculado de relações geométricas simples. Um exemplo é mostrado na Figura 8.

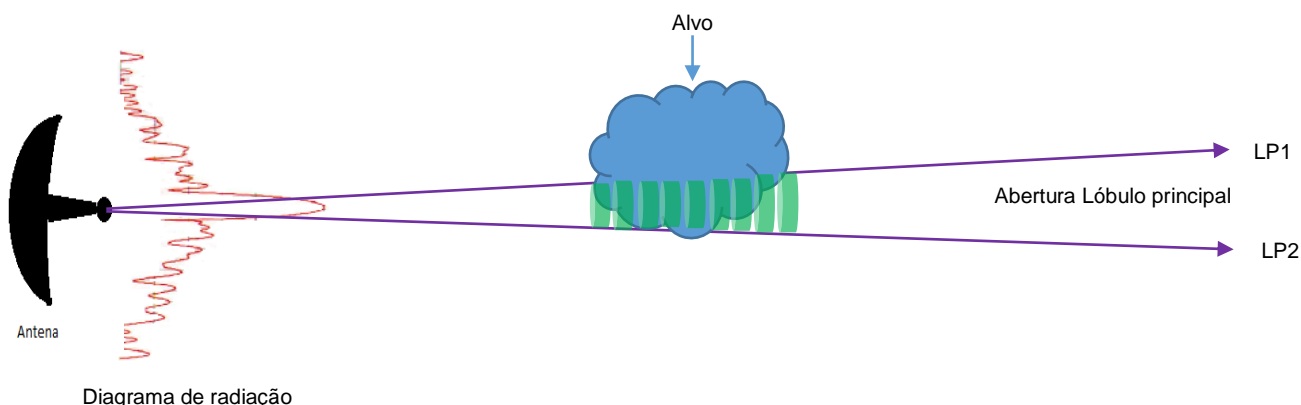


FIGURA 8 – COMPRIMENTO DE PULSO. FONTE: O AUTOR.

A Equação 2.35 descreve a relação entre a largura de pulso e a menor distância detectável pelo radar.

$$mbin = c \cdot \frac{H}{2} \quad , \quad (2.35)$$

onde,

$mbin$  = menor distância entre células;

$c$  = velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  [m/s]);

$H$  = largura de pulso [s].

Outros fatores práticos podem reduzir a resolução real. Por exemplo, se o processador de sinal do radar não tem capacidade para processar todos os *bins* (volumes formados pela abertura radial do feixe em função da distância e pela largura de pulso) rápido o suficiente, a resolução será perdida, mesmo que o radar utilize pulsos muito estreitos.

Para fins meteorológicos operacionais, tais como o fornecimento de avisos de proximidade de tempo severo, chuvas pesadas, a resolução de 3km ou mais é suficiente para a maioria destes eventos.

Portanto, as larguras de pulso de 10 microssegundos podem atender a proposição da equação *Probert-Jones* de precipitação preenchendo todo o volume do pulso e fornecer dados precisos para eventos a grandes distâncias.

Muitas vezes, operacionalmente, utiliza-se uma maior largura de pulso o que ocasiona a perda de resolução, dependendo da situação esta perda não é significativa, devido ao tamanho relativamente grande dos alvos meteorológicos. Na verdade, a diminuição da resolução é compensada mediante o aumento da visibilidade para uma precipitação fraca, usando-se a maior largura de pulso.

## 2.10. ECOS DE TERRENO

Define-se o ruído conhecido como eco de terreno ou *groundclutter* como sendo a potência recebida pelo sistema de radar, quando parte de sua radiação é refletida de volta ao radar pelo próprio terreno em torno da antena do radar, conforme ilustrado na Figura 9, o qual irá interpretar como sendo a existência de um alvo real, [6], [24] e [25].

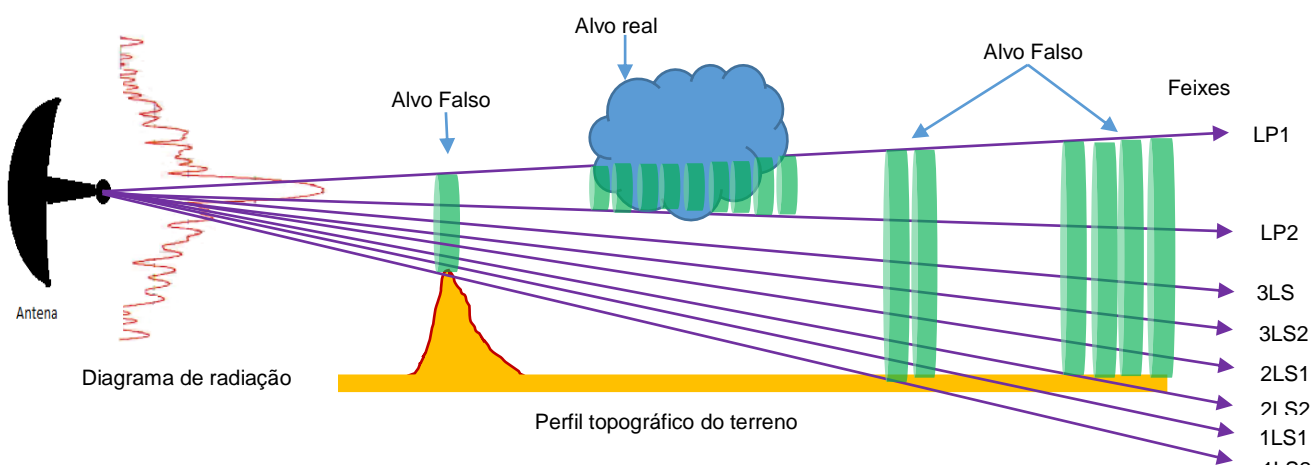


FIGURA 9 – ECOS DE TERRENO. FONTE: O AUTOR.

Em radares meteorológicos, os ecos de terreno geralmente são definidos como sendo sinais de ecos provenientes de alvos terrestres para a antena de radar. A referência [3] menciona que os ecos de terreno normalmente estão limitados à cerca de 48 km da antena de um radar. Além disso, os ecos de terreno são geralmente evidentes nas elevações mais baixas da antena de radar.

Devido ao fato da topografia em torno de cada *site* de radar ser diferente, cada radar apresenta um padrão exclusivo, persistente e único de eco de terreno,[26].

Um radar não consegue detectar um alvo, ou melhor discernir um alvo em uma região que possua ecos de terreno, seja este localizado na superfície do mar ou da Terra. Os ecos de contaminação indesejados interferentes podem limitar severamente a detecção de um alvo desejável. [27].

Uma maneira usada para classificar e caracterizar os ecos de terreno é através utilização de estatísticas de amplitude que são tipicamente relatadas como distribuições de Rayleigh, Weibull, Ricean ou distribuições lognormal. [04] [19], [28], [29] e [30].

## CAPÍTULO 3

# ESTIMADOR DE ECOS DE TERRENO

### 3.1. INTRODUÇÃO

O estimador implementado neste trabalho utiliza os princípios da óptica geométrica para análise da interação entre o feixe radiado a partir da antena do radar meteorológico e o relevo da região de alcance do radar, [39].

No algoritmo de estimação são considerados fenômenos de propagação do feixe devido ao efeito da refratividade da atmosfera e curvatura da Terra. A inclusão de tais fenômenos apesar de válida e ser indispensável no estudo da propagação de sinais eletromagnéticos, como apresentado por [31], bem como o propagador utilizando um propagador com equações paraxiais, consultar [44], podem ser implementados como eventual continuação deste trabalho.

Os resultados obtidos com o estimador de ecos de terreno para radar meteorológico, tem como seu foco a análise da contaminação proveniente dos ecos não meteorológicos, sua localização e dimensão, no processo de instalação de um novo sistema de radar ou no projeto de uma rede de radares.

### 3.2. SOFTWARE DE DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do estimador apresentado neste trabalho foi feito em um microcomputador com processador Intel i5, memória de 4GB, disco rígido de 400GB, sistema operacional *Windows 7*, Matlab R2013, base de dados *SRTM* e conexão à internet.

Escolheu-se o MATLAB (acrônimo de *MATRIX LABORATORY*) [32], por tratar-se de um poderoso ambiente de trabalho usado para implementar e analisar algoritmos numéricos, além de ter capacidade gráfica, pois o resultado da estimação é apresentado na forma essencialmente gráfica com a imagem dos ecos de terreno sobreposta a um mapa em coordenadas geográficas.

O algoritmo implementado faz conexão a uma base de dados topográfica, instalada localmente para extrair a informação de altimetria do relevo, após o

processamento dos ecos de terreno é feita uma conexão ao *googlemaps* pela internet com o intuito de obter os mapas atualizados da região simulada.

O tempo de execução da estimação depende do local escolhido, do modelamento dos lóbulos da antena e do ângulo de elevação da antena. A estimação total para o radar de Teixeira Soares com uma elevação de  $0,3^\circ$  utilizando o microcomputador descrito acima é de aproximadamente 10 minutos.

### 3.3. FLUXOGRAMA

Nas Figuras 10 e 11 é representado o fluxograma com os principais passos do algoritmo. O tratamento da propagação dos feixes é feito a partir do traçamento de feixes que se propagam a partir da antena, as coordenadas onde ocorrem as obstruções dos feixes são armazenadas. Após o processamento, os ecos de terreno são exibidos sob um mapa da região de interesse.

Na Tabela 2 segue o significado das siglas usadas no fluxograma.

TABELA 2 - SIGLAS UTILIZADAS

Feixes dos Lóbulos da Antena	
LP1	Primeiro feixe da abertura Lóbulo Principal
LPC	Feixe central do Lóbulo Principal
LP2	Segundo feixe da abertura Lóbulo Principal
1LS1	Primeiro feixe da abertura do 1º Lóbulo Secundário
2LS1	Primeiro feixe da abertura do 2º Lóbulo Secundário
3LS1	Primeiro feixe da abertura do 2º Lóbulo Secundário

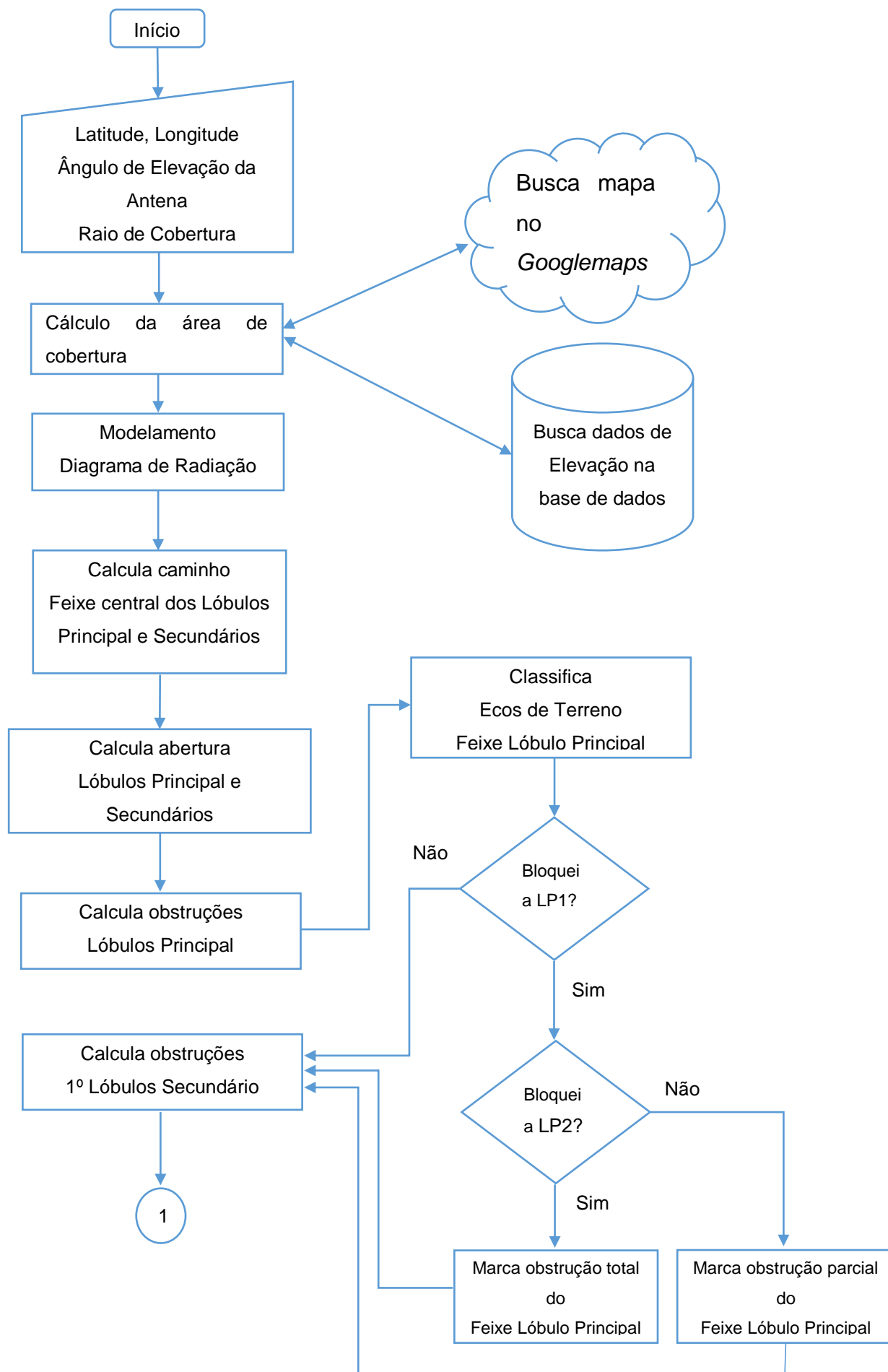


FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO. PARTE 1. FONTE: O AUTOR.

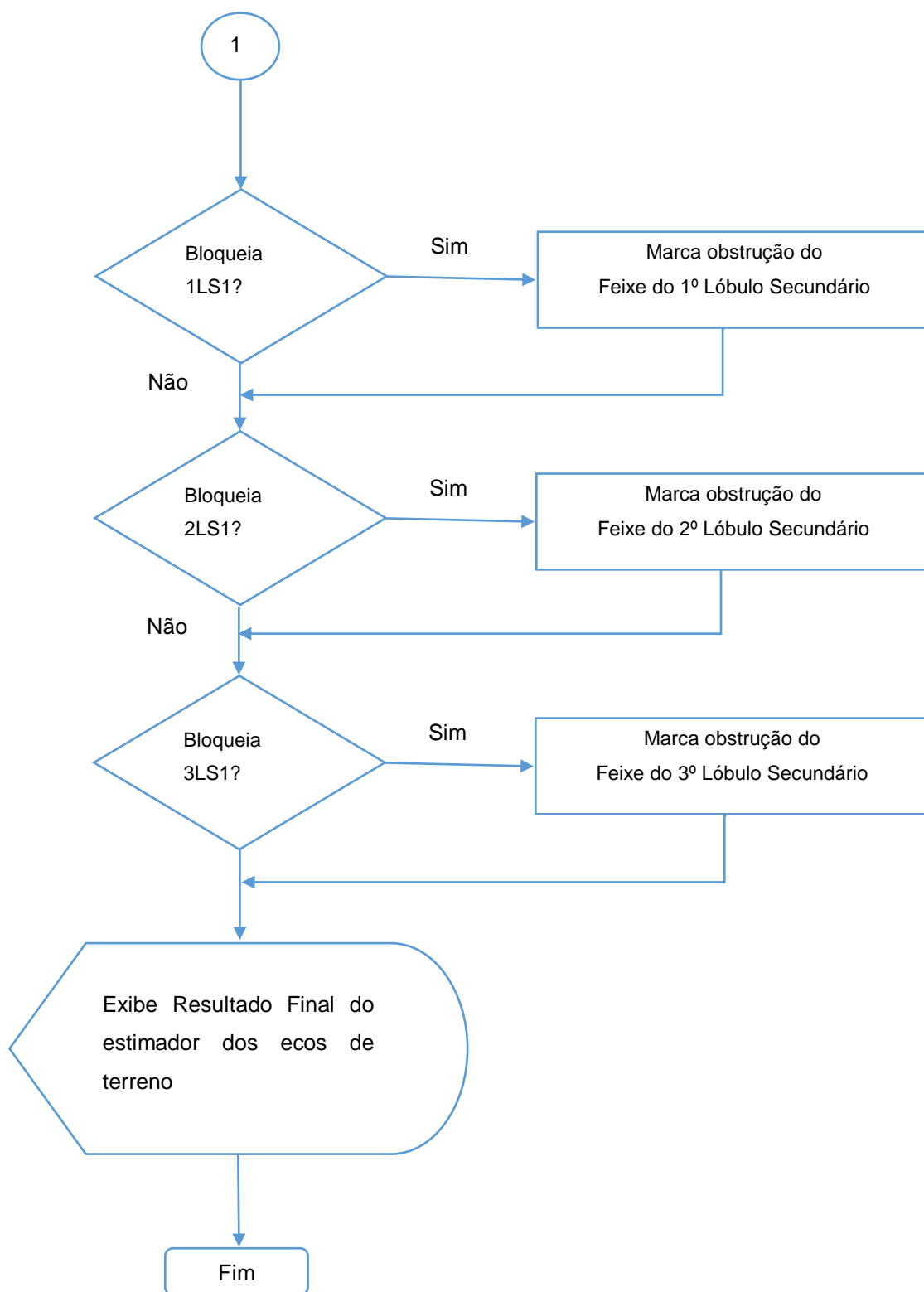


FIGURA 11 - FLUXOGRAMA DO ALGORITMO. PARTE 2. FONTE: O AUTOR

### 3.4. DADOS DE ENTRADA

No início da estimação é necessário que sejam definidos os dados de entrada, tais como as coordenadas de latitude e longitude do sítio do radar, raio de cobertura desejado, altura da torre (edifício), altura do alimentador, ângulo de elevação da antena, ângulos de abertura dos lóbulos principal e secundários, bem como sua posição angular relativa em relação ao lóbulo principal. Estes parâmetros encontram-se agrupados na Tabela 3 para estimação dos ecos de terreno do radar de Teixeira Soares. As informações Técnicas e localização do radar de Teixeira Soares, foram obtidas com o SIMEPAR.

TABELA 3 - DADOS DE ENTRADA DO ESTIMADOR

Radar de Teixeira Soares	
Latitude	-25° 30' 18,62379"
Longitude	-50° 21' 40,39508"
Raio de cobertura	200 km
Altura da torre	25m
Altura até a posição do alimentador	4,5 m
Elevação da antena	0,3°
Posição angular Lóbulo Principal	0°
Posição angular 1° Lóbulo Secundário	-2,7°
Posição angular 2° Lóbulo Secundário	-1,9°
Posição angular 3° Lóbulo Secundário	-1,3°
Ângulo de abertura Lóbulo Principal	1°
Ângulo de abertura 1° Lóbulo Secundário	0,5°
Ângulo de abertura 2° Lóbulo Secundário	0,25°
Ângulo de abertura 3° Lóbulo Secundário	0,125°

As coordenadas de latitude e longitude do radar de Teixeira Soares foram obtidas com um GPS modelo *Pathfinder Pro* da marca Trimble, com acurácia pós-processamento de 30 cm. Escolheu-se o raio de cobertura de 200 km, por ser utilizado na operação do radar durante sua operação. A especificação da altura da torre e altura do alimentador da antena foram obtidos das especificações técnicas do radar. Na Figura 12 ilustram-se estes parâmetros.

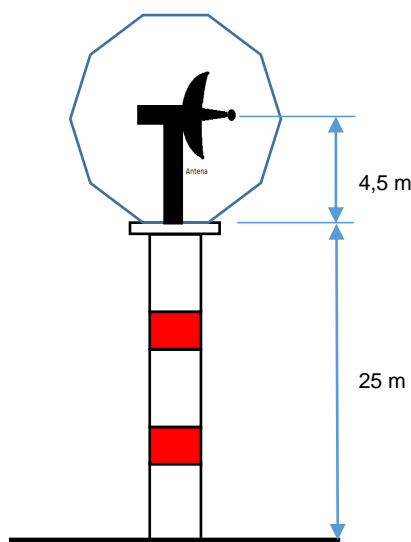


FIGURA 12 - ILUSTRAÇÃO DA TORRE DO RADAR DE TEIXEIRA SOARES. FONTE: O AUTOR

### 3.5. CÁLCULO DA ÁREA DE COBERTURA

Após a definição dos parâmetros vistos na Tabela 3, dá-se início a execução da estimativa. A primeira rotina executada é a que calcula a área de cobertura do radar, na qual partindo-se das coordenadas centrais (localização do radar), extrai-se da base de dados as informações sobre a topografia (altimetria do relevo), montando-se um vetor com a informação necessária, [33].

A extração da informação de topografia é feita a partir das coordenadas de dois pontos, ou seja, o primeiro ponto é sempre a localização do radar (latitude e longitude) e o segundo ponto é definido pelo local de interesse, no caso sendo toda região de cobertura do radar (todas as direções,  $360^{\circ}$ ) a uma distância de 200km de sua localização. Para tal, calcula-se as coordenadas para um conjunto de 360 posições que estão compreendidas num círculo com o raio definido pelo raio de cobertura, na Figura 13 ilustra-se a área de cobertura. Pode-se definir outro número de posições, utilizou-se o número de 360 pois o valor do ângulo de abertura da antena é de  $1^{\circ}$ , dependendo da situação pode-se alterar este valor para obter-se mais ou menos raios de cobertura para a estimativa.

Sabendo-se que a Terra tem superfície geoide, para o cálculo das coordenadas de latitude e longitude das 360 posições necessárias, faz-se a conversão do raio de cobertura supracitado de uma distância linear para uma distância ortodrômica, conforme a Equação 3.1.

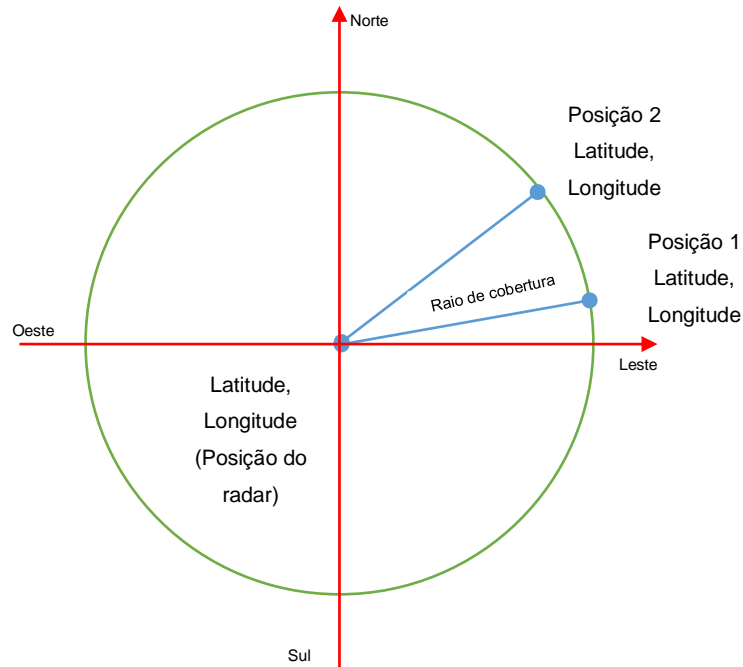


FIGURA 13 – RAIOS DE COBERTURA DO RADAR. FONTE: O AUTOR

$$\Delta = \frac{d}{111,276} \quad , \quad (3.1)$$

onde,

$\Delta$  = distância [graus];

$d$  = distância linear [km].

O cálculo das coordenadas de latitude e longitude para as 360 posições é feito usando as Equações (3.2, 3.3).

$$lat\_pto = \Delta \cdot \cos \theta + lat\_or \quad , \quad (3.2)$$

$$lon\_pto = \Delta \cdot \sen \theta + lon\_or \quad , \quad (3.3)$$

onde,

$Lat_{pto}$  = Latitude do raio de cobertura [graus];  
 $Lon_{pto}$  = Longitude do raio de cobertura [graus];  
 $\Delta$  = distância do raio de cobertura [graus];  
 $\theta$  = ângulo do raio de cobertura [graus];  
 $Lat_{or}$  = Latitude da localização do radar [graus];  
 $Lon_{or}$  = Longitude da localização do radar [graus].

A partir de uma sub-rotina de extração de perfis de topografia extrai-se da base de dados *STRM* as informações de topografia de cada raio da área de cobertura e as armazena em 360 vetores.

### 3.6. CONEXÃO AO GOOGLEMAPS

Para conexão com os mapas do *Googlemaps*, fez-se uso da função, `plot_google_map.m` que utiliza o conjunto de API's do *Google* [34]. A função busca o mapa no banco de dados do *Google* para compor o pano de fundo do resultado da estimação.

As coordenadas dos mapas estão no sistema de referência WGS84, [35]. Utilizam-se as coordenadas definidas para buscar a imagem do mapa do *Google*.

O nível de *zoom* do mapa é determinado automaticamente para cobrir toda a área da figura. Além disso, tem-se a opção de atualização automática do mapa com *zoom* na figura, revelando mais detalhes.

O código a seguir produz a imagem da tela na Figura 14:

```
Plot(Lon,Lat,.r,MarkerSize,20);
Plot_google_map(MapType,roadmap);
```



FIGURA 14 - MATLAB USANDO API DO GOOGLE. FONTE: O AUTOR

### 3.7. BANCO DE DADOS TOPOGRÁFICOS SRTM

De início percebeu-se que para o desenvolvimento do algoritmo, seria necessário o uso de um banco de dados adequado ao trabalho proposto para que a informação da estimativa dos ecos de terreno corresponda as medidas de um radar real.

Após pesquisa, verificou-se a possibilidade de utilização do banco de dados SRTM, do inglês, *Shuttle Radar Topography Mission*, que foi uma missão do Ônibus Espacial Endeavour, [45]. Trata-se de um esforço internacional de pesquisa que obteve modelos digitais de elevação em escala global para gerar o banco de dados topográficos digital mais completo e de alta resolução da Terra, [8], [33], [36], e [37]. Para adquirir dados topográficos (elevação), o ônibus espacial foi equipado com duas antenas de radar utilizando a técnica conhecida como interferometria de Radar de abertura sintética, consultar [37].

Os dados utilizados estão com resolução espacial de 3 segundos de arco, ou seja, aproximadamente 90 m, [36].

A partir das coordenadas definidas para a estimação do radar e das 360 coordenadas calculadas, são extraídos do banco de dados *SRTM* os dados de topografia para cada um dos raios e armazenadas as elevações em vetores distintos.

Utilizou-se para tal, a função `getSRTMdata.m` criada por [38], que permite que sejam extraídos dados de altitude de arquivos do *SRTM* para uma ou várias coordenadas, bem como uma linha de elevações entre duas coordenadas.

### 3.8. MODELAMENTO DOS FEIXES DO RADAR METEOROLÓGICO

Para radares meteorológicos de antenas parabólicas, o feixe tem uma distribuição de energia semelhante ao padrão de difração de luz passando através de uma fenda [11]. A maior parte da energia está localizada no centro do feixe e diminui ao longo de uma curva semelhante a uma função gaussiana. No entanto, existem no feixe picos secundários de emissão provenientes dos lóbulos secundários.

Na estimação, considerou-se a propagação do lóbulo principal, bem como dos lóbulos secundários. Sabendo-se que a energia transmitida pelos lóbulos secundários é menor, ela chega ao mesmo tempo que a energia proveniente do lóbulo principal, causando a contaminação da informação.

Da mesma forma que a abertura do lóbulo principal aumenta com a distância, observa-se o mesmo efeito nos lóbulos laterais. Na Figura 15 observa-se as aberturas dos lóbulos principal e laterais da antena, tomando-se como referência o eixo do lóbulo principal. Os lóbulos secundários causam incrementos nos sinais captados pelo lóbulo principal tanto no azimute quanto na elevação da antena.

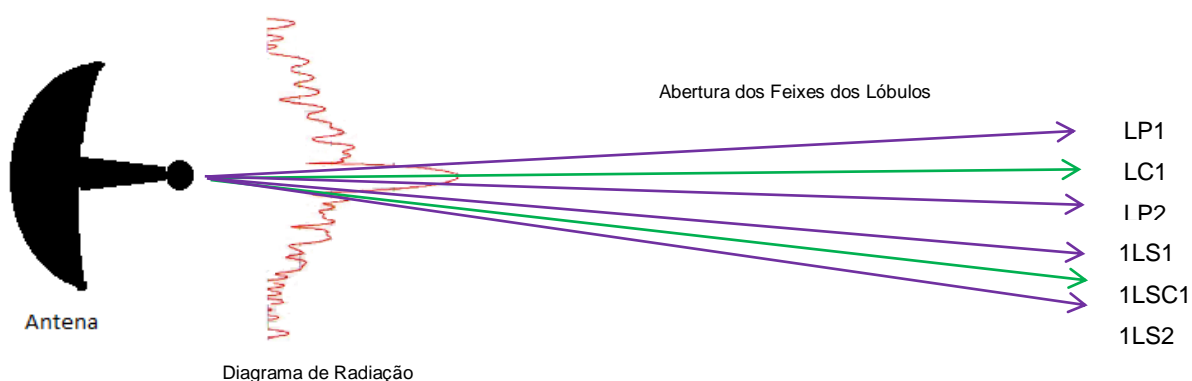


FIGURA 15 - ILUSTRAÇÃO DA ABERTURA DOS LÓBULOS DA ANTENA E POSIÇÃO DOS FEIXES EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA. FONTE: O AUTOR.

Para tal, partiu-se da análise do diagrama de radiação da antena de radar real, fornecido pelo fabricante do radar, conforme a Figura 16, modelou-se os feixes de propagação (lóbulos principal e secundários ilustrados em vermelho) do sinal eletromagnético utilizando uma abordagem análoga ao da óptica newtoniana [39], considerando os feixes percorrendo as trajetórias dos eixos centrais e laterais dos lóbulos de propagação.

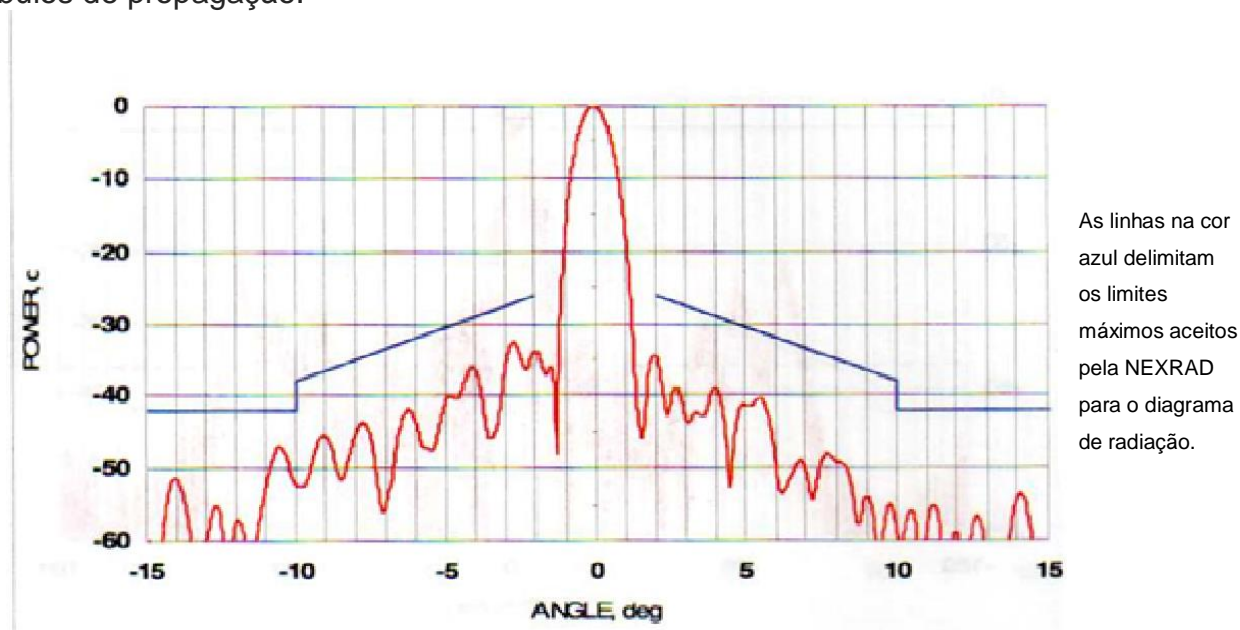


FIGURA16 - DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DA ANTENA DE RADAR 2,8 GHZ, 45 DBI. FONTE: [46].

Para definição das trajetórias dos feixes, inicialmente buscou-se os eixos centrais dos lóbulos principal e secundários conforme ilustrado na Figura 17. Segundo [3] e [40], o valor de elevação utilizada em sistemas de radar, está situado entre  $0,3^\circ$  e  $0,5^\circ$ , assim sendo, limitou-se o estudo dos lóbulos para a região menor que  $3^\circ$ , pois ângulos maiores atingem o solo a distâncias muito próximas ao radar não tendo contribuição na composição de ecos de terreno a distâncias maiores que 600 m da antena do radar.

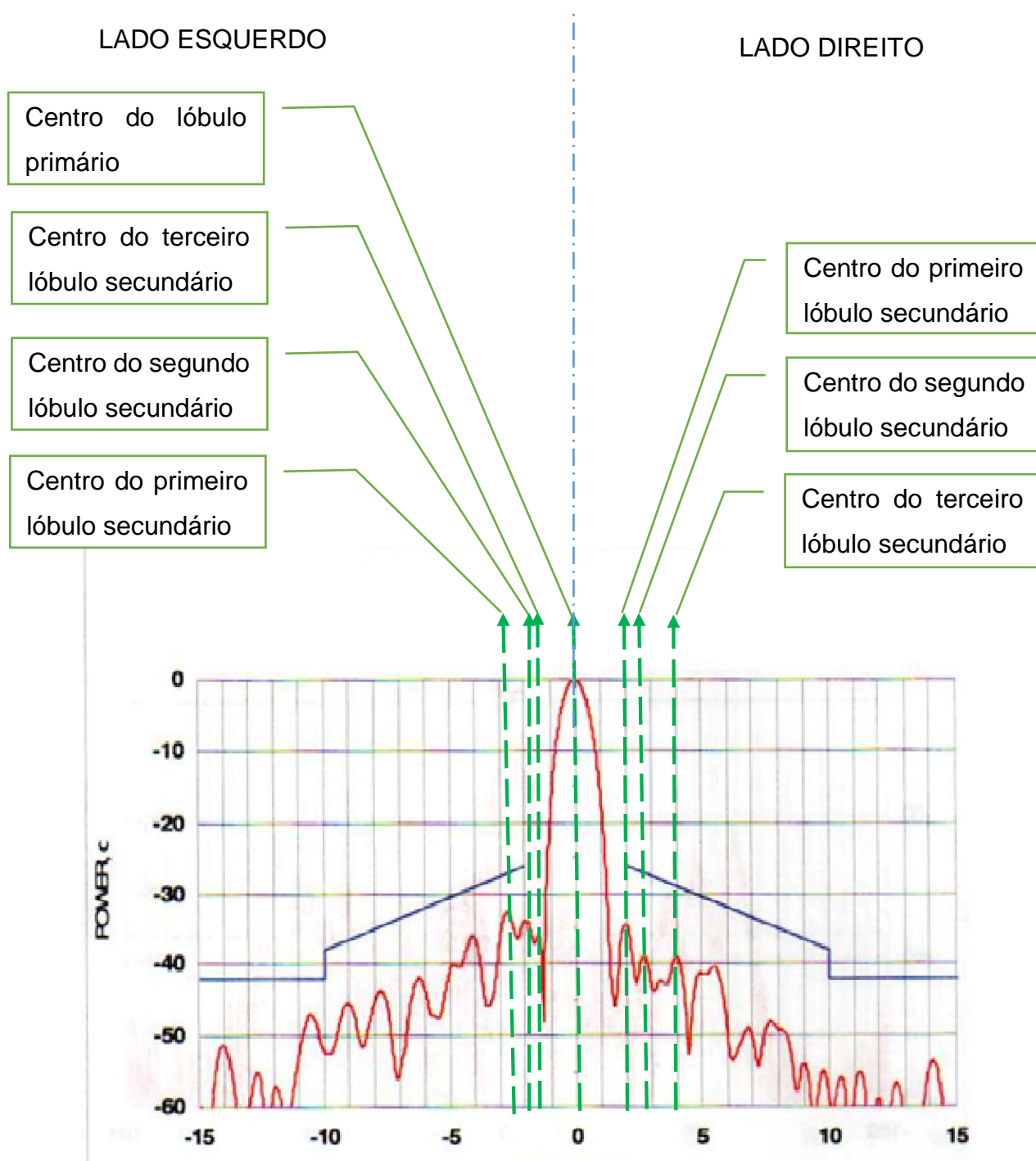


FIGURA 17 - FEIXES SOBREPOSTOS AO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DA ANTENA. FONTE: [46].

Toma-se a posição central do lóbulos principal como referência e a posição dos centros de cada lóbulos secundário, ou seja, seu valor em coordenadas polares, observados visualmente no diagrama de radiação e também reportados na Tabela 4. Calcula-se então, as trajetórias destes como sendo feixes radiados a partir da antena

em direção à topografia perfazendo 360° de azimute, cobrindo espacialmente toda a área de alcance do radar, utilizando para tal, a equação definida por [41].

TABELA 4 - DADOS EXTRAÍDOS DO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO

Lóbulo	Lado esquerdo		Lado Direito	
	Potência	Posição Angular	Potência	Posição Angular
Principal	0 dB	0°	0 dB	0°
Primeiro Secundário	- 27 dB	-2,7°	-35 dB	2°
Segundo Secundário	-35 dB	-1,9°	-37 dB	2,7°
Terceiro Secundário	-37 dB	-1,3°	-38 dB	3,0°

Da análise visual dos valores de potência em dB da Tabela 4, nota-se que na região delimitada os lóbulos do lado esquerdo do diagrama de radiação possuem maior intensidade de pico que os do lado direito, bem como o módulo das posições angulares médias ser menor que o lado direito, indicando uma maior energia de propagação que o lado direito, para a faixa até 3° de distância do lóbulo principal.

Na Figura 18, ilustra-se a interação entre os feixes irradiados da antena de radar com o relevo. No caso dos ecos de terreno, os feixes mais próximos ao solo são os causadores dos ecos de terreno, implicando que para este estudo leva-se em conta somente parte do diagrama de radiação que radia lóbulos mais próximos ao solo e, ao mesmo tempo, à maior distância possível. Assim, tomou-se o lado esquerdo do diagrama de radiação, pois este lado tem os lóbulos secundários mais próximos ao lóbulo principal tendo maior alcance para captação de ecos de terreno.

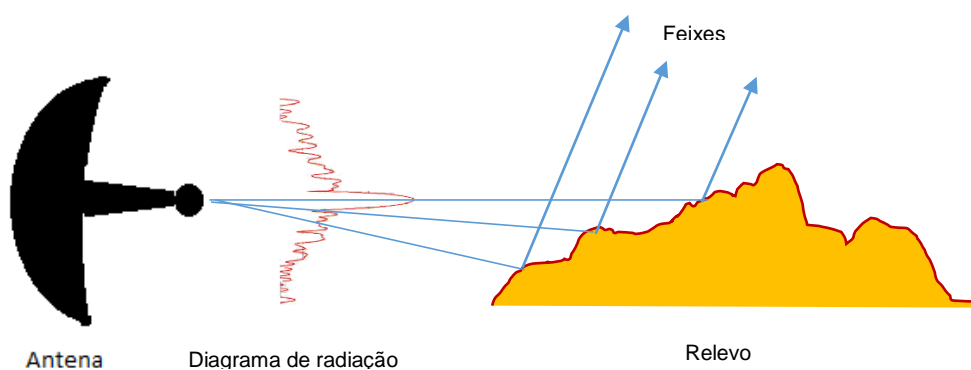


FIGURA 18 - ITERAÇÃO DO PADRÃO DE RADIAÇÃO COM O RELEVO. FONTE: O AUTOR.

Sabendo-se que o ângulo de abertura de uma antena é definido pelo ângulo de abertura à meia potência do pico de potência do lóbulo principal, conforme [16], para cada um dos lóbulos indicados na Tabela 4, calcula-se o ângulo de abertura, utilizando-se os conceitos abordados no capítulo anterior. Os valores das aberturas dos lóbulos podem ser observados na Tabela 5.

TABELA 5 - ÂNGULO DE ABERTURA PARA CADA LÓBULO

Lóbulo Principal	1°
1° Lóbulo Secundário	0,5°
2° Lóbulo Secundário	0,25°
3° Lóbulo Secundário	0,125°

A medida que os lóbulos são irradiados pela antena do radar a abertura dos lóbulos aumenta, sendo proporcional à distância do radar, conforme ilustra a Figura 19.

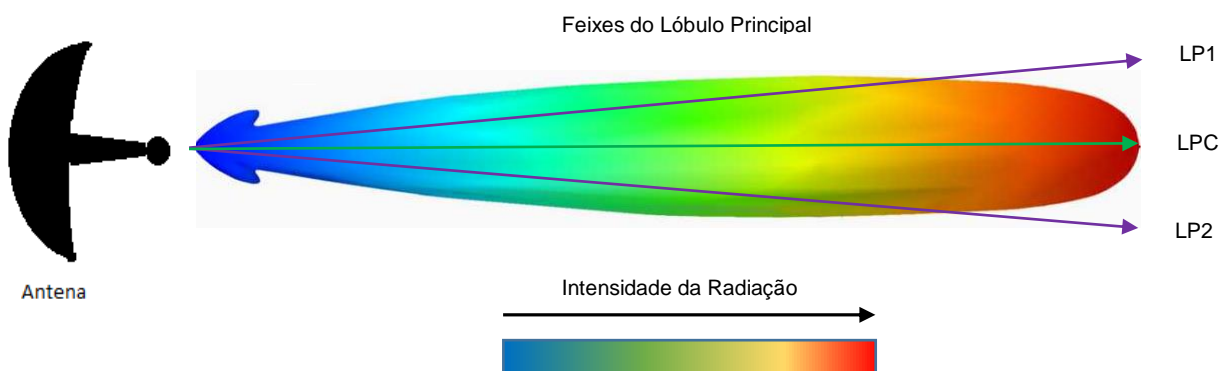


FIGURA 19 - ABERTURA DO FEIXE DA ANTENA. FONTE: O AUTOR

Na Figura 20 pode ser observado a relação de abertura para cada um dos lóbulos, sendo indicada na cor verde a posição do feixe central e na cor roxa os feixes laterais de cada um dos lóbulos, indicando a abertura de cada um deles.

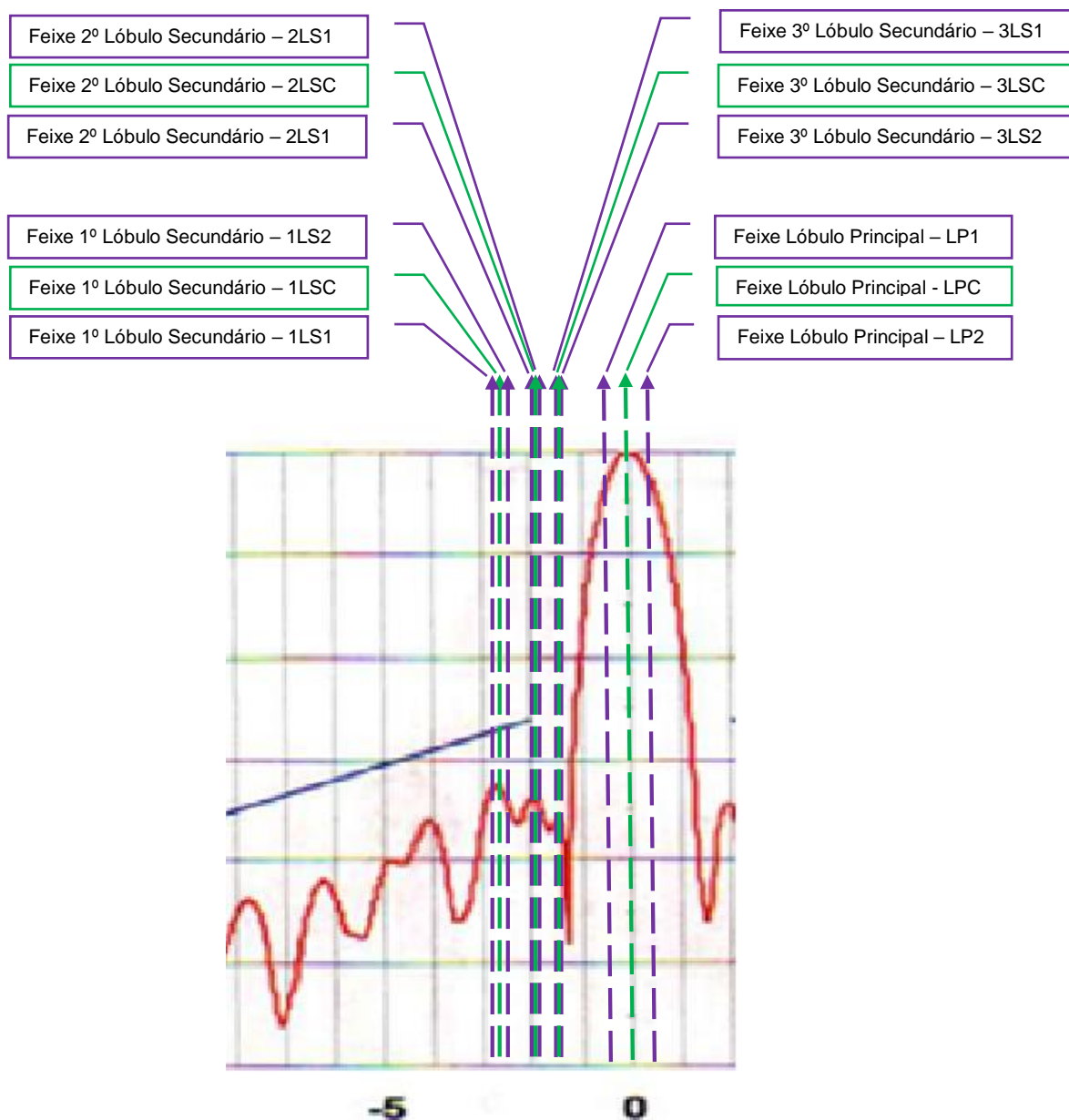


FIGURA 20 - ABERTURA DOS FEIXES SOBREPOSTO AO LADO ESQUERDO DO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO DA ANTENA. FONTE: [46].

### 3.9. EQUAÇÃO DA ALTURA MÉDIA DO FEIXE DO RADAR EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA

Para que o estimador represente os sinais o mais correto possível, faz-se necessário modelar a altura do feixe em função da distância do radar, ou seja corrigir a altura do feixe devido à curvatura da Terra, pois a base de dados *SRTM* representa a projeção da Terra no plano. Na Figura 21, ilustram-se as alturas dos feixes corrigidas

e sobrepostas ao perfil do relevo, nota-se que a medida que os feixes se afastam ocorre a curvatura dos mesmos.

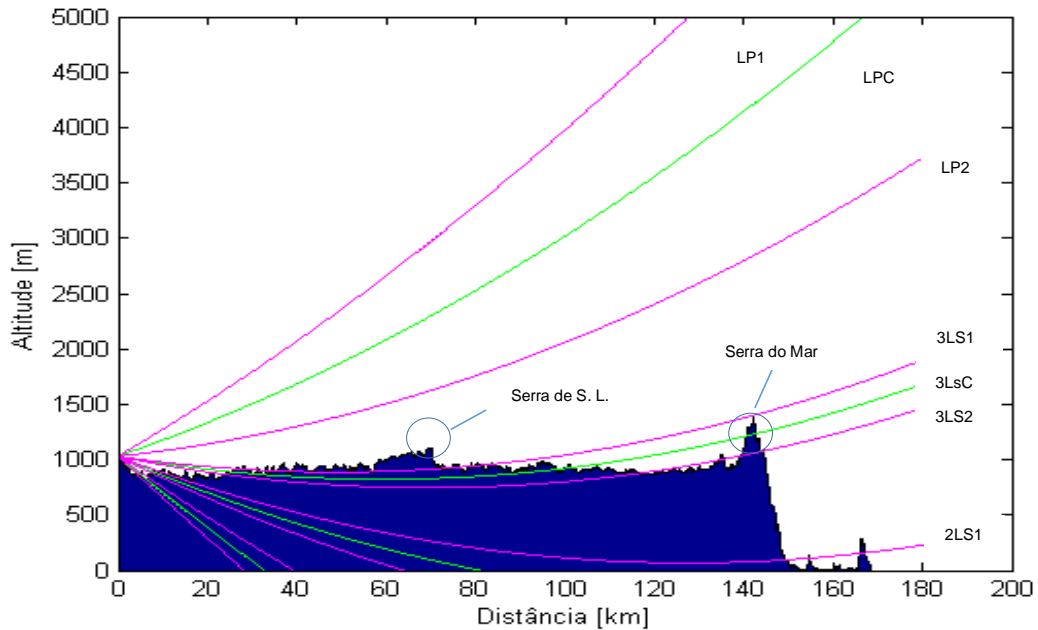


FIGURA 21 - PERFIL DO RELEVO / FEIXES LÓBULOS PRINCIPAL E SECUNDÁRIOS. FONTE: O AUTOR

Na literatura, [41], fornece uma expressão completa para a altura do feixe em função da distância, conforme a Equação 3.4.

$$h = \{r^2 + (k_e R)^2 + 2rk_e R \sin \theta_e\}^{\frac{1}{2}} - k_e R + h_0 \quad , \quad (3.4)$$

onde,

$h$  = altura do feixe [m];

$h_0$  = altura relativa ao nível do mar [m];

$r$  = distância do radar [m];

$\theta_e$  = ângulo de inclinação da antena [graus];

$k_e = \frac{4}{3}$  (fator correspondente à condição de atmosfera padrão conforme

descrito no Capítulo 2 item 2.2.2);

$R$  = raio real da Terra [km].

Implementou-se a Equação 3.4 no estimador, pois através dela é possível prever o caminho médio do feixe pela atmosfera. Pode-se assim dar início ao algoritmo de localização da topografia causadora dos ecos de terreno.

### 3.10. EQUAÇÃO DA ABERTURA DO FEIXE DO RADAR EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA

A partir da determinação da altura central do feixe, fez-se necessário a determinação da abertura do feixe e a determinação da altura superior do feixe, bem como de sua altura inferior. Em [41], apresenta-se a relação descrita na Equação 3.5 para abertura total do feixe em função do ângulo de abertura e da altura do feixe.

$$s = k_e R \operatorname{sen}^{-1} \left( \frac{r \cos \theta_e}{k_e R + h} \right) \quad , \quad (3.5)$$

onde,

$s$  = Abertura do feixe [m];

$k_e = 4/3$ ;

$R$  = raio real da terra [m];

$r$  = distância [m];

$h$  = Altura do feixe [m];

$\theta_e$  = ângulo de inclinação da antena [graus].

Na Figura 22, observa-se que a projeção da abertura do feixe da antena em função do ângulo de inclinação da antena é representada conforme a Equação 3.6.

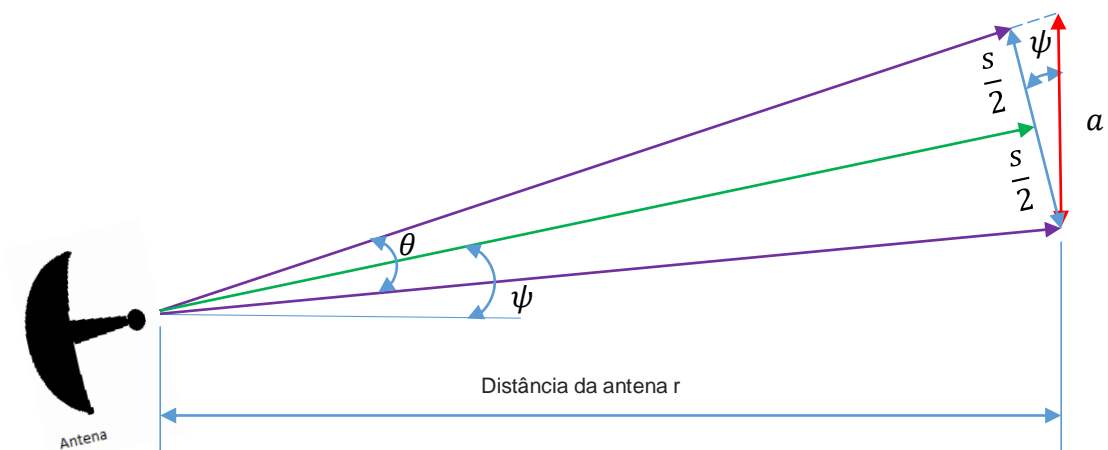


FIGURA 22 – PROJEÇÃO DA ABERTURA DO FEIXE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE ELEVAÇÃO. FONTE: O AUTOR

Utilizou-se na estimação ângulos de elevação muito pequenos, pois sistemas de radares meteorológicos os ecos de terreno são captados em ângulos de elevação da antena muito pequenos, como verificado em [40]. Inicialmente definiu-se o ângulo de elevação em  $0,3^\circ$ , observando-se a Figura 22 e utilizando-se a Equação 3.6, verifica-se que o resultado do cosseno do ângulo é aproximadamente 1, sendo a correção desprezível nesta situação.

$$a = \frac{s}{\cos \psi} \quad , \quad (3.6)$$

onde,

$\psi$  = ângulo de elevação da antena [graus];

$s$  = abertura do feixe [m];

$a$  = projeção da abertura do feixe [m].

Como  $\psi \cong 0,3$ , constata-se que  $\cos \psi \cong 1$ , então  $a \cong s$ . Assim sendo, verifica-se que para valores baixos de elevação da antena a projeção da abertura da antena tem o mesmo valor da abertura. Assumindo que para o trabalho proposto a atmosfera é homogênea e isotrópica, a abertura dos feixes comporta-se de forma linear e sua análise pode ser feita de forma geométrica como indicado na Figura 23. Obtém-se a relação mostrada na Equação 3.7.

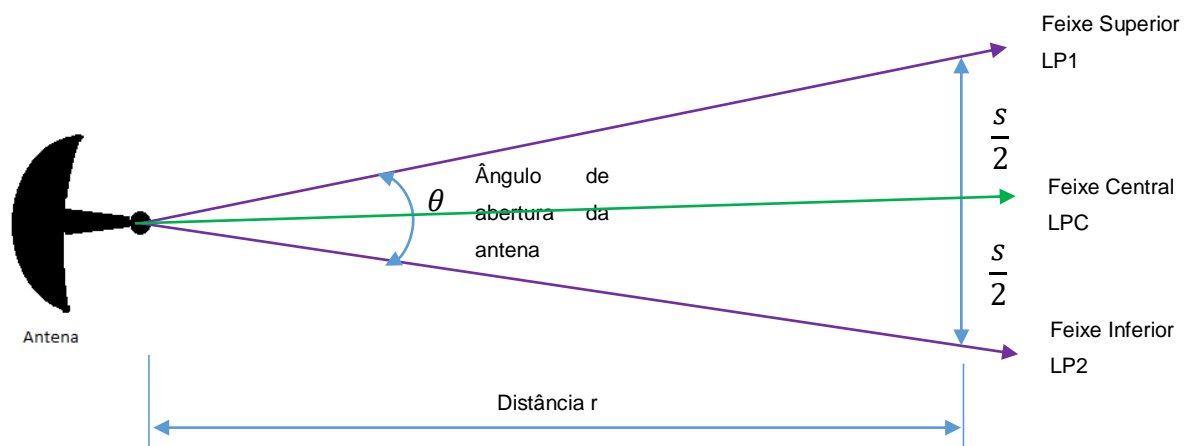


FIGURA 23 - ESQUEMA DE ABERTURA DO FEIXE. FONTE: O AUTOR

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{s}{2r} \quad , \quad (3.7)$$

onde,

$\theta$  = ângulo de abertura do feixe [graus];

$s$  = abertura do feixe [m];

$r$  = distância em relação à antena [m].

Observa-se que a largura real física do feixe de radar depende da distância para o radar. Por exemplo, para um radar com um ângulo de abertura de  $1^\circ$ , verifica-se que a 30 quilômetros do radar, o feixe principal tem aproximadamente 523 metros de largura. A 100 quilômetros, o feixe tem cerca de 1745 metros de largura.

Assim sendo, no algoritmo proposto, calcula-se a altura do feixe central para todos os lóbulos para o raio de cobertura do radar utilizando a Equação 3.5. Em seguida, calcula-se as aberturas do feixe em função da distância para cada altura do feixe central utilizando a Equação 3.6. A partir destes cálculos são definidos três vetores para cada lóbulo, compostos das alturas de cada um conforme a Tabela 6.

TABELA 6 - DEFINIÇÃO DAS ALTURAS DOS FEIXES

Feixes	Cálculo das alturas dos Feixes
LPC	LPC = Altura feixe central lóbulo principal
LP1	LP1 = LPC + AberturaLP/2
LP2	LP2 = LPC – AberturaLP/2
1LSC	1LSC = Altura feixe central lóbulo secundário 1
1LS1	1LS1 = 1LSC + Abertura1LS/2
1LS2	1LS2 = 1LSC – Abertura1LS/2
2LSC	2LSC = Altura feixe central Lóbulo secundário 2
2LS1	2LS1 = 2LSC + Abertura2LS/2
2LS2	2LS2 = 2LSC – Abertura2LS/2
3LSC	3LSC = Altura feixe central lóbulo secundário 3
3LS1	3LS1 = 3LSC + Abertura3LS/2
3LS2	3LS2 = 3LSC – Abertura3LS/2

### 3.11. CLASSIFICADOR DE OBSTRUÇÃO DOS FEIXES

Para análise dos resultados, construiu-se no ambiente de estimação um classificador de procedência de lóbulos para os ecos de terreno. Ou seja, criou-se uma diferenciação entre lóbulos, utilizando diferentes cores para distinguir a procedência de determinado eco de terreno usando critérios das propriedades da

óptica geométrica aplicado à propagação eletromagnética do sinal de micro-ondas de radar.

Definiu-se que o estimador teria seis indicações diferentes. Na Tabela 7 observa-se três colunas sendo elas: lista de feixes: critério de verificação e cor indicativa, caso a condição seja satisfeita.

TABELA 7 - INDICAÇÕES DE ECOS DE TERRENO

Feixes	Condições	Cores
LP1	Eco de terreno $\geq$ LP1	Preto
LP2	Eco de terreno $>$ LP2	Vermelho
1LS1	Eco de terreno $>$ 1LS1	Branco
1LS2	Eco de terreno $>$ 1LS2	Verde
2LS1	Eco de terreno $>$ 2LS1	Branco
2LS2	Eco de terreno $>$ 2LS2	Azul
3LS1	Eco de terreno $>$ 3LS1	Branco
3LS2	Eco de terreno $>$ 3LS2	Ciano

Além das cores definiu-se uma escala de prioridades, na qual o lóbulo com maior proximidade ao lóbulo principal suprime o de maior distância angular. Caso ocorra ambiguidade de detecção para algum eco de terreno, utilizou-se a escala de prioridades de lóbulos indicada na Figura 24.

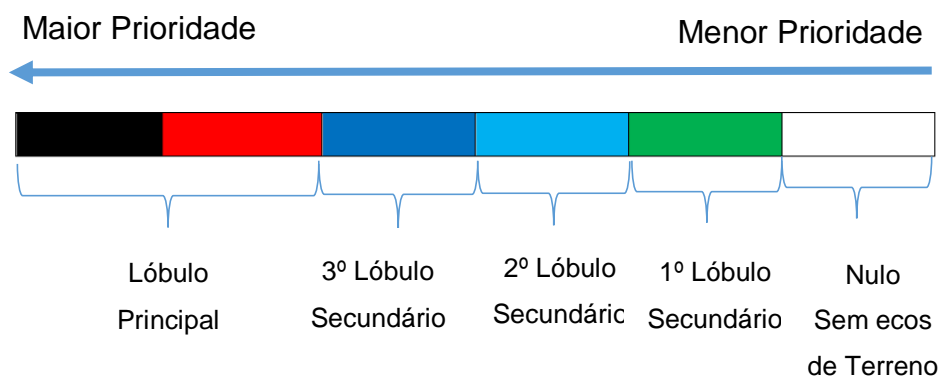


FIGURA 24 - ESCALA DE PRIORIDADES DOS LÓBULOS

### 3.11.1. Cores do Lóbulo Principal

A principal função das cores é a indicação visual da situação do feixe. Atribuiu-se duas cores distintas para o lóbulo principal, sendo elas o vermelho e o preto.

Os ecos de terreno que estiverem entre os feixes LP1 e LP2 são plotados na cor vermelha para indicação de que o lóbulo principal está atingindo determinado local

da topografia. Caso a topografia esteja a uma altura maior que o feixe LP1, isto indica a ocorrência de uma obstrução total do lóbulo principal. No caso de um radar real, a partir deste evento, nenhum sinal seria radiado a uma distância maior. Por consequência, também não seria captado com a finalidade de indicar esta informação. A rotina de classificação plota o restante do raio na cor preta para indicar uma região de sombra na qual o radar não pode captar nenhum sinal.

Esta informação de obstrução total do feixe principal é muito relevante para a análise dos resultados. Assim sendo, para indicar esta ocorrência o *software* plota o restante do raio na cor preta para indicação visual e facilitação da análise dos resultados.

### **3.11.2. Cores dos Lóbulos Secundários**

Os pontos da topografia que interceptam os lóbulos secundários, definido pelos feixes que os delimitam (1LS1 e 1LS2, 2LS1 e 2LS2, 3LS1 e 3LS2) são plotados nas cores verde, azul e ciano respectivamente. Caso algum obstáculo preencha 100 % de algum dos lóbulos secundários, a partir deste ponto é gerado um “nulo”, não sendo geradas indicações de obstáculo após este evento.

### **3.11.3. Resolução espacial dos ecos de terreno**

A resolução mínima de um radar é definida pela sua largura de pulso. Do capítulo anterior verifica-se que para a largura de pulso de  $0,8 \times 10^{-6}$ s, utilizando a Equação 2.29 obtém-se 120 m. Optou-se em utilizar a resolução da base de dados, ou seja 90 m, com isso os resultados obtidos com o estimador apresentam uma resolução maior que um radar banda S poderia obter para a distância de 200 km.

### **3.11.4. Composição dos feixes**

Utilizando os critérios de modelamento definidos nos itens anteriores, pode-se observar na Figura 25 o comportamento dos feixes dos lóbulos atingindo a topografia.

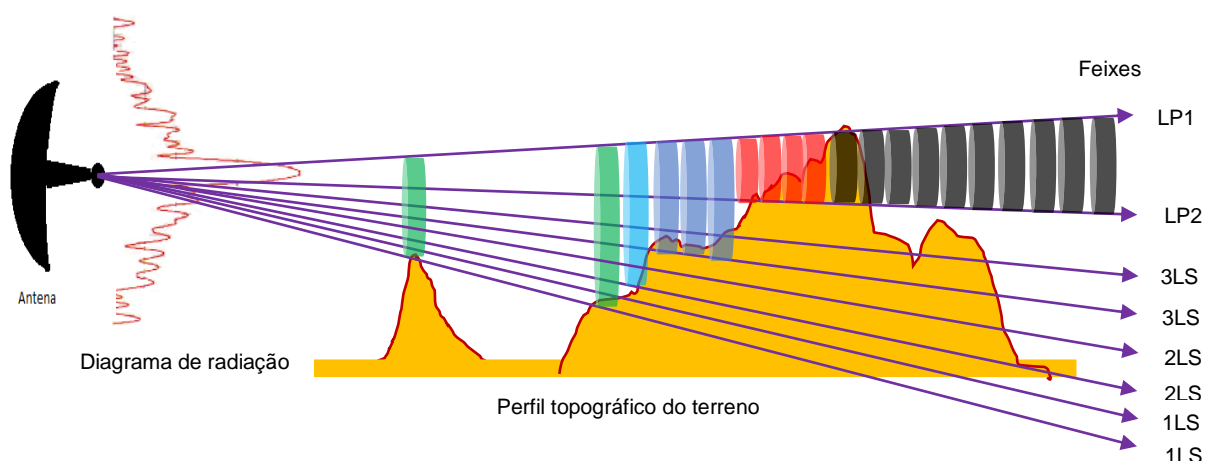


FIGURA 25 - CLASSIFICADOR DE PROCEDÊNCIA DE ECOS. FONTE: O AUTOR.

O resultado final da estimativa apresentada é formado pela composição dos feixes radiados em todas as direções, perfazendo  $360^{\circ}$  a partir do *site* do radar. O conjunto destes feixes compõe uma imagem georreferenciada com a localização dos ecos de terreno dentro do raio de cobertura do radar.

### 3.12. VERIFICAÇÃO DO RESULTADO DA ESTIMAÇÃO

Para verificação do algoritmo, simulou-se os ecos de terreno para o radar meteorológico de Teixeira Soares com várias elevações, começando em  $0^{\circ}$  até  $0,9^{\circ}$  com passos de incrementos de  $0,1^{\circ}$ . Nas Figuras 26 a 35 observam-se os resultados da estimativa contendo os ecos de terreno para cada elevação.

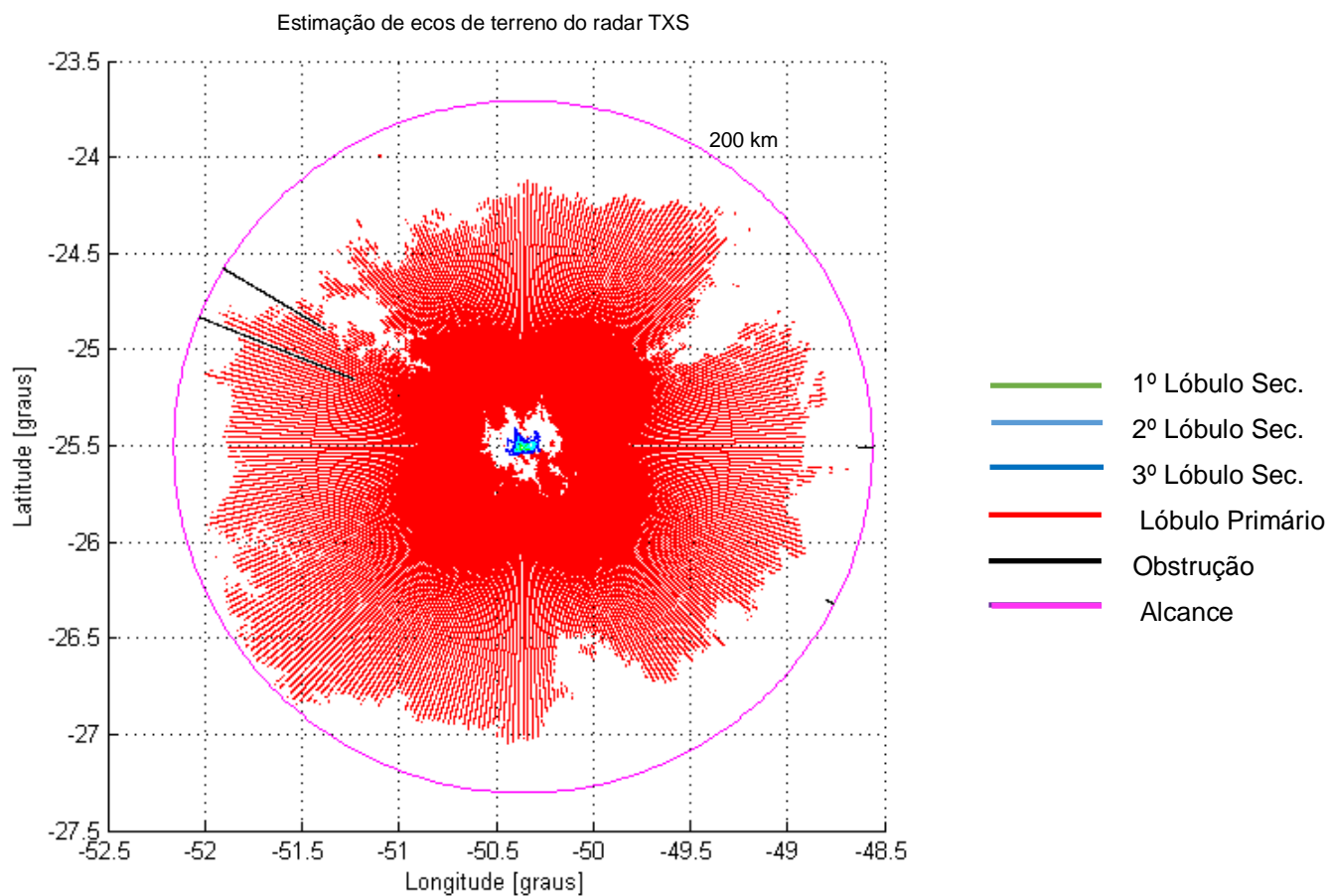


FIGURA 26 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0°. FONTE: O AUTOR.

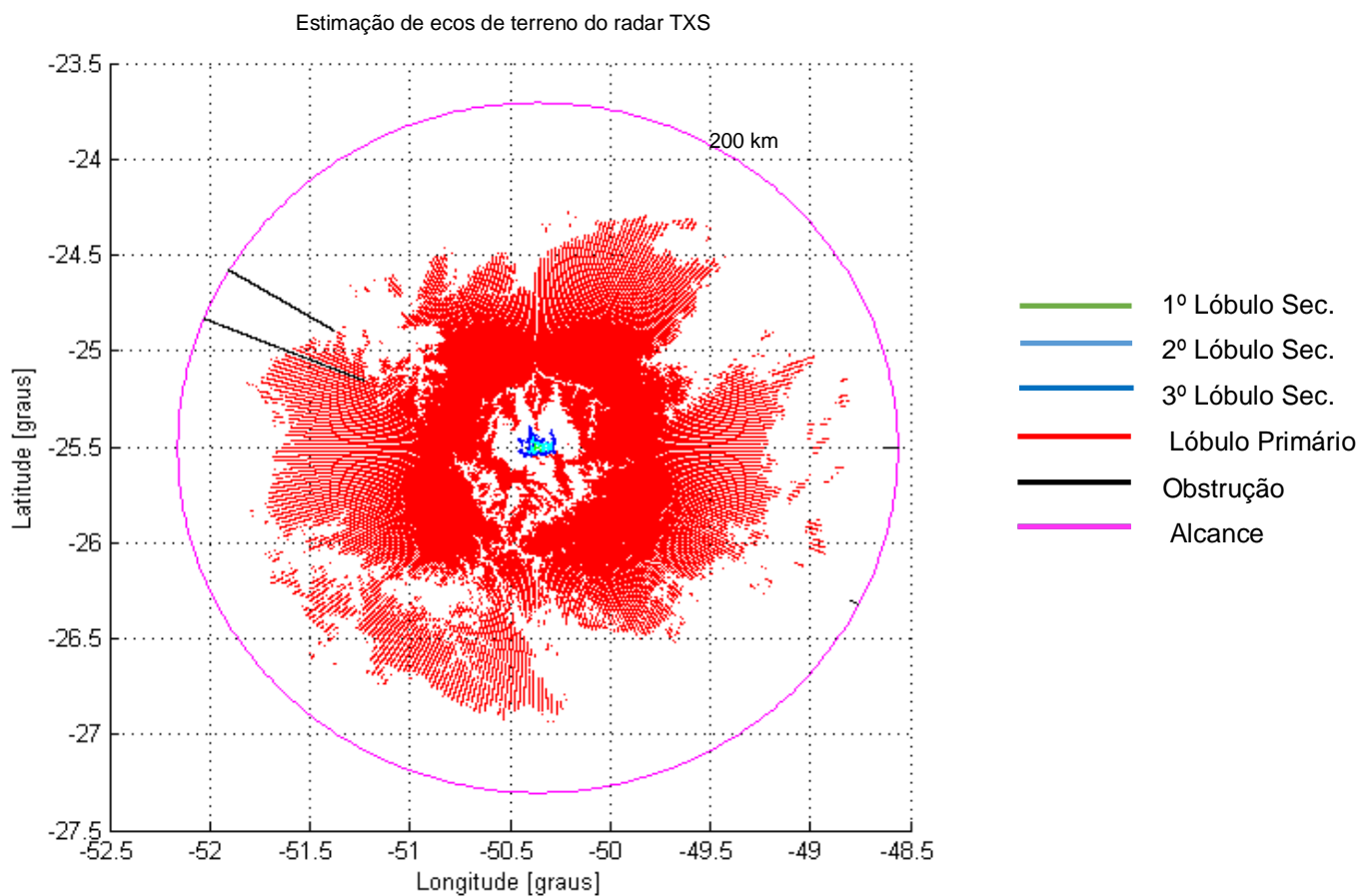


FIGURA 27 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,1°. FONTE: O AUTOR.

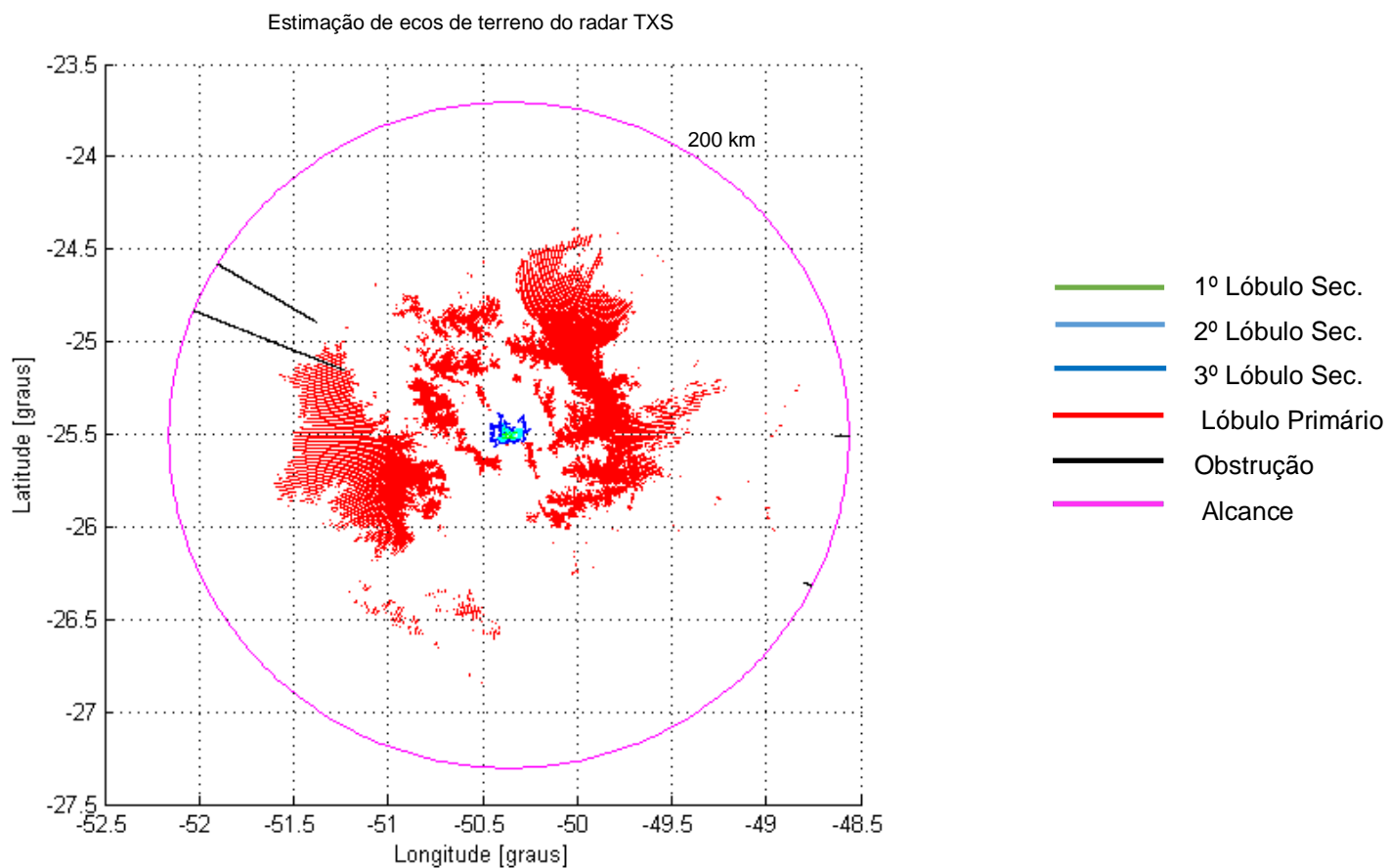


FIGURA 28 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,2°. FONTE: O AUTOR.

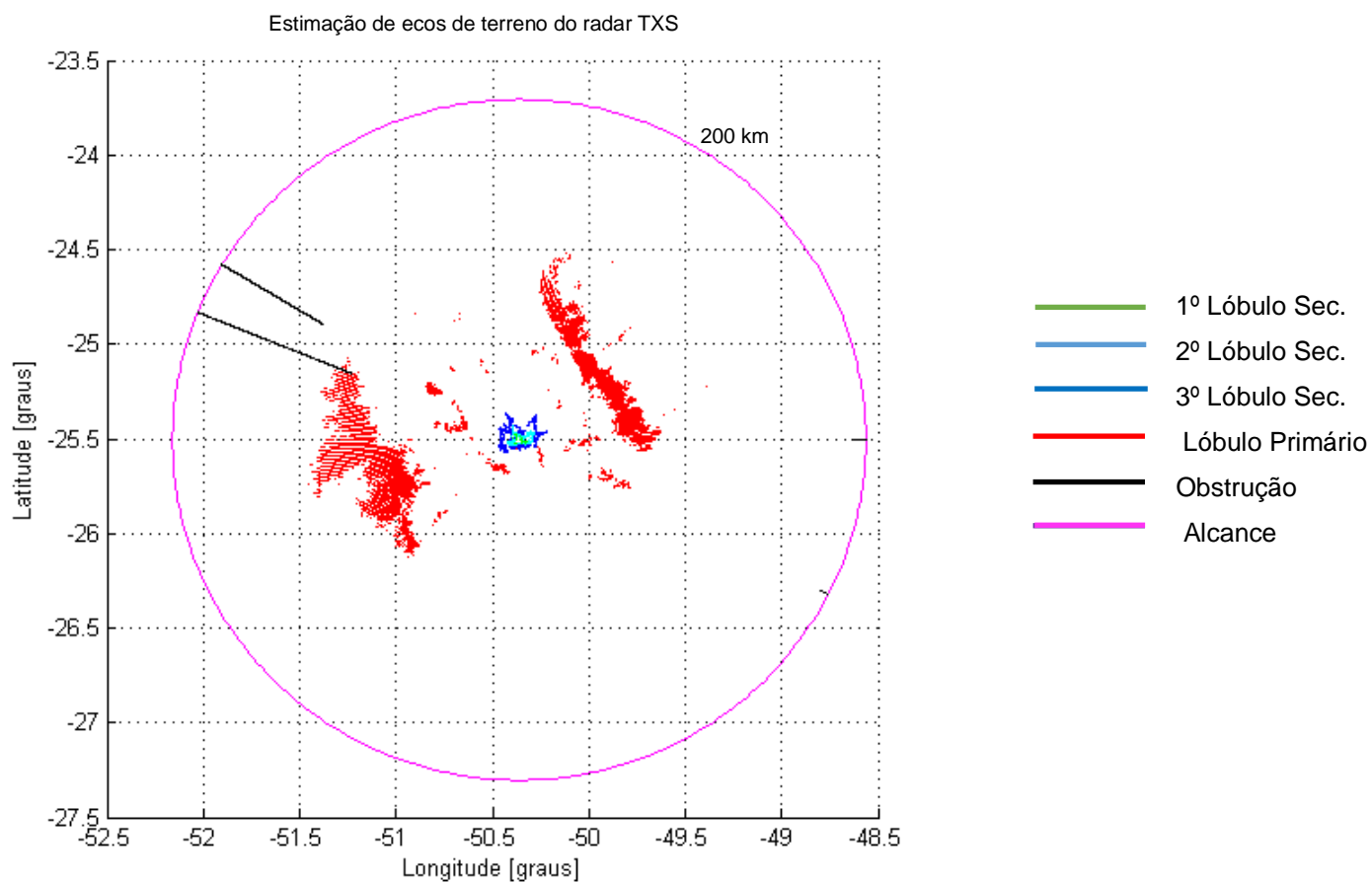


FIGURA 29 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,3°. FONTE: O AUTOR.

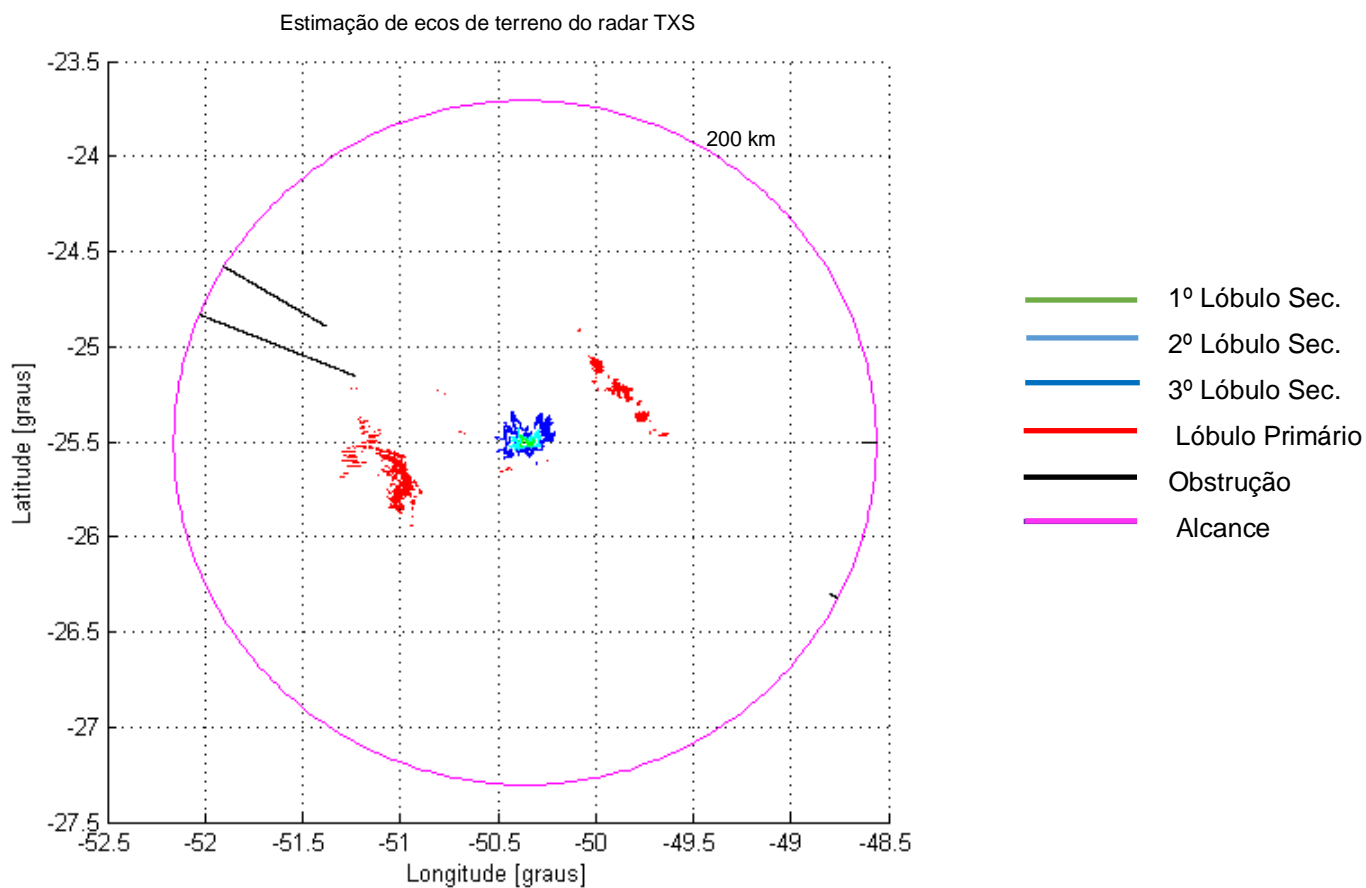


FIGURA 30 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,4°. FONTE: O AUTOR.

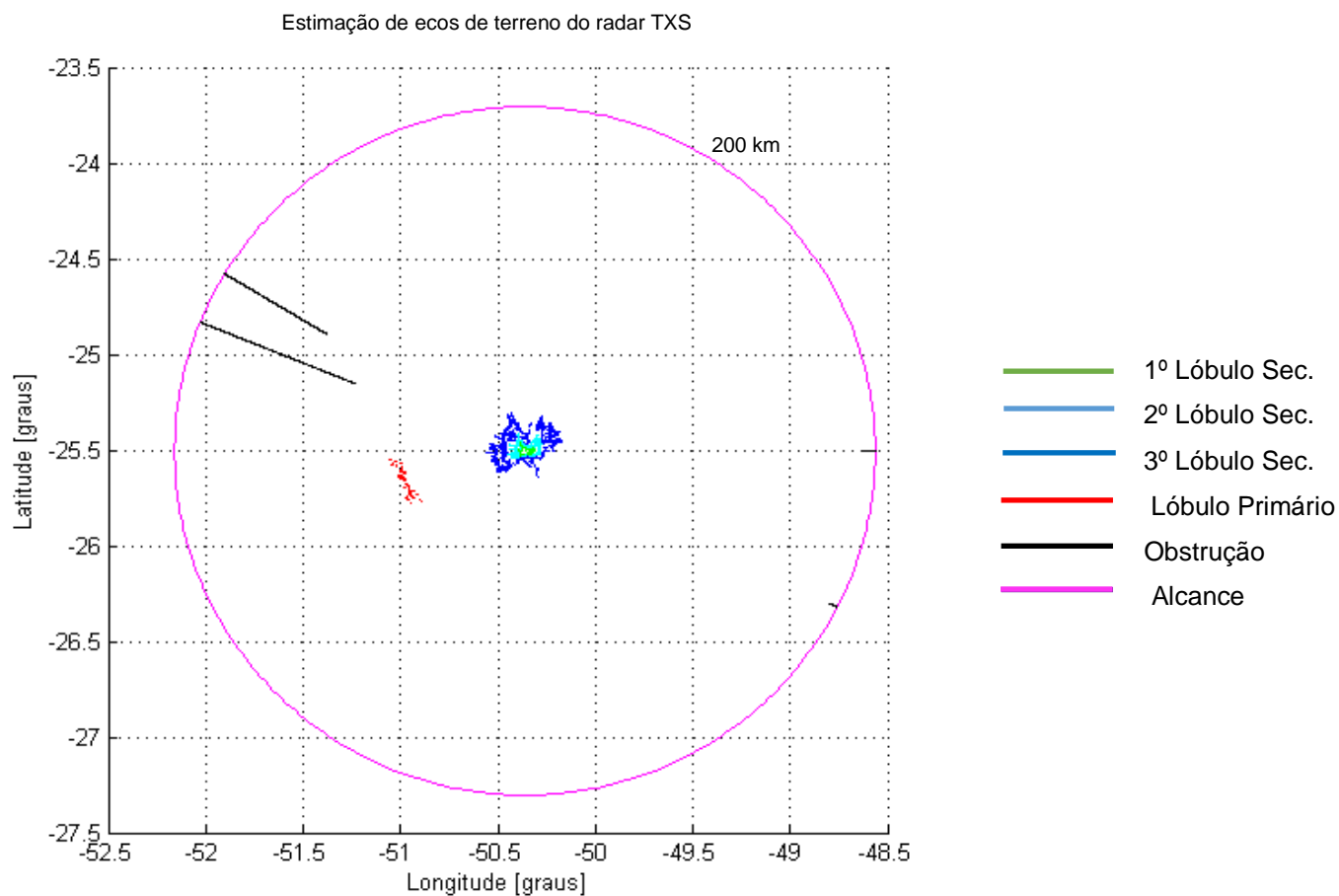


FIGURA 31- ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,5°. FONTE: O AUTOR.

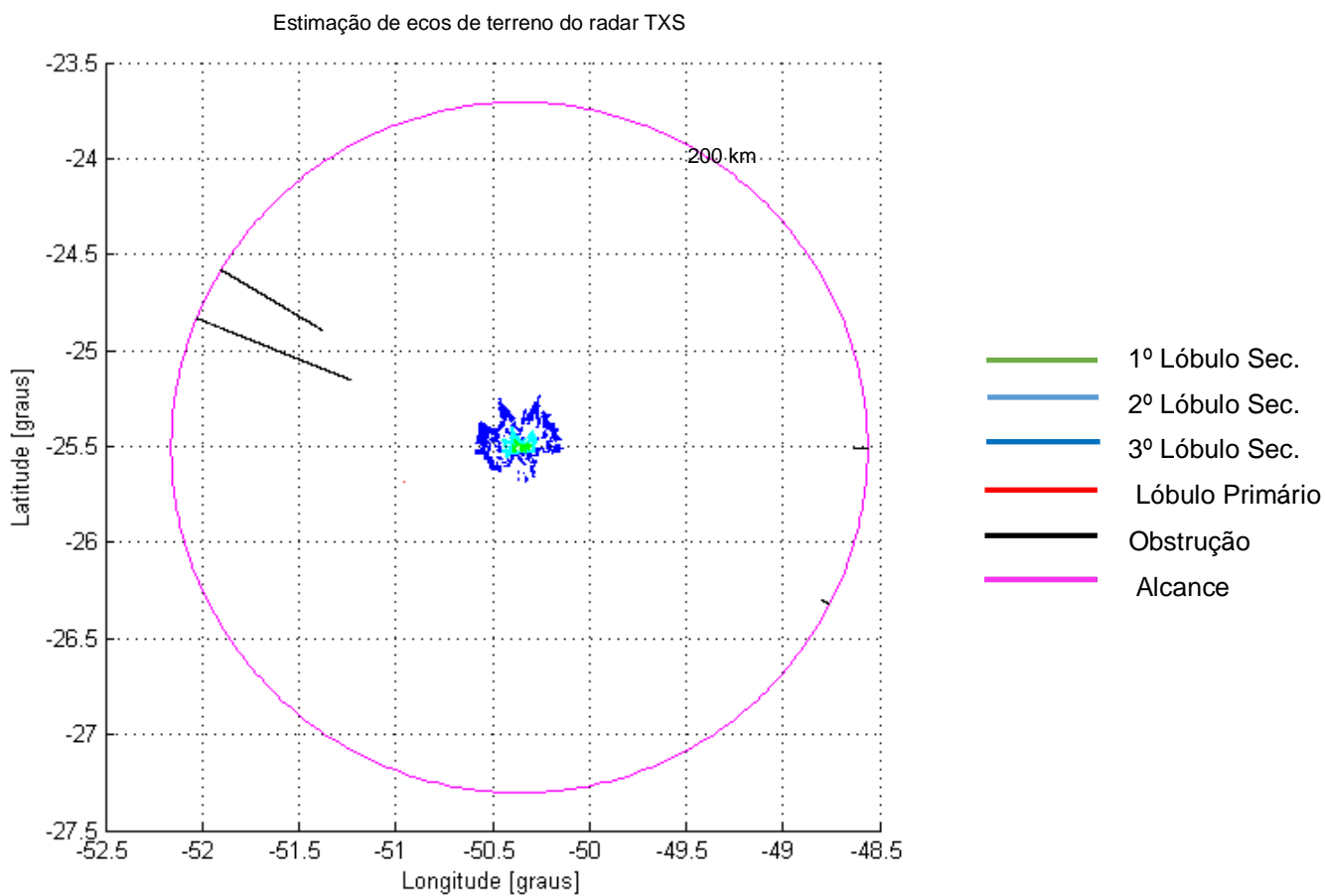


FIGURA 32 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,6°. FONTE: O AUTOR.

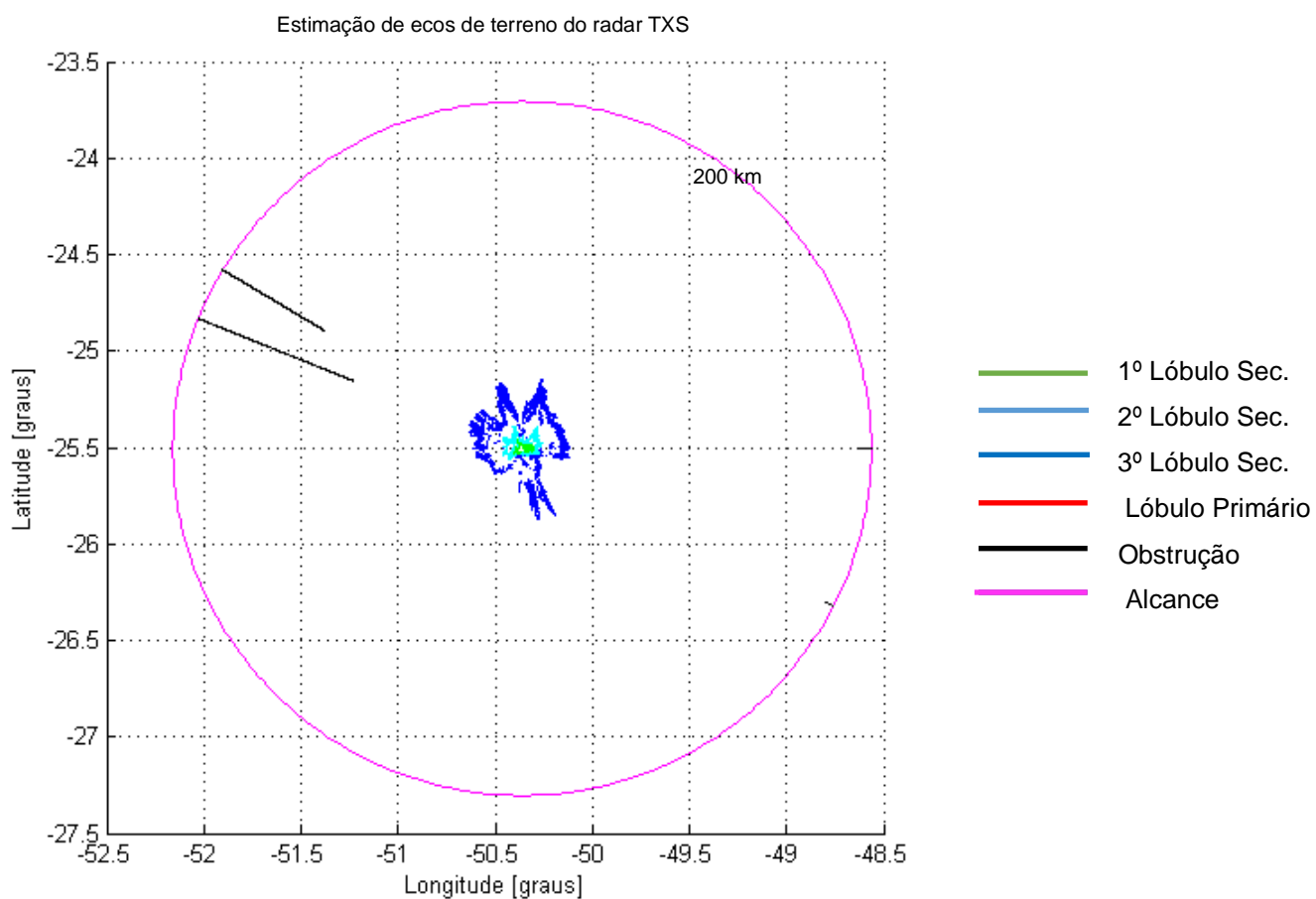


FIGURA 33 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,7°. FONTE: O AUTOR.

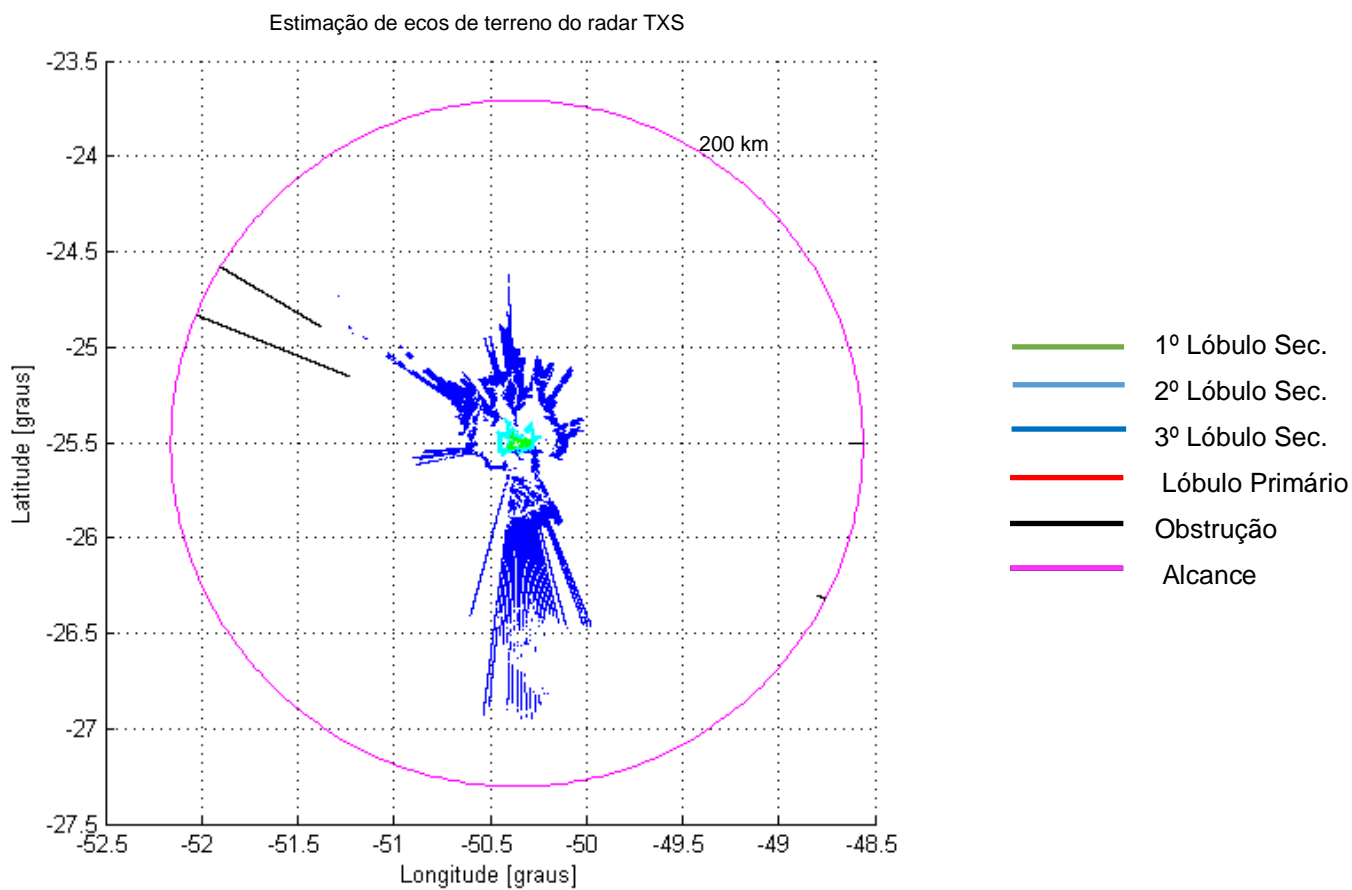


FIGURA 34 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,8°. FONTE: O AUTOR.

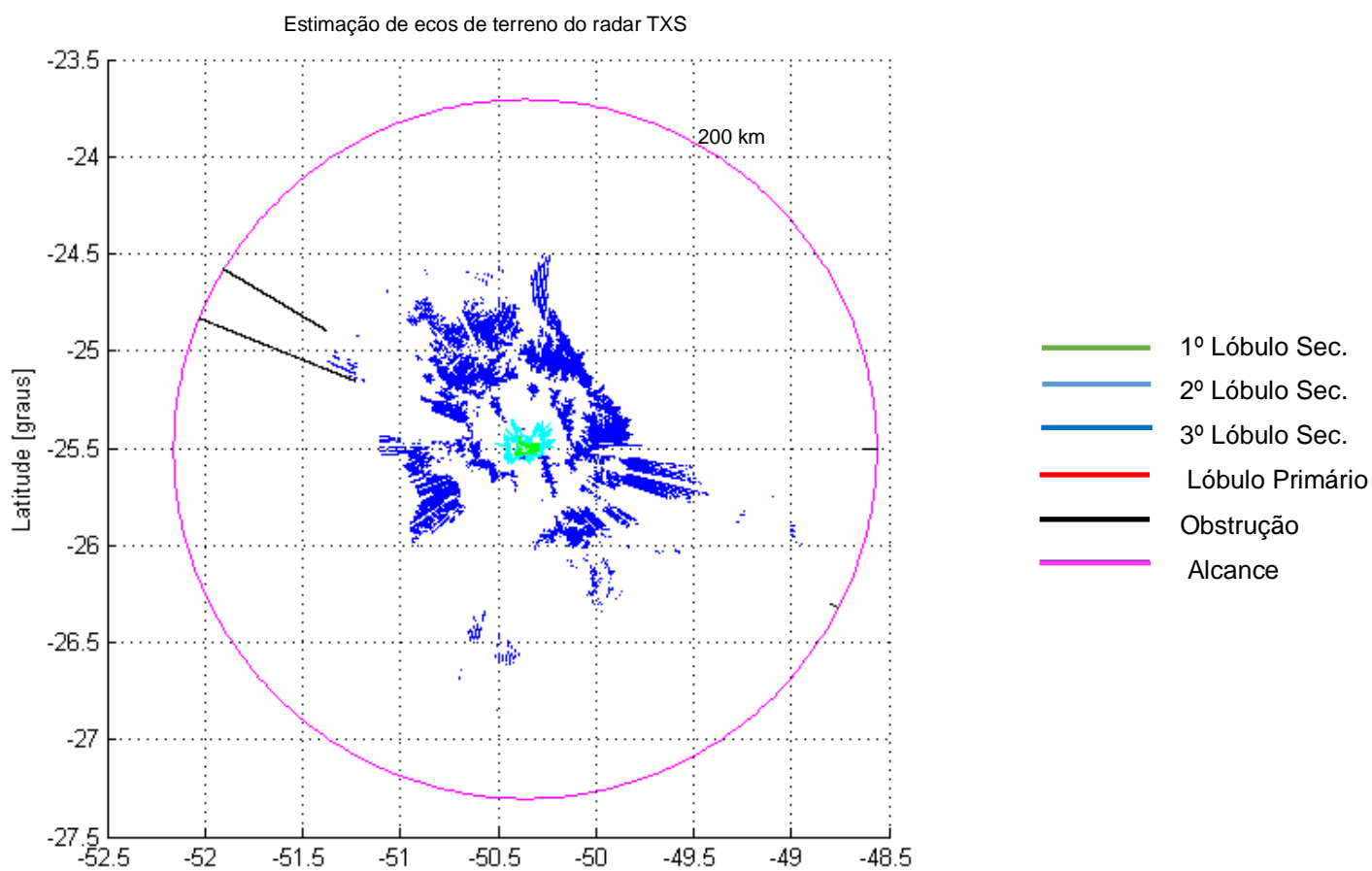


FIGURA 35 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,9°. FONTE: O AUTOR.

### 3.13. ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS ELEVAÇÕES

Observa-se que a medida que a elevação da antena é incrementada, os ecos de terreno do lóbulo principal diminuem e os provenientes dos lóbulos secundários aumentam como esperado.

O lóbulo principal gera ecos de terreno até elevação de  $0,4^\circ$ . Após este valor, ocorre a predominância dos ecos de terreno dos lóbulos secundários.

A estimacão indica quatro raios com obstruo total do lóbulo principal que necessitam de averiguao.

Observando as estimacões geradas, constata-se que o algoritmo detectou alguns bloqueios do lóbulo principal em todas as estimacões independentemente da elevao. Na Figura 36 observa-se a indicao destes obstáculos apesar da indicao de obstruo na cor "preta" estar relacionada a imperfeices da base de dados *SRTM*

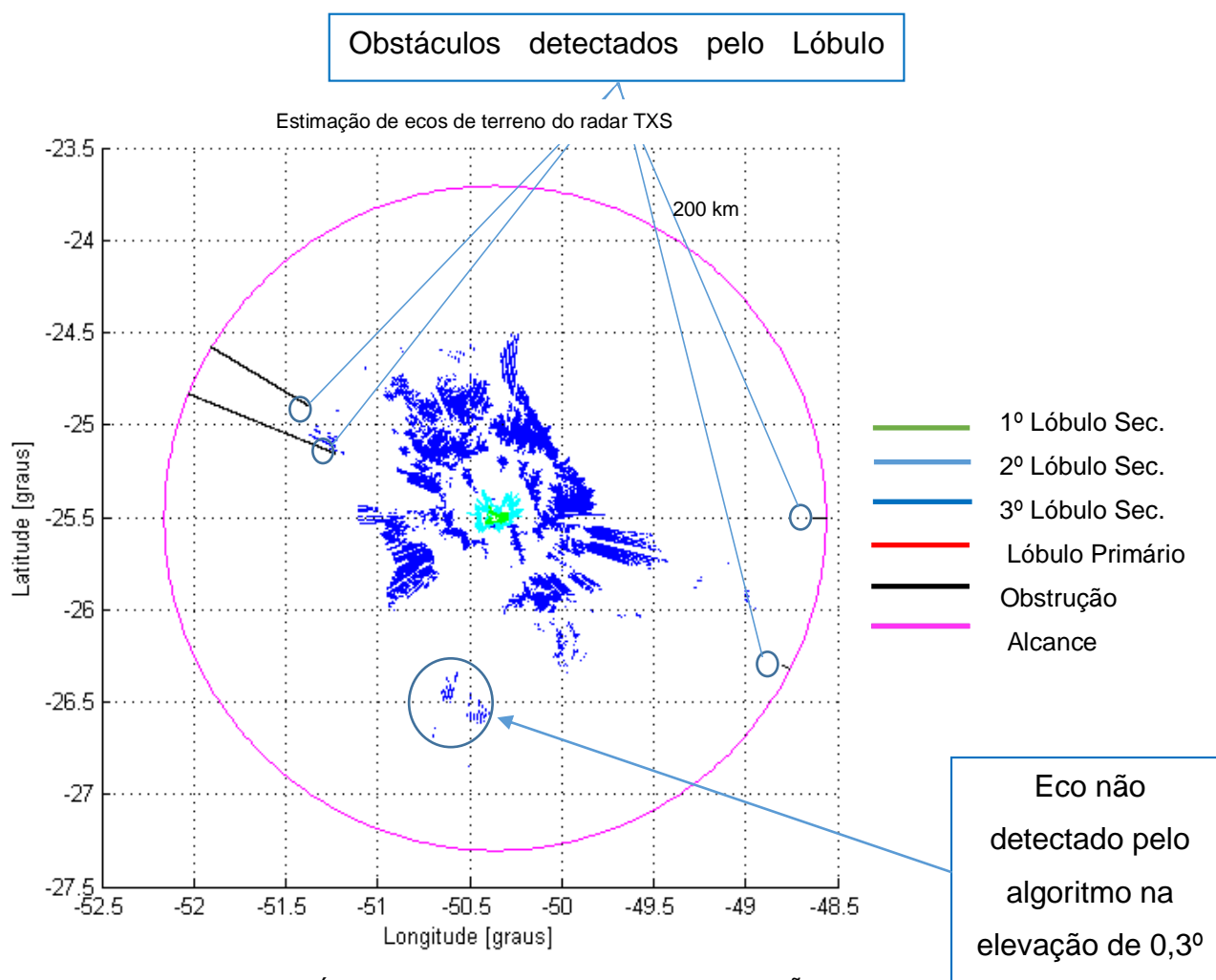


FIGURA 36 - OBSTÁCULOS DETECTADOS COM ELEVAO DE  $0,9^\circ$ . FONTE: O AUTOR.

a indicação visual neste caso serve para constatação de funcionamento do algoritmo. Também é possível distinguir alguns ecos não encontrados com o algoritmo configurado para elevação de  $0,3^\circ$  mas detectados no radar real.

### 3.14. ANÁLISE DOS FEIXES EM PERFIL

Observa-se na Figura 37 os perfis gerados com elevações entre  $0^\circ$  e  $0,9^\circ$  e as os caminhos a alturas distintas para cada feixe calculado pelo algoritmo, mais detalhes podem ser observados no Anexo A. Do traçado dos feixes nota-se que resultados são condizentes com o esperado, pois é possível verificar nas figuras as aberturas de cada um dos lóbulos aumentando com a distância bem como o caminho percorrido por cada um dos feixes e suas variações de altitude com a distância.

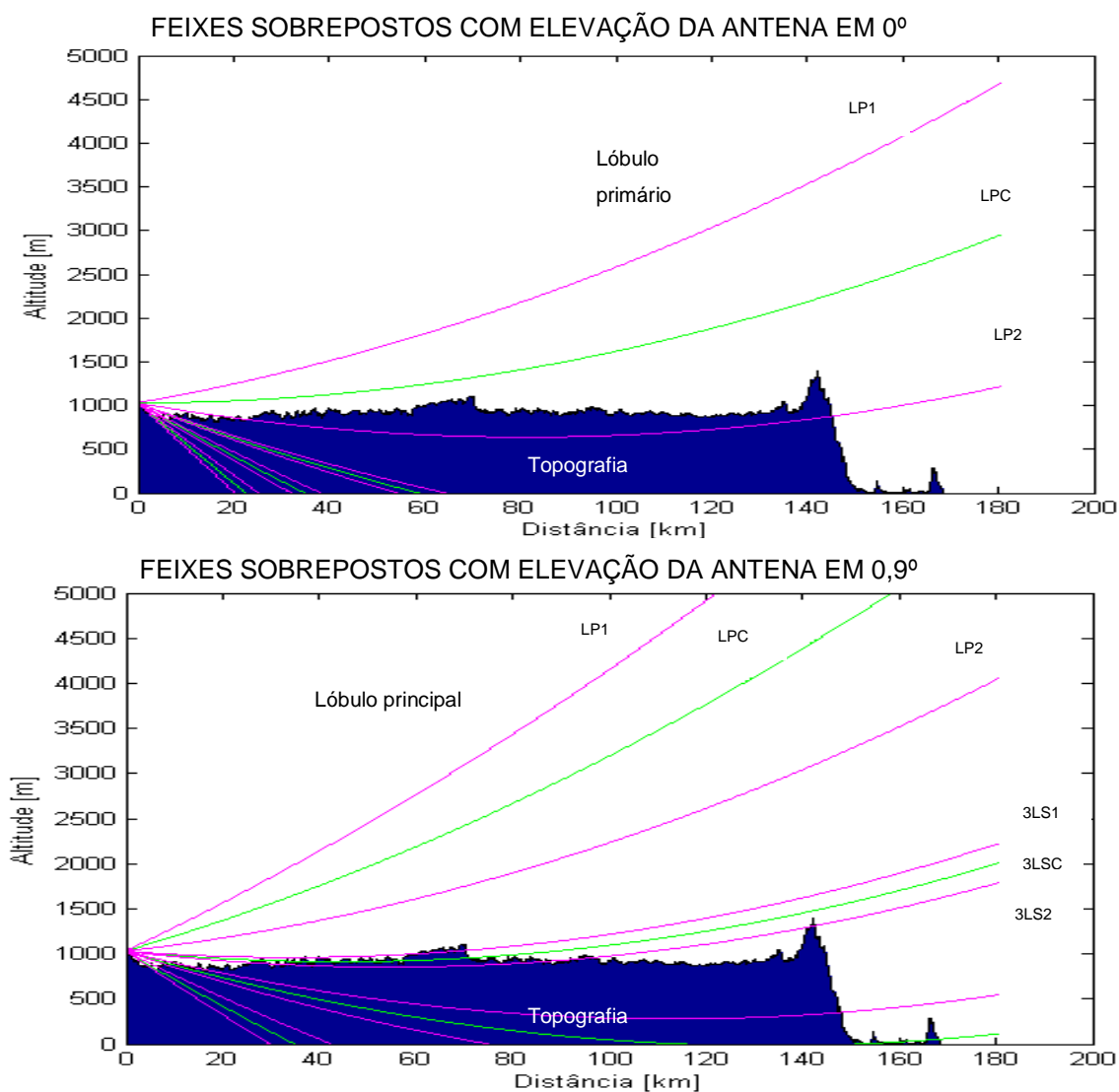


FIGURA 37 - CAMINHO DOS FEIXES COM ELEVAÇÕES DISTINTAS. FONTE: O AUTOR.

### 3.15. ECOS DE TERRENO MEDIDOS PELO RADAR DE TEIXEIRA SOARES

As Figuras 38 e 39 ilustram os ecos de terreno medidos pelo radar de Teixeira Soares. Estes ecos foram obtidos através da média de uma semana de medições do radar sem a presença de eventos meteorológicos.

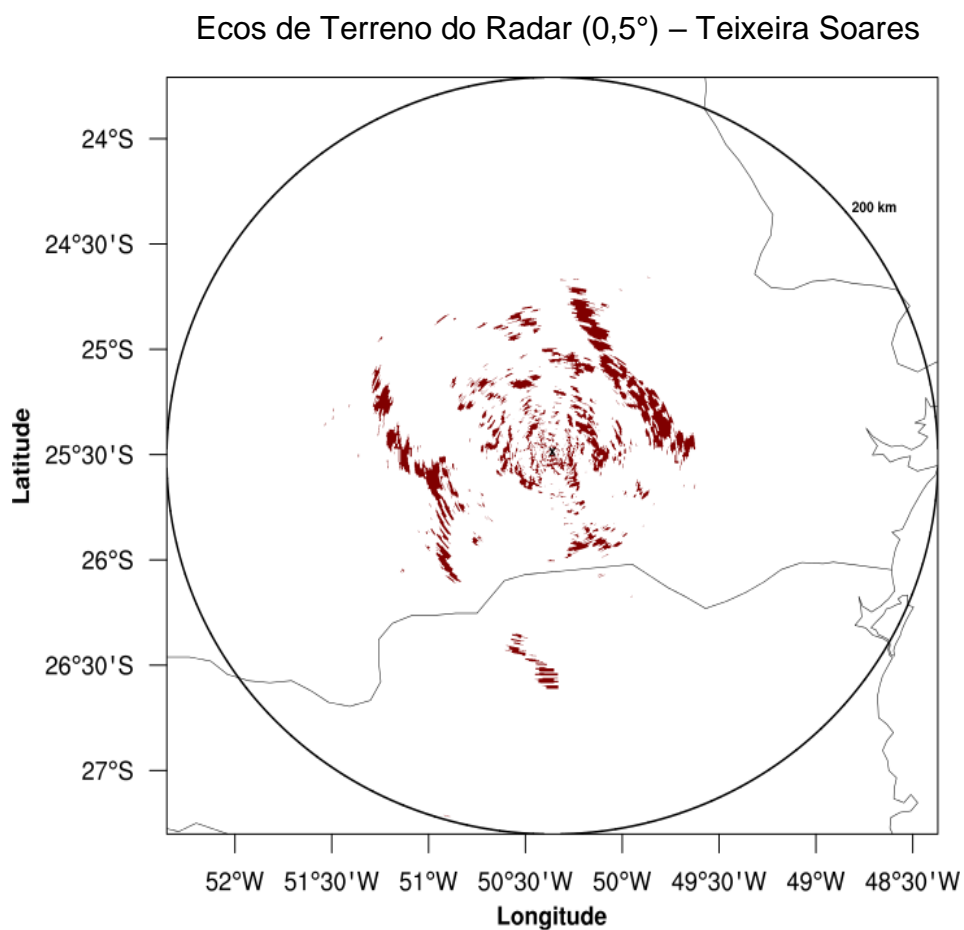


FIGURA 38 - ECOS DE TERRENO DETECTADOS PELO RADAR DE TEIXEIRA SOARES. FONTE: [47]

### ECOS DE TERRENO DO RADAR (1,0°) – Teixeira Soares

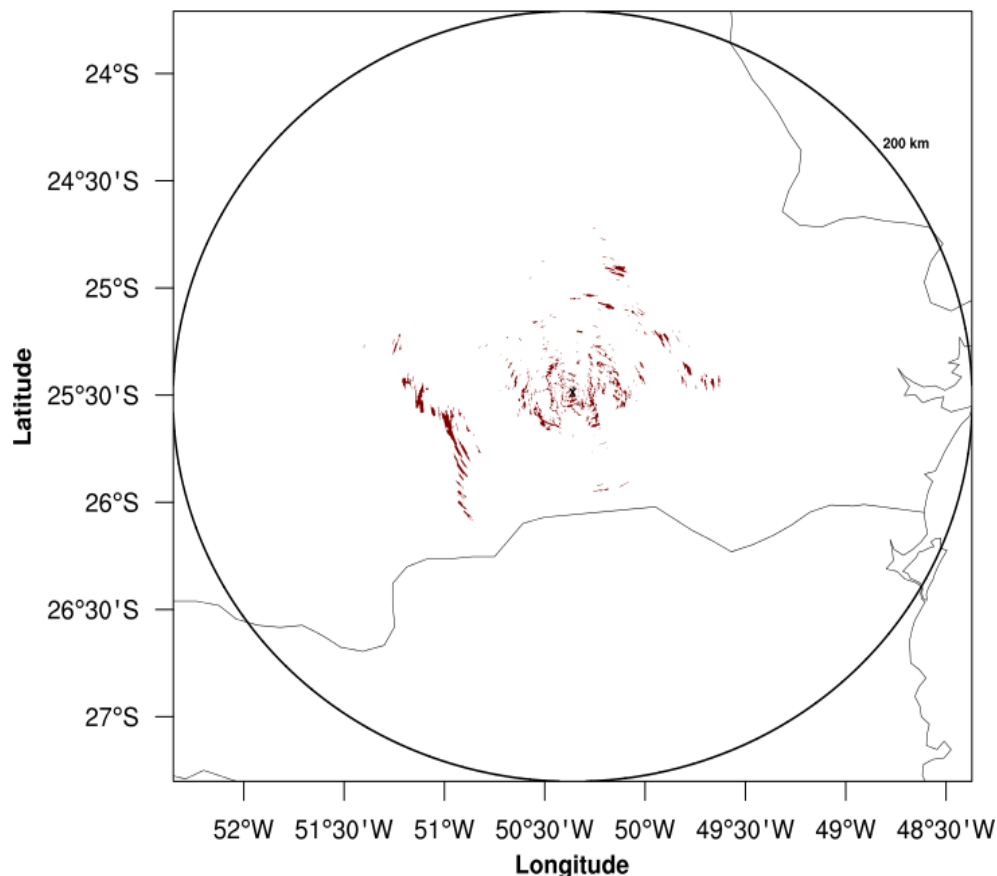


FIGURA 39 - ECOS DE TERRENO DETECTADOS PELO RADAR DE TEIXEIRA SOARES. FONTE: [47]

### 3.16. ANÁLISE DOS ECOS MEDIDOS PELO RADAR

Não há como distinguir visualmente se os ecos de terreno são provenientes dos lóbulos secundários ou principal. Nota-se que a menor elevação utilizada pelo radar de Teixeira Soares é a de 0,5° e elevações maiores produzem menor quantidade de ecos de terreno.

### 3.17. COMPARAÇÃO ENTRE OS ECOS MEDIDOS E OS ESTIMADOS

A Figura 40 apresenta os ecos medidos e estimados pelo algoritmo, na qual observa-se as principais diferenças entre os resultados obtidos. Utilizou-se para tal, os ecos de terreno medidos para a elevação de 0,5° comparando com resultado da estimacão de 0,3° pois, a acurácia de posicionamento indicada pelo fabricante do radar para elevações é de  $\pm 0,2^\circ$ . No caso admitiu-se a existência um erro de  $+0,2^\circ$  na elevação dos dados medidos.

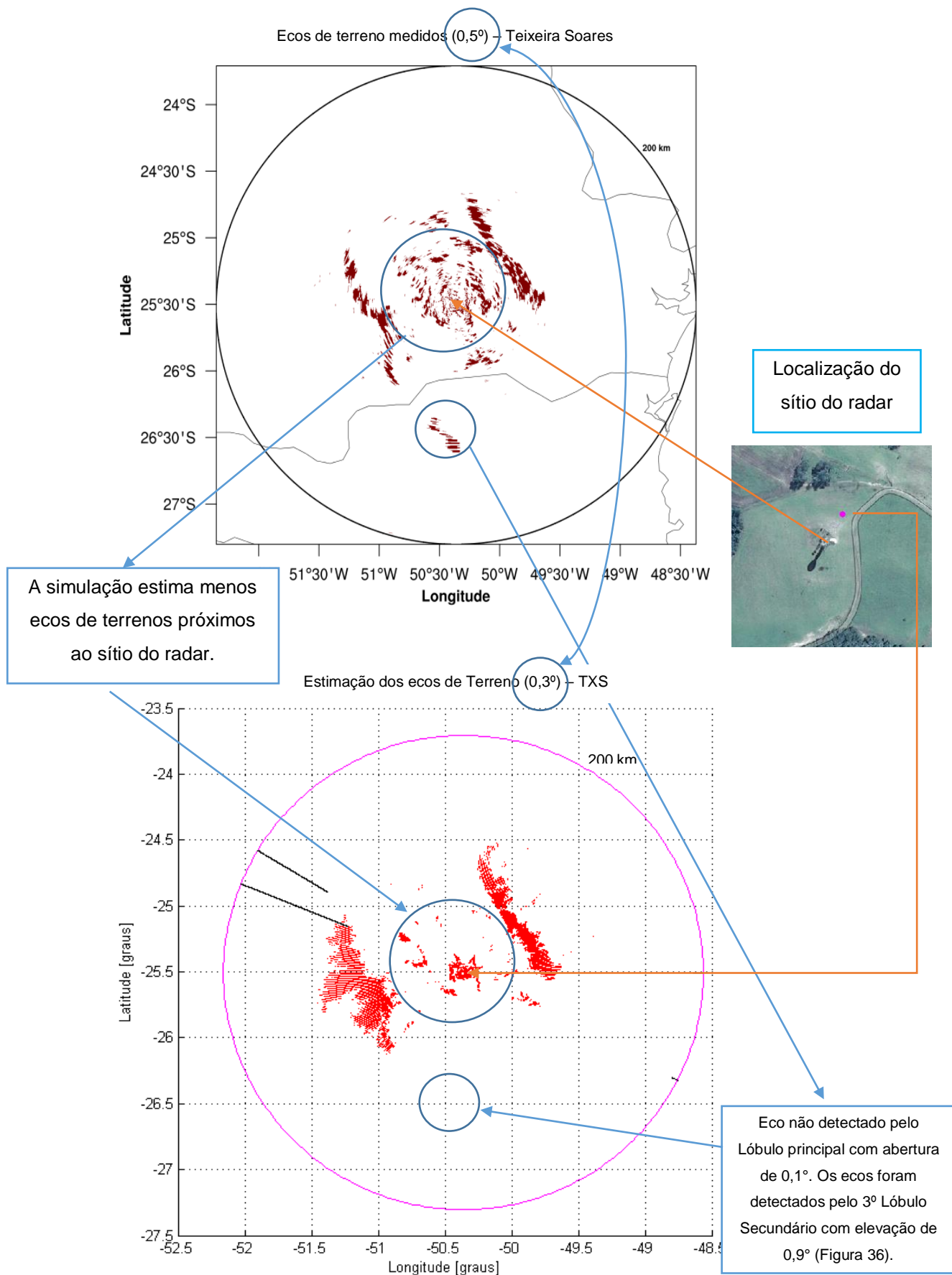


FIGURA 40 - COMPARATIVO ENTRE A MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DE ECOS DE TERRENO. FONTE: O AUTOR.

Observa-se que a algoritmo apresenta na região próxima ao radar menos ecos de terreno que os ecos medidos pelo radar real. Também pode-se observar que não foi possível detectar alguns ecos de terreno indicados na Figura 40, parte destes ecos não detectados podem ser observados na Figura 36. Esta observação remete a possibilidade de redefinição do ângulo de abertura de  $1^\circ$  de abertura para o lóbulo principal, pois observando-se o diagrama de radiação da antena da Figura 16 pode-se constatar que até a abertura de  $2,0^\circ$  do lóbulo principal existe mais radiação que a existente nos lóbulos secundários.

### 3.18. VISUALIZAÇÃO DOS ECOS DE TERRENO ESTIMADOS SOBREPOSTO AO MAPA RODOVIÁRIO

Com o intuito de melhorar a identificação e localização de ecos de terreno, inseriu-se nos resultados do estimador a opção de mapa rodoviário, como ilustra a Figura 41.

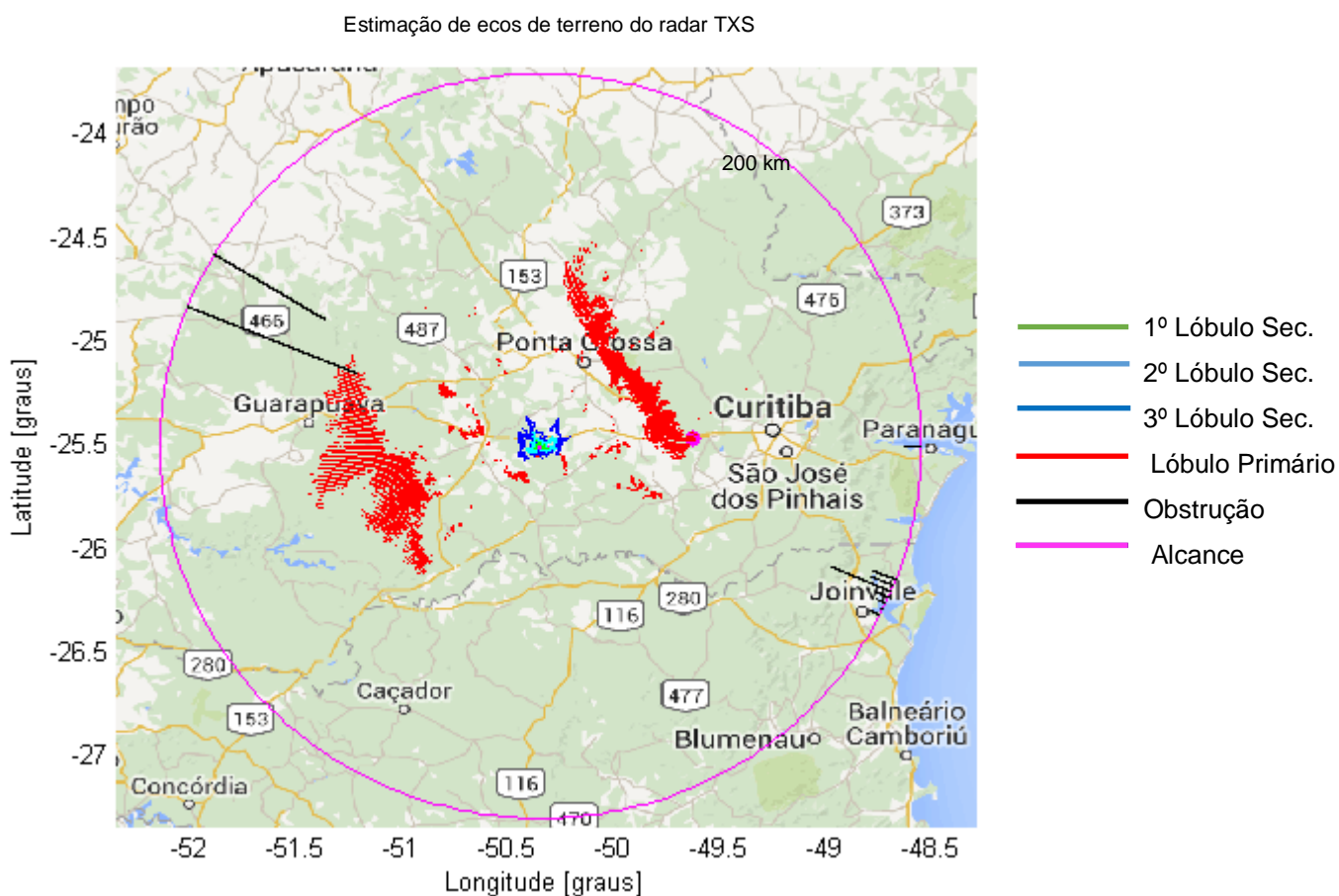


FIGURA 41 - SIMULAÇÃO SOBREPOSTA AO MAPA RODOVIÁRIO. FONTE: O AUTOR.



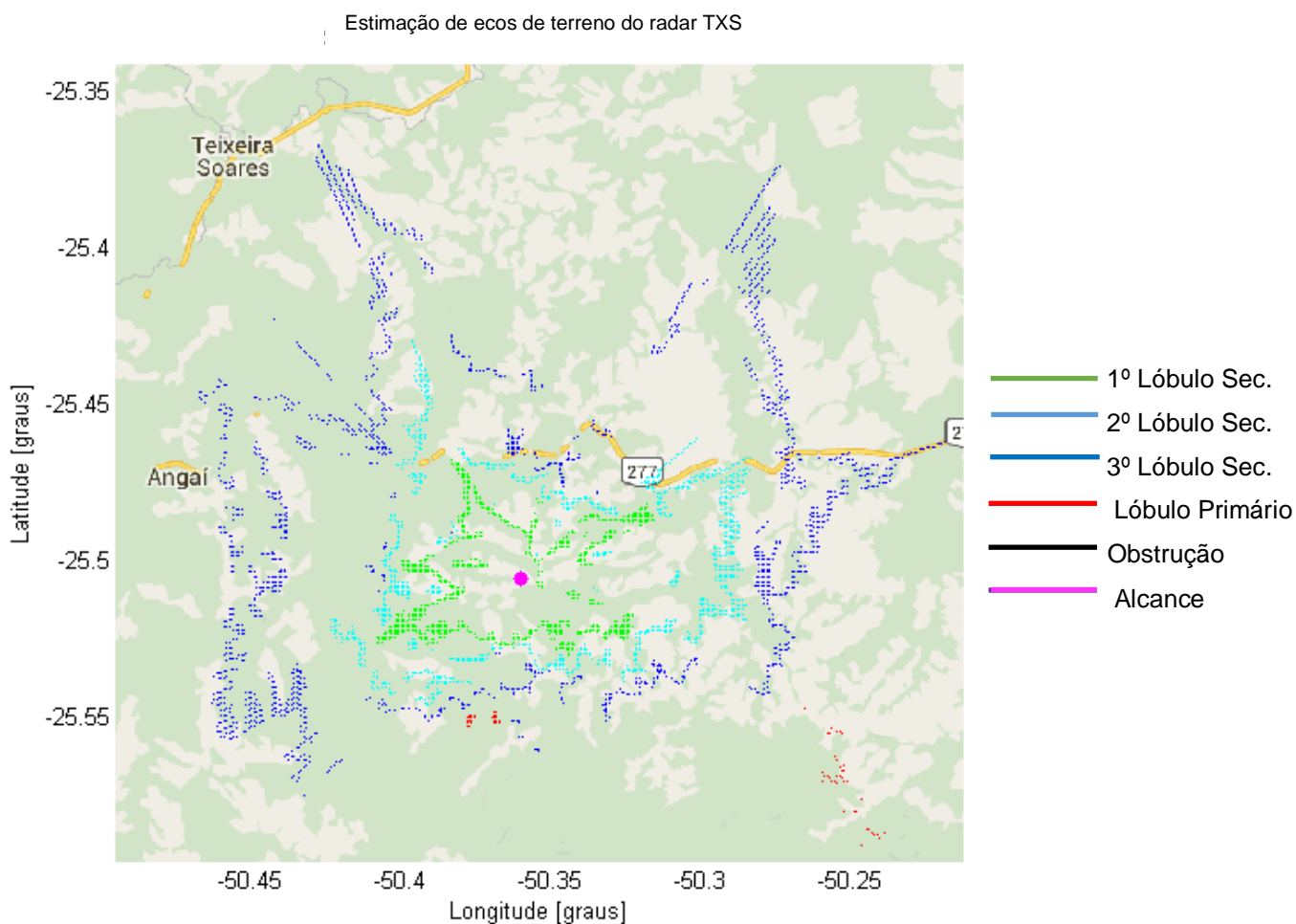


FIGURA 43 - ECOS DE TERRENO DOS LÓBULOS SECUNDÁRIOS

Observa-se que os lóbulos secundários causam ecos de terreno muito próximos ao radar.

### 3.19. ESTIMAÇÃO DOS ECOS DE TERRENO DO RADAR DE CASCAVEL

Após a análise das informações obtidas na estimativa anterior, iniciou-se a estimativa de um novo sítio de radar. Inseriu-se no estimador as coordenadas geográficas do radar de Cascavel, e características da antena, tais como altura, abertura do feixe e lóbulos laterais, verificar dados na Tabela 8.

TABELA 8 - PARÂMETROS PARA ESTIMAÇÃO DOS ECOS DE TERRENO PARA O RADAR DE CASCAVEL

Radar de Cascavel	
Latitude	-24,87556600070
Longitude	-53,52535656490
Raio de cobertura	100 km
Altura da torre	25m
Altura até a posição do alimentador	4,5 m
Elevação da antena	0,3°
Posição angular Lóbulo Principal	0°
Posição angular 1° Lóbulo Secundário	-2,7°
Posição angular 2° Lóbulo Secundário	-1,9°
Posição angular 3° Lóbulo Secundário	-1,3°
Ângulo de abertura Lóbulo Principal	1°
Ângulo de abertura 1° Lóbulo Secundário	0,5°
Ângulo de abertura 2° Lóbulo Secundário	0,25°
Ângulo de abertura 3° Lóbulo Secundário	0,125°

As Figuras 44 a 60 contêm as estimções dos ecos de terreno para as elevações de 0° à 0,7° com incrementos de 0,1°.

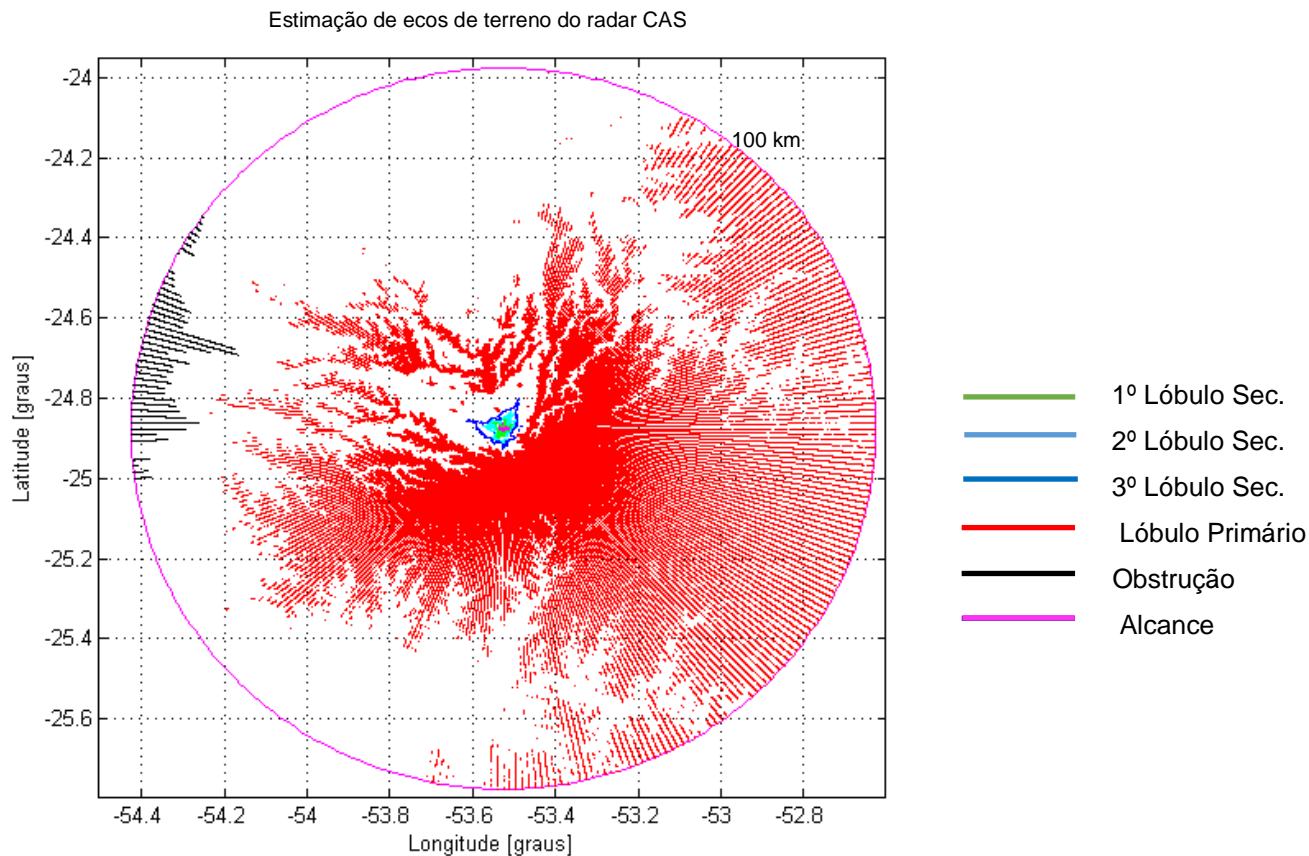


FIGURA 46 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0°. FONTE: O AUTOR.

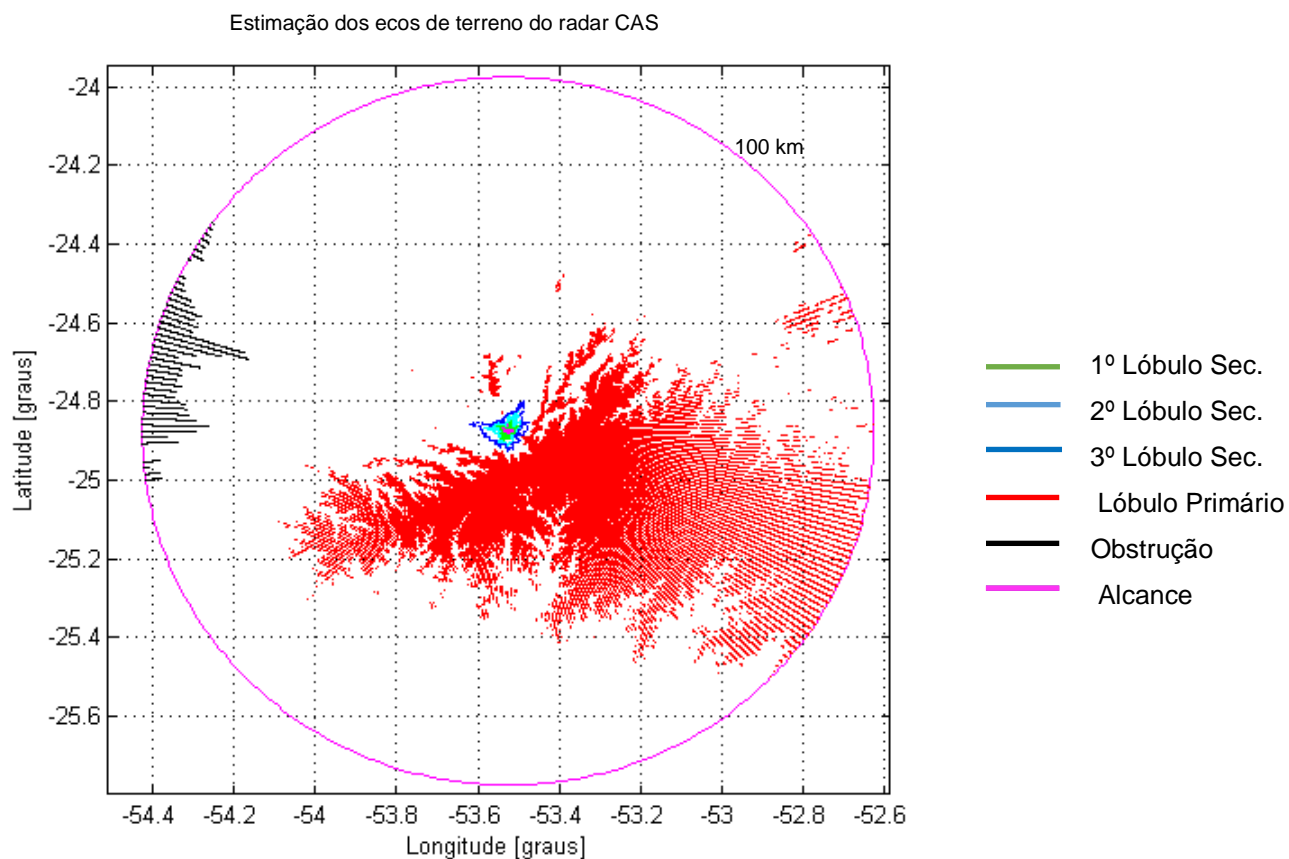


FIGURA 54 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVACÃO DE 0,1°. FONTE: O AUTOR.

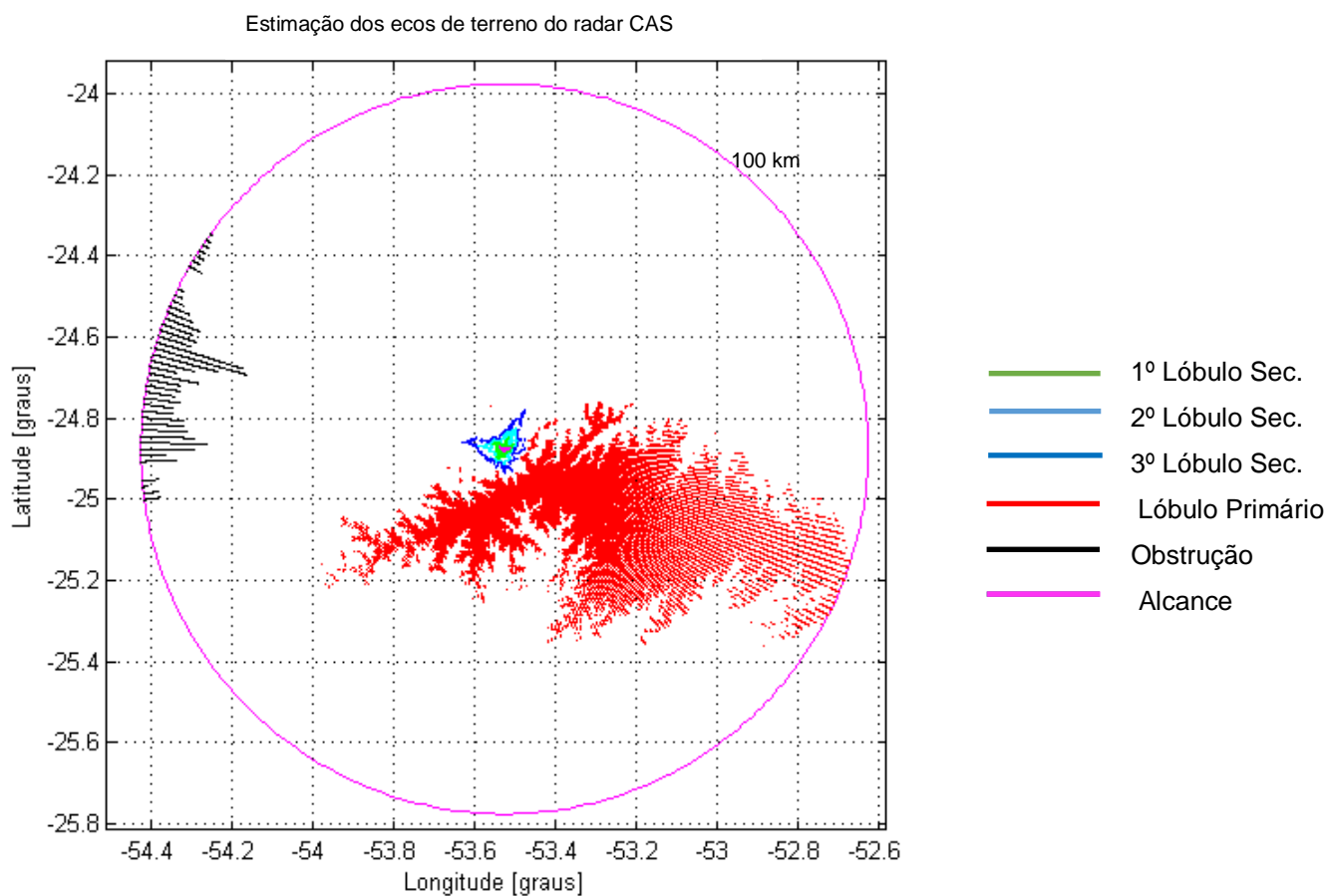


FIGURA 55 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVACÃO DE 0,2°. FONTE: O AUTOR.

Estimação dos ecos de terreno do radar CAS

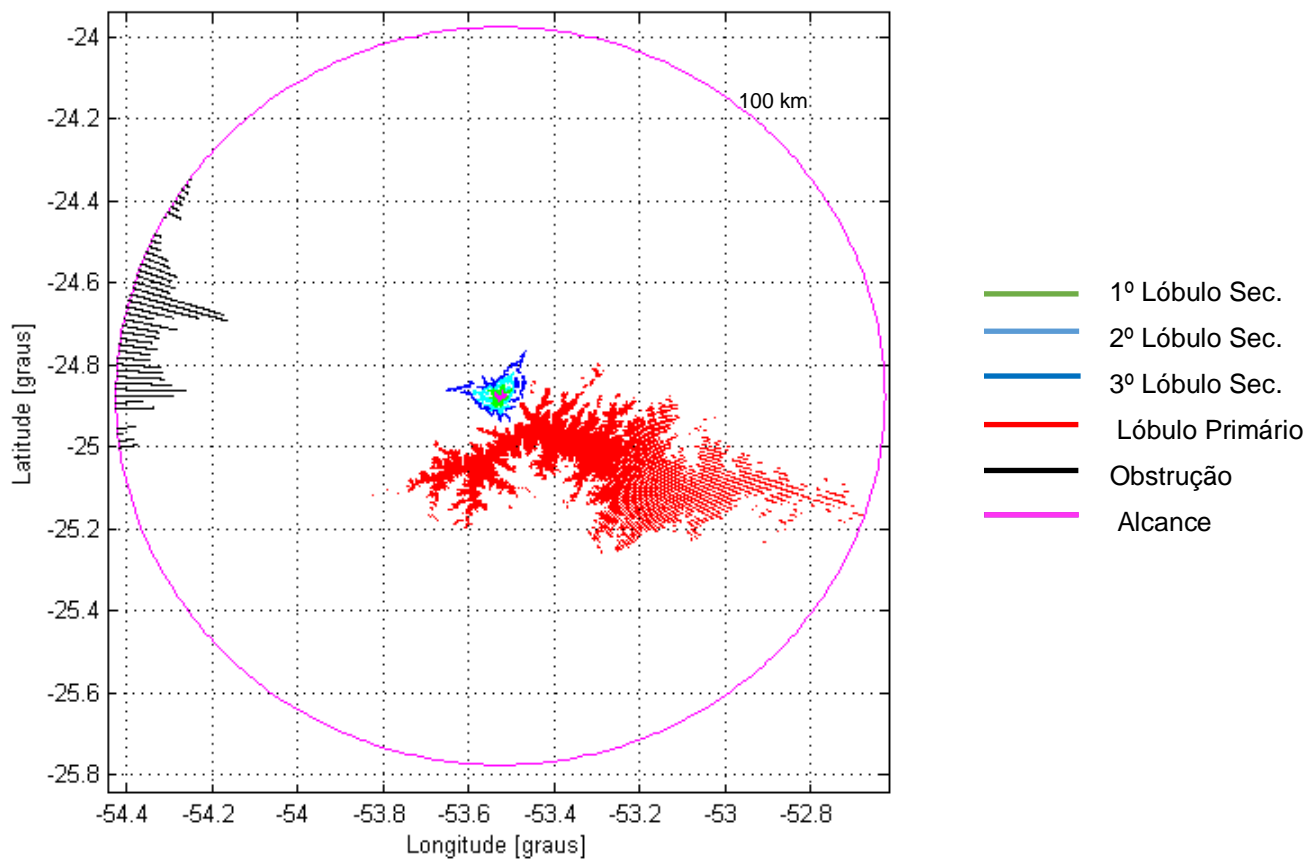


FIGURA 56 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,3°. FONTE: O AUTOR.

Estimação dos ecos de terreno do radar CAS

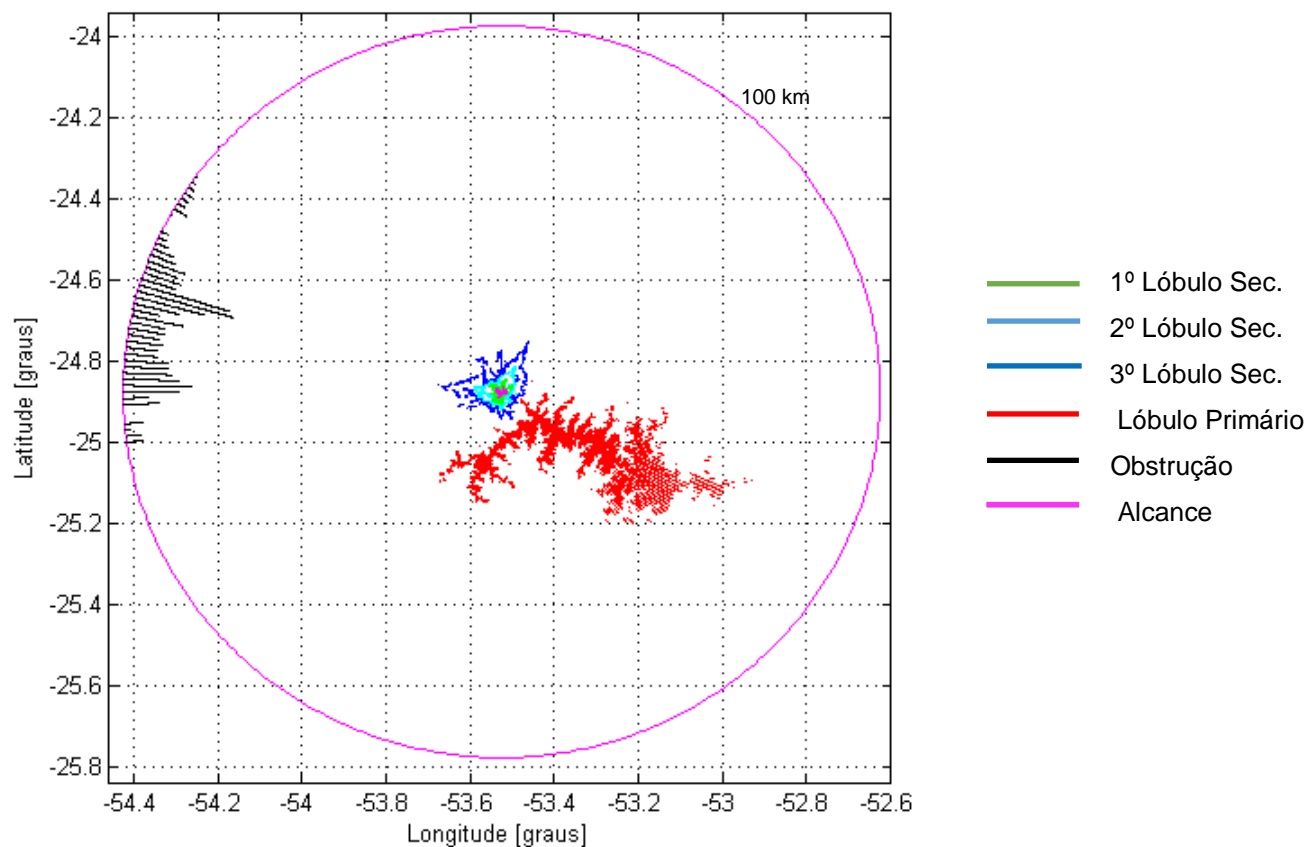


FIGURA 57 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,4°. FONTE: O AUTOR.

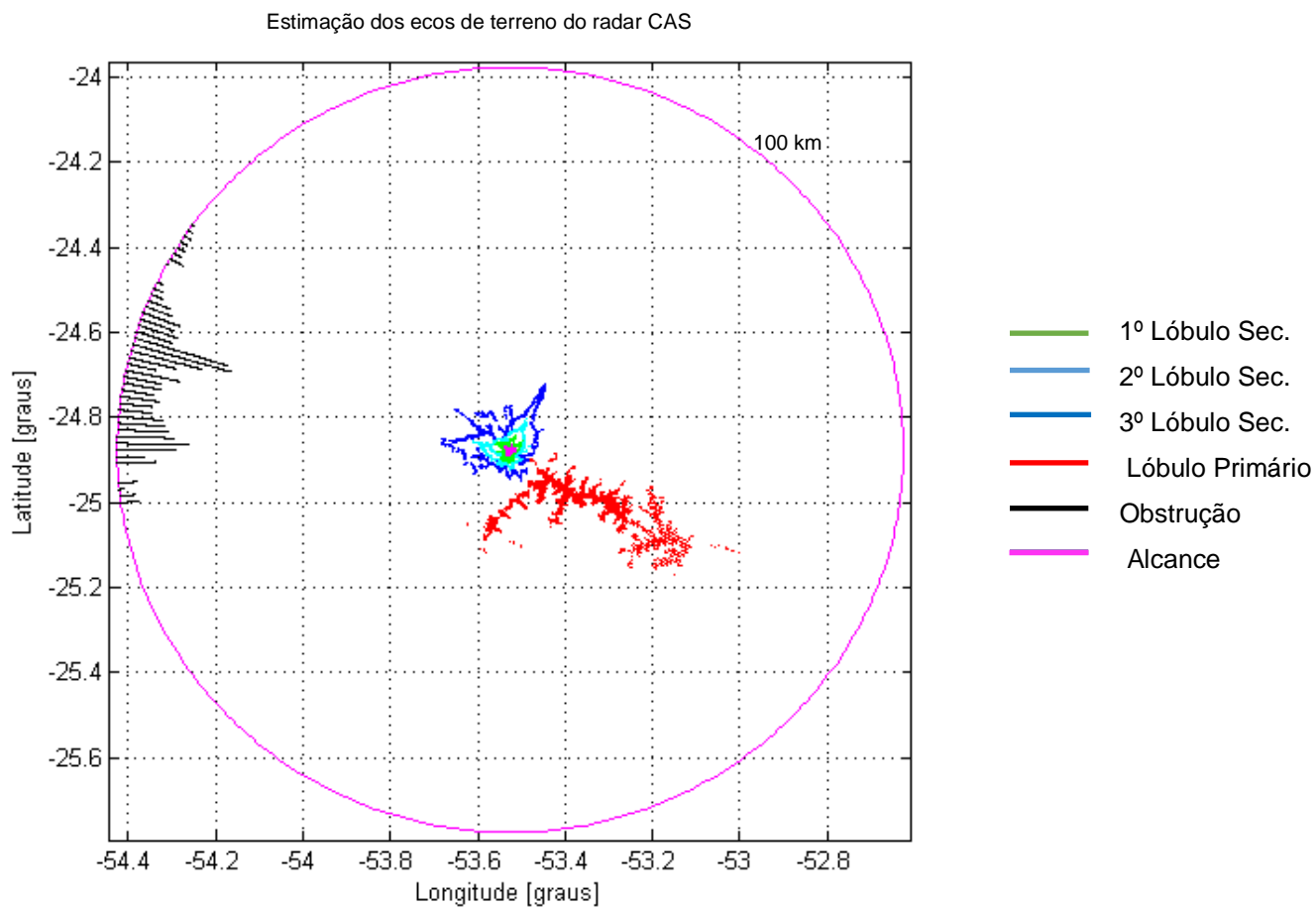


FIGURA 58 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,5°. FONTE: O AUTOR.

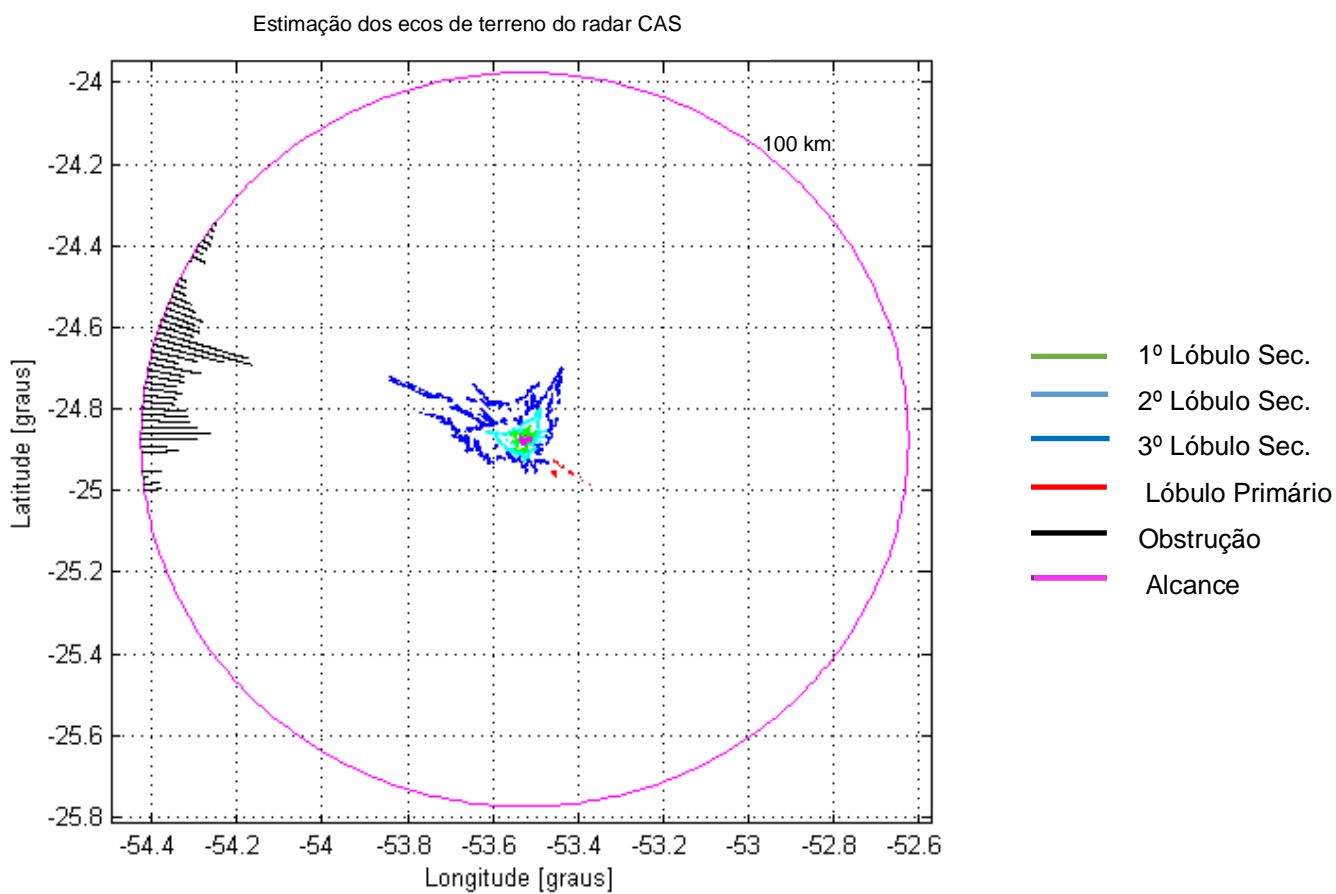


FIGURA 59 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,6°. FONTE: O AUTOR.

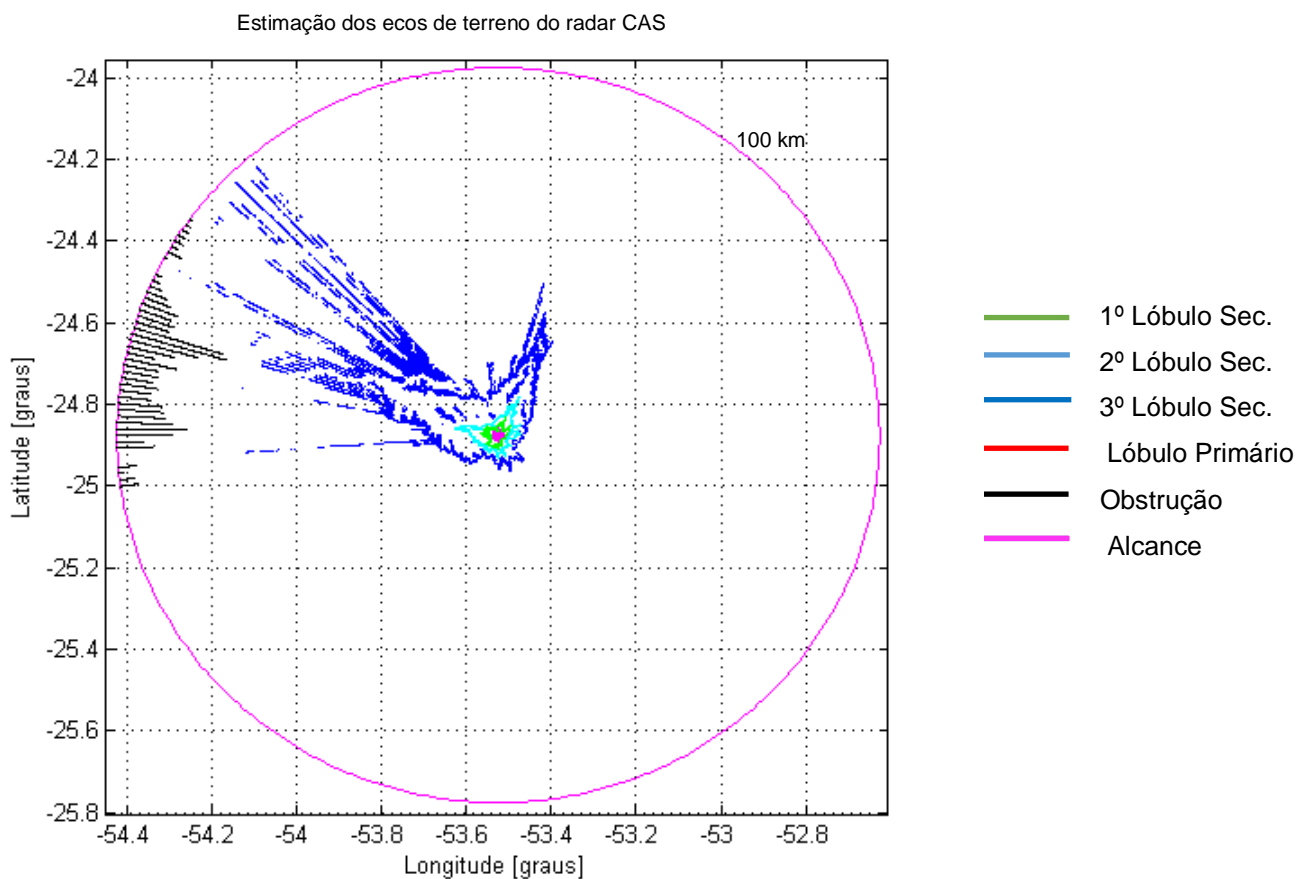


FIGURA 60 - ECOS DE TERRENO GERADOS A PARTIR DE ELEVAÇÃO DE 0,7°. FONTE: O AUTOR.

### 3.20. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA ESTIMAÇÃO.

Constata-se que o algoritmo gera resultados condizentes com o esperado, ou seja, elevações baixas geram mais ecos de terreno provenientes do lóbulo principal e as mais altas dos lóbulos secundários.

Das estimações, observa-se a noroeste do radar uma região com obstrução total dos feixes do radar, necessitando maior detalhamento.

### 3.21. ECOS DE TERRENO MEDIDOS PELO RADAR DE CASCAVEL.

A Figura 61 ilustra os ecos de terreno medidos pelo radar de Cascavel. Estes ecos foram obtidos através da média de uma semana de medições do radar sem a presença de eventos meteorológicos.

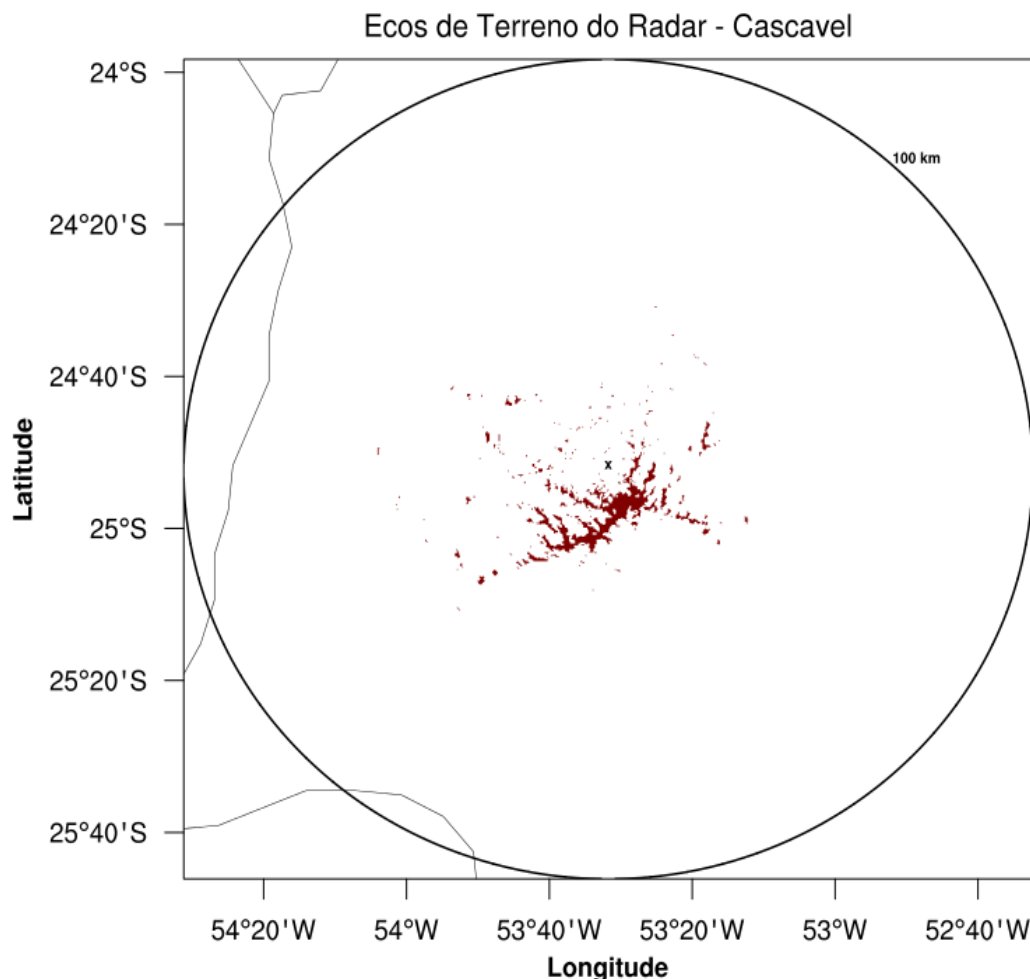


FIGURA 61 - ECOS DE TERRENO MEDIDOS PELO RADAR. FONTE: [47]

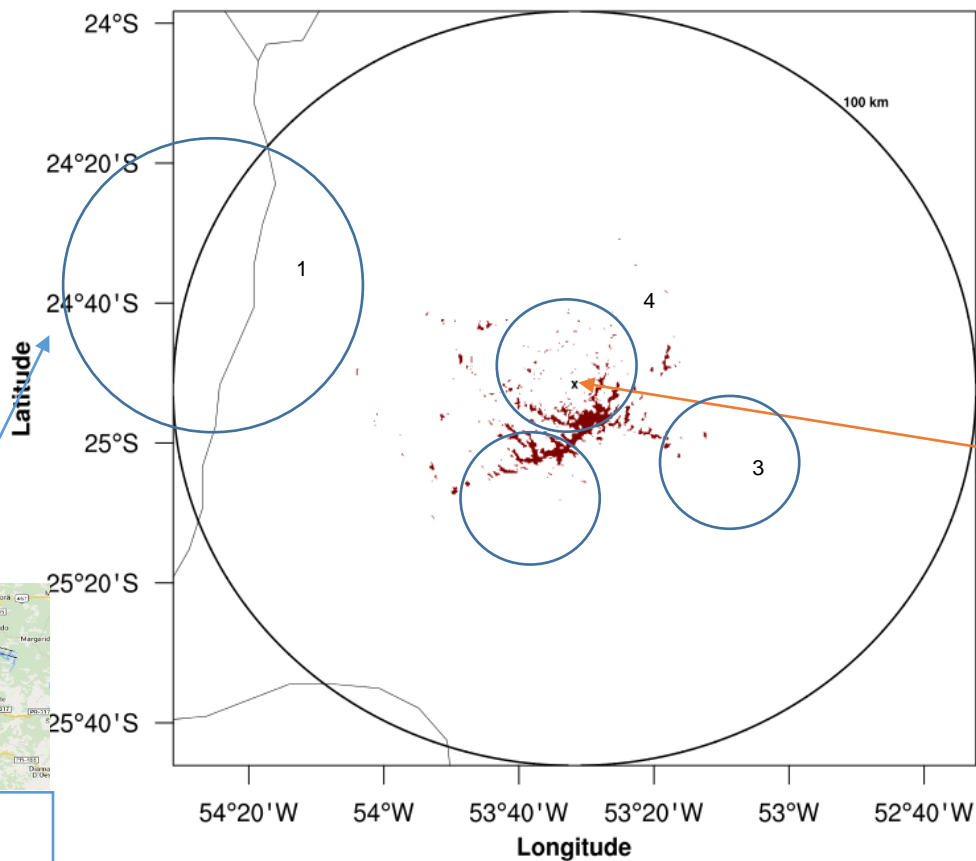
### 3.22. ANÁLISE DOS ECOS MEDIDOS PELO RADAR DE CASCAVEL.

Na medição dos ecos de terreno do radar de Cascavel não há como distinguir visualmente se os ecos de terreno são provenientes dos lóbulos secundários ou principal. Os ecos de terreno captados pelo radar de Cascavel se comparados com os captados pelo radar de Teixeira Soares, estão concentrados próximos ao *site* do radar.

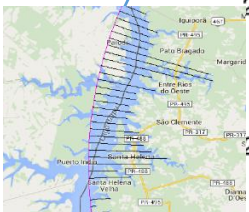
### 3.23. COMPARAÇÃO ENTRE OS ECOS DE TERRENO MEDIDOS E OS ESTIMADOS DO RADAR DE CASCAVEL.

A Figura 62 apresenta os ecos medidos e estimados, na qual pode-se observar as principais diferenças obtidas. Utilizou-se para tal, os ecos de terreno medidos para a elevação de  $0,5^\circ$  comparando com resultado da estimaco de  $0,5^\circ$ . O erro admissvel indicado pelo fabricante do radar para elevaces  de  $\pm 0,05^\circ$ .

Ecos de Terreno Medidos (0,5°) – Cascavel



Localização do sítio do radar



Lago de Itaipu

Estimação dos ecos de terreno (0,5°) – CAS

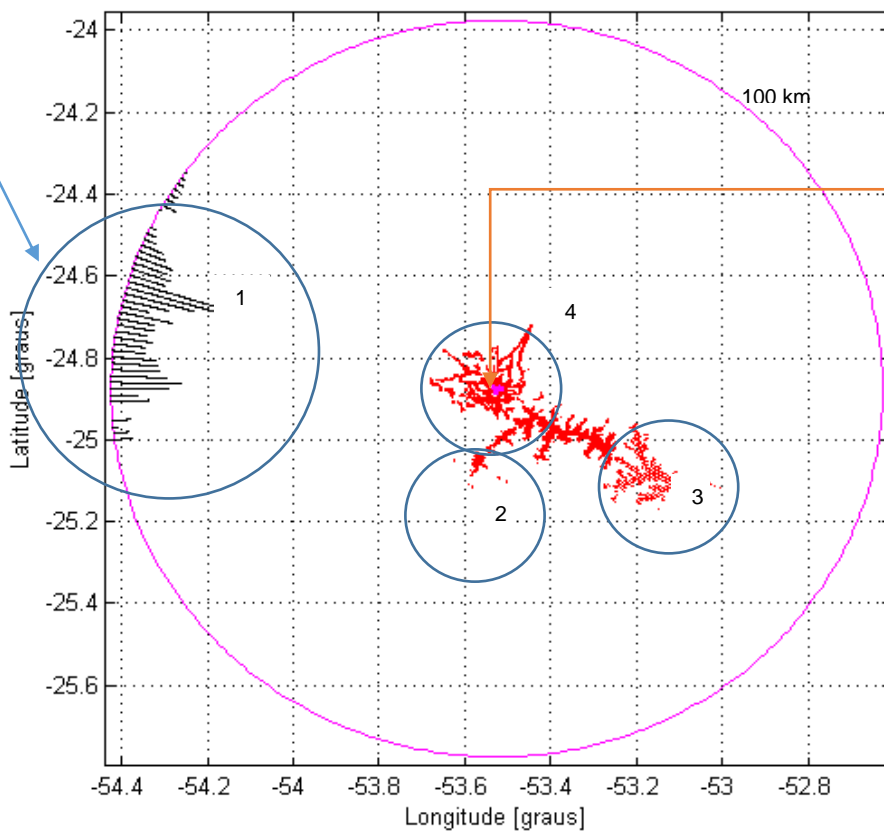


FIGURA 62 - COMPARATIVO ENTRE A MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DE ECOS DE TERRENO. FONTE: O AUTOR.

Analisando os resultados, constata-se a existência de similaridade entre ambos. Pode-se observar que a estimacão apresenta na região próxima ao radar menos ecos de terreno que os ecos medidos. A região assinalada com 1 possui ecos de terreno que segundo [36], são provenientes do método de aquisico dos dados *SRTM*, alertando que sob grandes superfícies d'água existe a possibilidade de inconsistência na base de dados, fato este observado nesta região e corroborado pela visualizaco de mapas sobrepostos na Figura [63] onde pode-se visualizar a região do lago de Itaipu sobreposto aos ecos de terreno em questão. Na região 2 indicada, detectou-se mais ecos de terreno na medio que na estimacão, o oposto ocorre na região 3 em que a estimacão detecta mais ecos de terreno que a medio.

Observa-se uma pequena diferença entre o georreferenciamento da imagem de satélite e as coordenadas medidas por GPS da localizaco do radar.

A informaco de elevacão simulada corresponde ao mesmo valor de elevacão medido e observado pelo radar de Cascavel.

### **3.24. VISUALIZACO DOS ECOS DE TERRENO ESTIMADOS DO RADAR DE CASCAVEL SOBREPOSTO AO MAPA RODOVIÁRIO**

Para enriquecer o resultado obtido pelo estimador plotou-se como pano de fundo dos ecos de terreno o mapa rodoviário que pode ser visualizado na Figura 63.

Devido a topografia da região, nota-se que o radar de Cascavel possui ecos de terreno somente na região próxima ao radar.

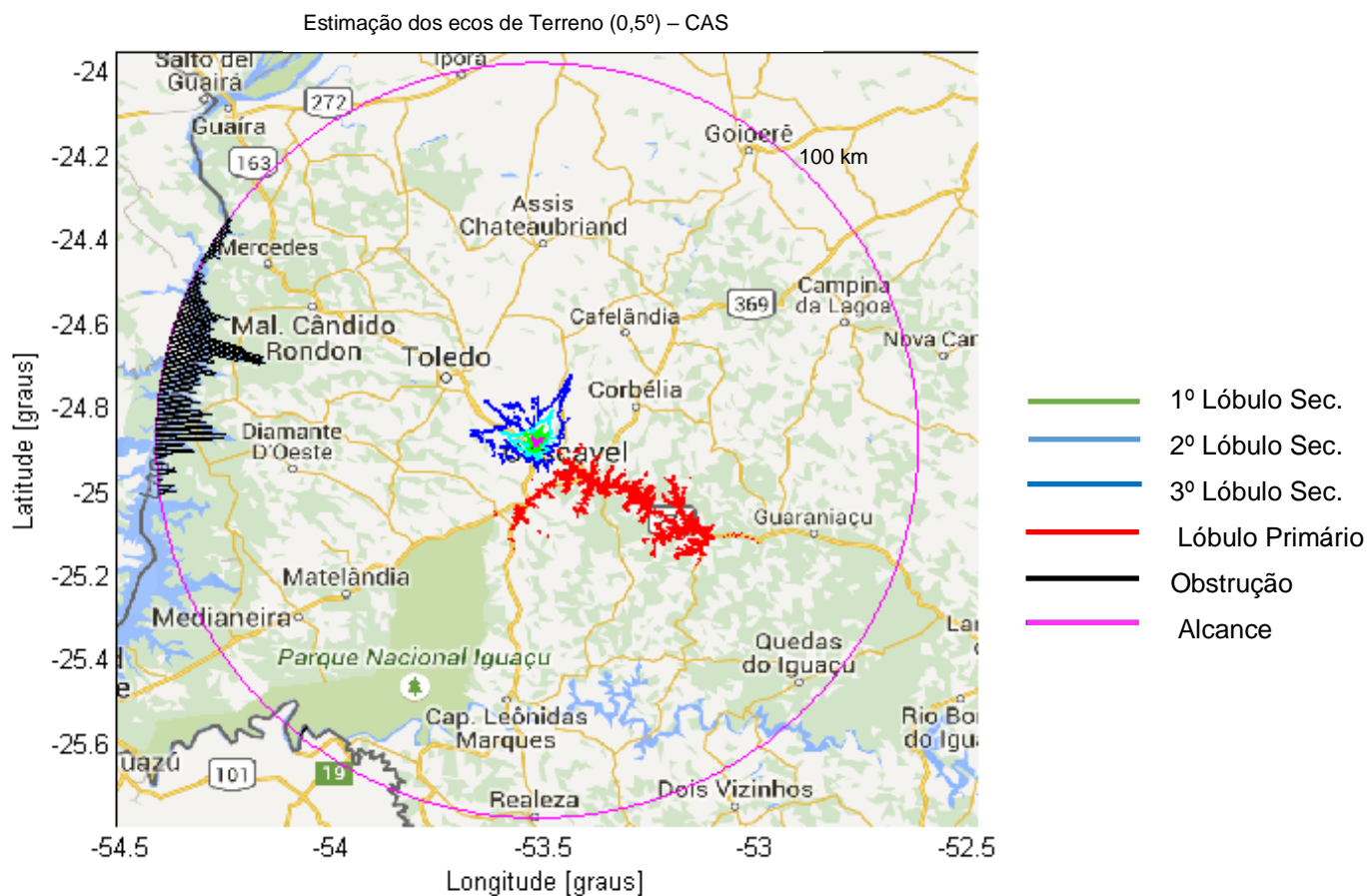


FIGURA 63 - ECOS DE TERRENO SOBREPOSTO A MAPA RODOVIÁRIO. FONTE: O AUTOR

Nota-se também que, para a elevação de 0,5°, o estimador indicou que os ecos de terreno estão concentrados nas rodovias de acesso à cidade de Cascavel bem como na região próxima do *site* do radar.

### 3.25. VISUALIZAÇÃO DOS ECOS DE TERRENO ESTIMADOS DO RADAR DE CASCAVEL SOBREPOSTO AO MAPA HÍBRIDO (SATÉLITE/RODOVIÁRIO)

O mapa de ecos de terreno gerado pelo algoritmo estimador sobreposto ao mapa híbrido satélite-rodoviário, traz informações valiosas que podem de auxiliar a análise da viabilidade de um *site* de radar, antecipando problemas como o crescimento

urbano e problemas ambientais que podem ser fatores decisivos na implementação de um novo sistema de radar.

Na Figura 64, plotada com uma aproximação maior, é possível observar com mais detalhes os ecos de terreno. Pode-se observar o alcance de cada um dos lóbulos radiados pela antena do radar e seu alcance em relação à cidade de Cascavel.

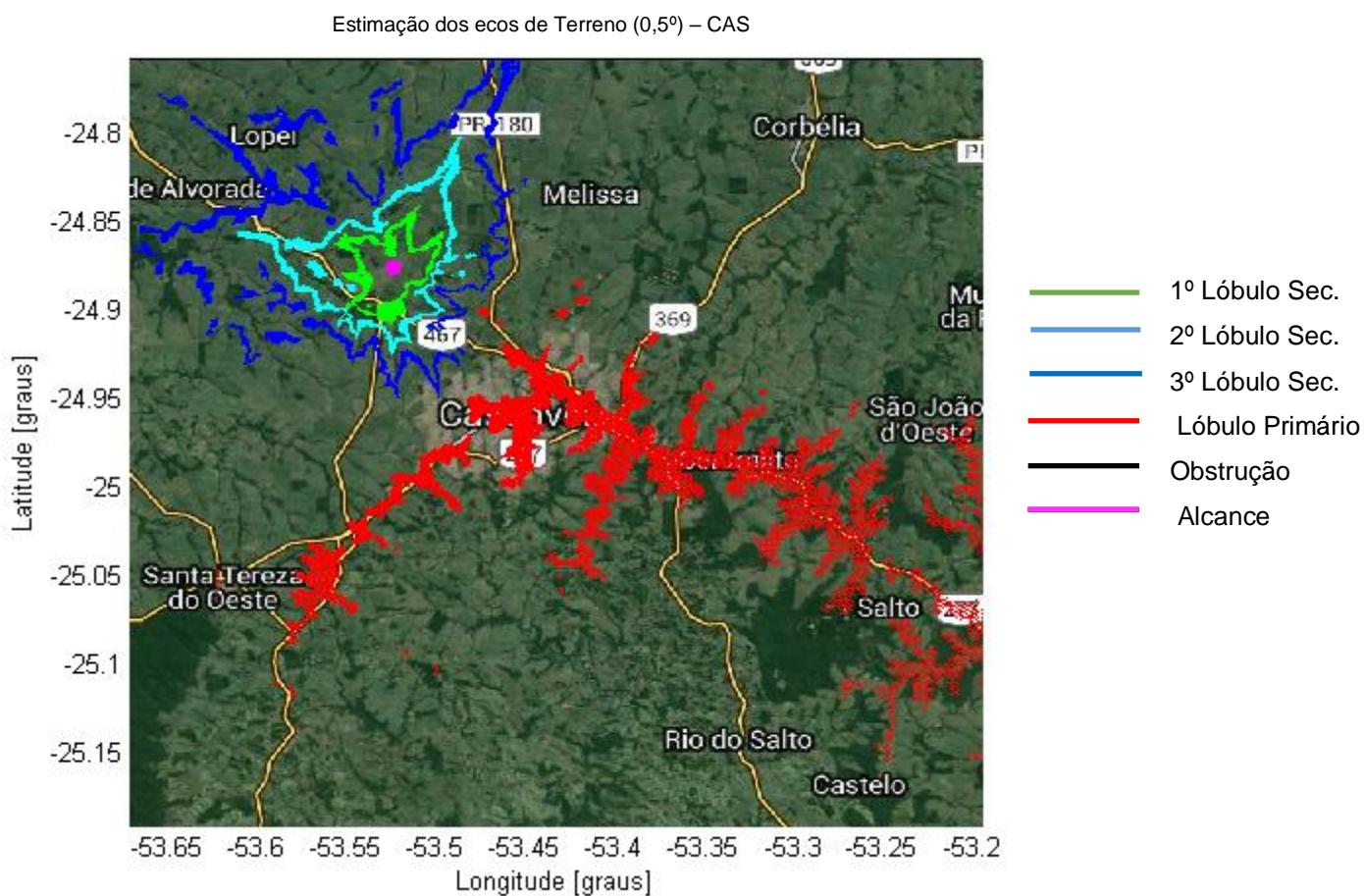


FIGURA 64 - MAPA HÍBRIDO (SATÉLITE/RODOVIÁRIO) SOBREPOSTO AOS ECOS DE TERRENO. FONTE: O AUTOR.

## CAPÍTULO 4

# CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 4.1. CONCLUSÕES

Através do estudo apresentado neste trabalho elaborou-se um estimador numérico dos ecos de terreno de radar através da implementação de um algoritmo que utiliza informações *G/S* livremente disponíveis na web usando o MATLAB como plataforma de desenvolvimento rápido de aplicações.

Caracterizou-se a propagação de sinais de radar a partir da óptica geométrica, modelando-se o diagrama de radiação da antena de radar como ondas eletromagnéticas radiadas a partir do centro focal da antena, considerando-se a trajetória dos diversos raios compreendidos dentro do ângulo de abertura de feixe dos lóbulos da antena do radar.

Integrou-se o modelo de propagação de sinais de radar a base de dados *SRTM* para garantir que o resultado tenha aplicação prática e possa ser validado.

Ao final de cada estimativa são gerados mapas de visibilidade contendo informações de contaminações e obstruções por ecos de terreno em 360° a partir da latitude e longitude desejada. A informação contida nestes mapas é útil no projeto de sistemas de radar meteorológico, sobretudo na escolha do local de instalação que tenha melhor resposta em relação aos ecos de terreno.

Da análise dos resultados das estimativas de ecos de terreno para os radares de Teixeira Soares e Cascavel e comparação dos ecos medidos com os estimados, nota-se que os lóbulos secundários não são os principais responsáveis pela contaminação dos dados, e sim os ecos de terreno originários do lóbulo principal. Este tipo de discriminação dos dados não é possível de ser observado nos dados medidos, pois o radar não distingue a contaminação entre lóbulos secundários e principais.

Notou-se algumas peculiaridades nos ecos de terreno medidos pelo radar de Teixeira Soares, pois encontram-se em uma área maior que os ecos estimados. Também é possível observar uma diferença de +0,2° no apontamento em elevação para este radar, esta diferença indica que mais de uma elevação deve ser simulada

para análise de ecos terreno com o intuito de mitigar possíveis erros de apontamento na elevação de uma antena de radar.

No radar de Cascavel ocorre o oposto do de Teixeira Soares. Os ecos de terreno estimados são ligeiramente maiores que os medidos, não há diferença de apontamento em elevação entre os ecos de terreno medidos e os estimados para o radar de Cascavel.

Validou-se este método utilizando-se dados de radares reais instalados no Estado do Paraná. Constatou-se a validade dos princípios da óptica geométrica aplicado à propagação de sinais eletromagnéticos neste trabalho e que, o modelo é útil para o planejamento de novos *sites* de radar, assim como, no estudo de minimização de ecos de terreno e no planejamento de redes de cobertura de radar.

## 4.2. TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho modelou-se parte do diagrama de radiação da antena de radar, considerando a abertura dos lóbulos a -3dB da potência de pico. Como proposta de continuidade deste trabalho, propõe-se:

- i. Melhorar o modelamento do diagrama de radiação da antena através da inclusão de diferentes aberturas para os lóbulos no estimador, buscando por comparação aberturas que melhor representem os ecos de terreno medidos pelos radares considerando outro ponto abaixo dos -3dB de pico.
- ii. Criar uma função de abertura variável dos lóbulos em função da distância levando em consideração as atenuações do espaço livre e a sensibilidade do receptor.
- iii. Incluir uma função que aumente a abertura do feixe da antena em função da velocidade de rotação da antena.
- iv. Atualizar a atual base de dados topográfica para uma maior resolução para obtenção de melhores resultados de estimação. Recentemente a *NASA* anunciou que disponibilizaria gradativamente a partir de setembro de 2014 os dados topográficos *SRTM* de 30 m de resolução o que aumenta a qualidade da atual base de dados de 90 m, por conseguinte dos resultados apresentados pelo estimador.

- v. Modelar outros de diagramas de radiação de antenas de radar (aberturas diferentes em função da frequência de operação) para que o algoritmo possa estimar os ecos de terreno de qualquer tipo de radar meteorológico ou até mesmo outros tipos de radar.
- vi. Expandir deste trabalho para cobrir outros fenômenos de propagação através da implementação de um propagador de ondas utilizando a aproximação paraxial.

## REFERÊNCIAS

- [1] CAILLON N., SEVERINGHAUS J. P., JOUZEL J., BARNOLA J.-M., KANG J., LIPENKOV V. Y., **“Timing of atmospheric CO<sub>2</sub> and Antarctic temperature changes across termination III.”** Science, vol. 299, no. 5613, pp. 1728–1731, 2003.
- [2] GOVERNO FEDERAL, **“Plano Nacional sobre Mudança do Clima,”** Com. interministerial sobre mudança do clima, pp. 1–132, 2008.
- [3] BILLINGSLEY J. B., **Low Angle Radar Land Clutter.** Schitech, 2002.
- [4] RICO-RAMIREZ M. A., CLUCKIE I. D., **“Classification of ground clutter and anomalous propagation using dual-polarization weather radar,”** IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 46, no. 7, pp. 1892–1904, 2008.
- [5] BACHMANN S. M., **“Using the existing spectral clutter filter with the non-uniformly spaced time series data in weather radar,”** IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 5, no. 3, pp. 400–403, 2008.
- [6] DOMENIKIOTIS C., DALEZIOS N. R., FARASLIS I., **“GIS-based weather radar siting procedure in mountainous terrain,”** Phys. Chem. Earth, vol. 35, no. 1–2, pp. 35–42, 2010.
- [7] LEE H.-S., PARK H.-G., KIM H.-T., KIM K.-T., **“Radar cross-section prediction based on shooting and bouncing rays using line tracing method,”** IEICE Electron. Express, vol. 11, no. 6, pp. 20140102–20140102, 2014.
- [8] AUER S., HINZ S., BAMLER R., **“Ray-tracing simulation techniques for understanding high-resolution SAR images,”** IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 48, no. 3 PART2, pp. 1445–1456, 2010.
- [9] VIRKKI A., MUINONEN K., **“Radar scattering by boulders studied using geometric optics,”** Planet. Space Sci., pp. 1–8, 2015.

- [10] LIU J., FANG N., WANG B., ZHANG L., “**AN EFFICIENT RAY-TRACING METHOD FOR RCS PREDICTION IN GRECO,**” vol. 55, no. 3, pp. 895–896, 2006.
- [11] BORN M. & EMIL W., **Principles of optics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [12] DARTORA C. A, NOBREGA K. Z., MONTAGNER V. F., HEILMAMA, FILHO H. T. S., “**Aspectos gerais da teoria da difração sob o ponto de vista de um princípio de incerteza,**” Rev. Bras. Ensino Física, vol. 31, p. 2303, 2009.
- [13] KOVALENKO S. A., “**Descartes-Snell law of refraction with absorption,**” Semicond. Physics, Quantum Electron. Optoelectron., vol. 4, no. 3, pp. 214–218, 2001.
- [14] A. STANDARDS AND P. SOCIETY, **IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas**, vol. 1993. 2004.
- [15] ORFANIDIS S. J., **Electromagnetic Waves and Antennas**. Piscataway: ECE Department, 2002.
- [16] BALANIS C. A., **Antenna theory**, 3rd ed. New Jersey: John Wiley & sons, 2005.
- [17] SKOLNIK M. I., **Radar Handbook**, 3rd ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2008.
- [18] MAHAFZA B. R., **Radar systems analysis and design using MATLAB**. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2000.
- [19] “**IEEE Standard radar definitions,**” Radar Syst. Panel IEEE Aerosp. Electron. Syst. Soc., vol. 1997, 1997.
- [20] SMITH P. L., **Fundamentals of Weather Radar**. South Dakota: School of Mines and Technology, 1972.
- [21] RINEHART R. E., **Radar for Meteorologists**, 3rd ed. Grand Forks: Rinehart Publications, 1997.

- [22] PROBERT-JONES J. R., “**The radar equation in meteorology,**” Q. J. R. Meteorol. Soc., vol. 88, no. 378, pp. 485–495, Oct. 1962.
- [23] CURRY G. R., **Radar Essentials: A Concise Handbook for Radar Design and Performance Analysis.** Raleigh: SciTech Publishing, Inc., 2012.
- [24] ARCHIBALD E., “**Enhanced clutter processing for the U.K. weather radar network,**” Phys. Chem. Earth, Part B Hydrol. Ocean. Atmos., vol. 25, no. 10–12, pp. 823–828, 2000.
- [25] GRECO M. S. & WATTS S., “**Radar Clutter Modeling and Analysis,**” 2014, pp. 513–594.
- [26] BENETI C. A. A., “**Caracterização Hidrodinâmica e Elétrica de Sistemas Convectivos de Mesoescala,**” Tese (Doutorado em Meteorologia) - Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2012.
- [27] LONG M. & ZEHNER S., “**Effects of the Sea on Radar Echo from Rain,**” IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-6, no. 6, pp. 821–824, Nov. 1970.
- [28] LONG M., **Radar Reflectivity of Land and Sea,** 3rd ed. Artech House Publishers, 2001.
- [29] DA SILVEIRA R. B. & HOLT A. R., “**An automatic identification of clutter and anomalous propagation in polarization-diversity weather radar data using neural networks,**” IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 39, no. 8, pp. 1777–1788, 2001.
- [30] BRINGI V. N., CHANDRASEKAR V., MEISCHNER P., HUBBERT J., & GOLESTANI Y., “**Polarimetric radar signatures of precipitation at S and C-bands,**” IEE Proc. F Radar Signal Process., vol. 138, no. 2, p. 109, 1991.
- [31] DA SILVEIRA R. B., “**Efeitos da Circulação Atmosférica na Propagação de Ondas Eletromagnéticas. Um Estudo de Caso em São Paulo,**” Dissertação de Mestrado - Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 1992.

- [32] “**MATLAB**,” 2014. [http://www.mathworks.com/index.html?s\\_tid=gn\\_logo](http://www.mathworks.com/index.html?s_tid=gn_logo).
- [33] DE SOUSA L., NERY F., & MATOS J., “**Metodologias de Processamento de Dados SRTM para a Produção de Modelos Digitais de Direções de Escoamento**,” 8º Congr. da Água, no. 1998, pp. 1–10, 2006.
- [34] GOOGLE, “**APIs de imagem do Google Maps**,” 2013. [Online]. Disponível: <https://developers.google.com/maps/documentation/s>. [Acessado: 10-Set-2013].
- [35] SNAY R. & SOLER T., “**Modern Terrestrial Reference Systems PART 3: WGS 84 and ITRS**,” Prof. Surv., no. March, pp. 1–3, 2000.
- [36] RODRIGUEZ E., MORRIS C., & BELZ J., “**A global assessment of the SRTM performance**,” Photogramm. Eng. Remote Sensing, vol. 72, no. 3, pp. 249–260, 2006.
- [37] ROSEN P., HENSLEY S., & JOUGHIN I., “**Synthetic aperture radar interferometry**,” Proc. IEEE, vol. 88, no. 3, 2000.
- [38] HÖLZ S., “**GetSRTMData**,” 2004. [Online]. Disponível: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/5544-getsrtmdata>. [Acessado: 01-Set-2013].
- [39] NEWTON S. I., **Opticks. Or a Treatise Of The Reflections, Refractions, Inflections And Of Light**, 4th ed. London: William Innys at the West-End of St. Paul’s, 1730.
- [40] ZHANG J., HOWARD K., & GOURLEY J. J., “**Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: Examples of convective storms and stratiform rain echoes**,” J. Atmos. Ocean. Technol., vol. 22, no. 1, pp. 30–42, 2005.
- [41] DOVIK R. J. & ZRNIĆ D. S., **Doppler Radar and Weather Observations**, 2nd ed. Mineola: Dover Publications, 1993.

- [42] SANCHES C. A., **Projetando redes WLAN: conceito e práticas**, 2nd ed. São Paulo: Érica, 2007.
- [43] MINEROPAR, "**Minerais Do Paraná Atlas Geomorfológico Do Estado Do Paraná.**" p. 63, 2006.
- [44] DE SOUZA M. F., DARTORA C. A., DA SILVEIRA R. B., & NÓBREGA K. Z., "**Um breve tratado sobre a aproximação o paraxial,**" Rev. Bras. Ensino Física, vol. 36, no. 3, p. 3308, 2014.
- [45] NASA. **Shuttle Radar Topography Mission.** Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em: 10 jan. 2014.
- [46] **ASCSignal.** Disponível em: <<http://ascsignal.com/radar-antennas/weather-radar-antennas/>>. Acesso em: 5 mar. 2013.
- [47] OLIVEIRA C., 2015. **Bolsista do SIMEPAR.**
- [48] BEAN B. R. & DUTTON E. J., **Radio Meteorology**, New York, NY: Dover Publications, 1968.

## ANEXO A

# VARIAÇÃO DA ALTITUDE DOS FEIXES EM PERFIL

Com o intuito de verificar a variação da altitude dos feixes em relação à topografia foram geradas as Figuras 57 até 66, contendo o perfil topográfico do radar de Teixeira Soares com azimute fixo em  $90^\circ$ , sobreposto aos feixes para elevações deste  $0^\circ$  até  $0,9^\circ$ . Fixou-se uma única posição com a finalidade de comparar a posição dos feixes com a topografia a medida que se varia a elevação da antena de radar.

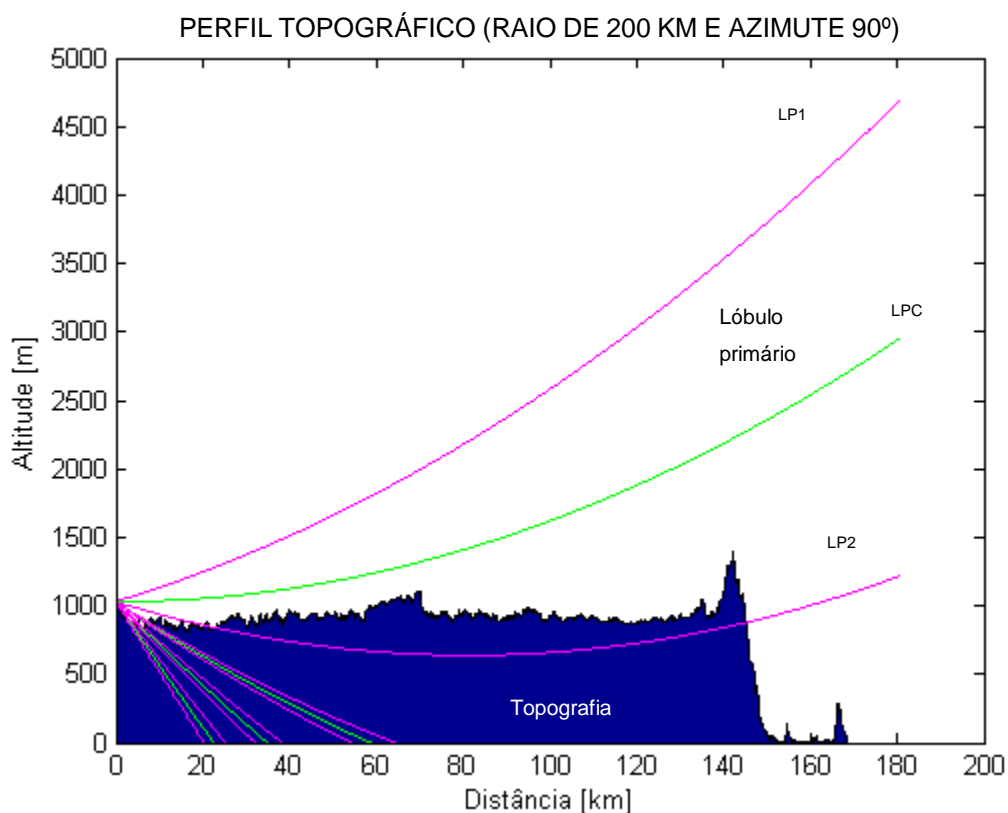


FIGURA 56 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM  $0^\circ$ . FONTE: O AUTOR.

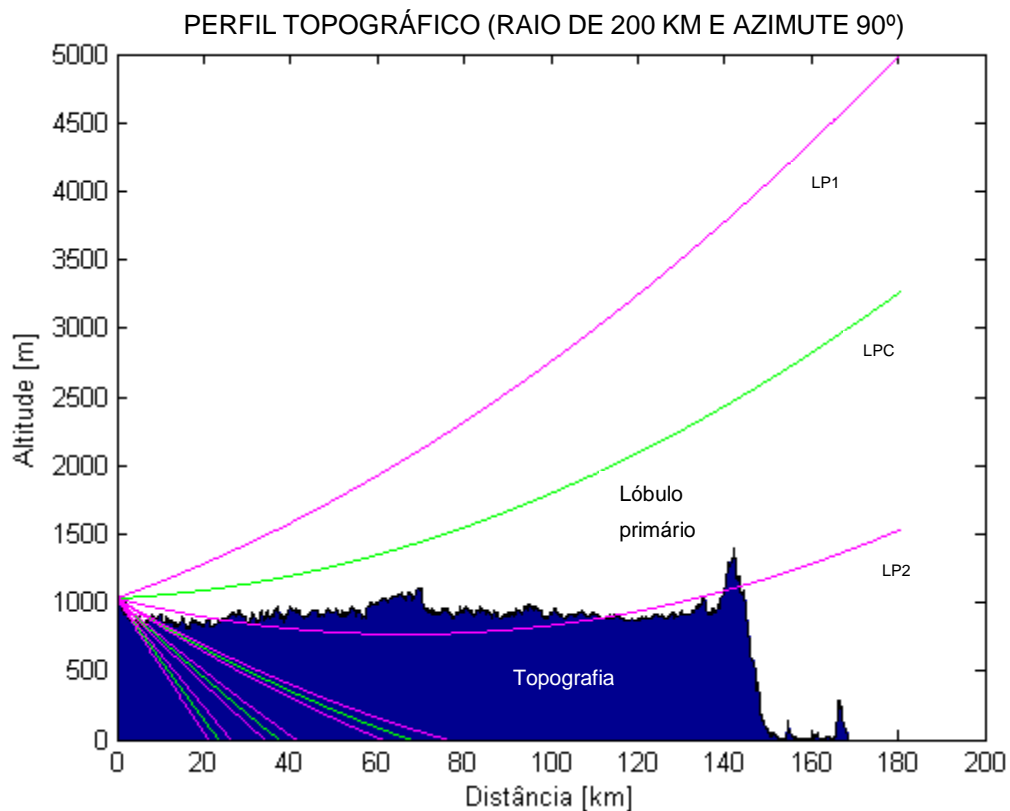


FIGURA 57 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,1°. FONTE: O AUTOR.

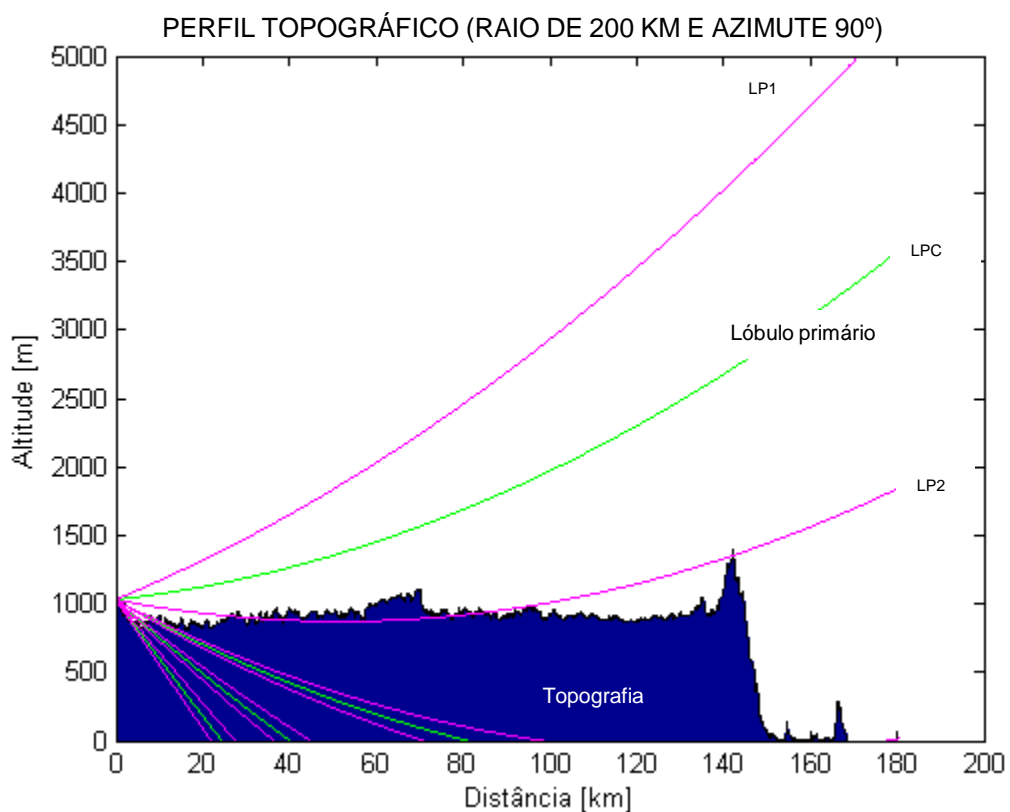


FIGURA 58 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,2°. FONTE: O AUTOR.

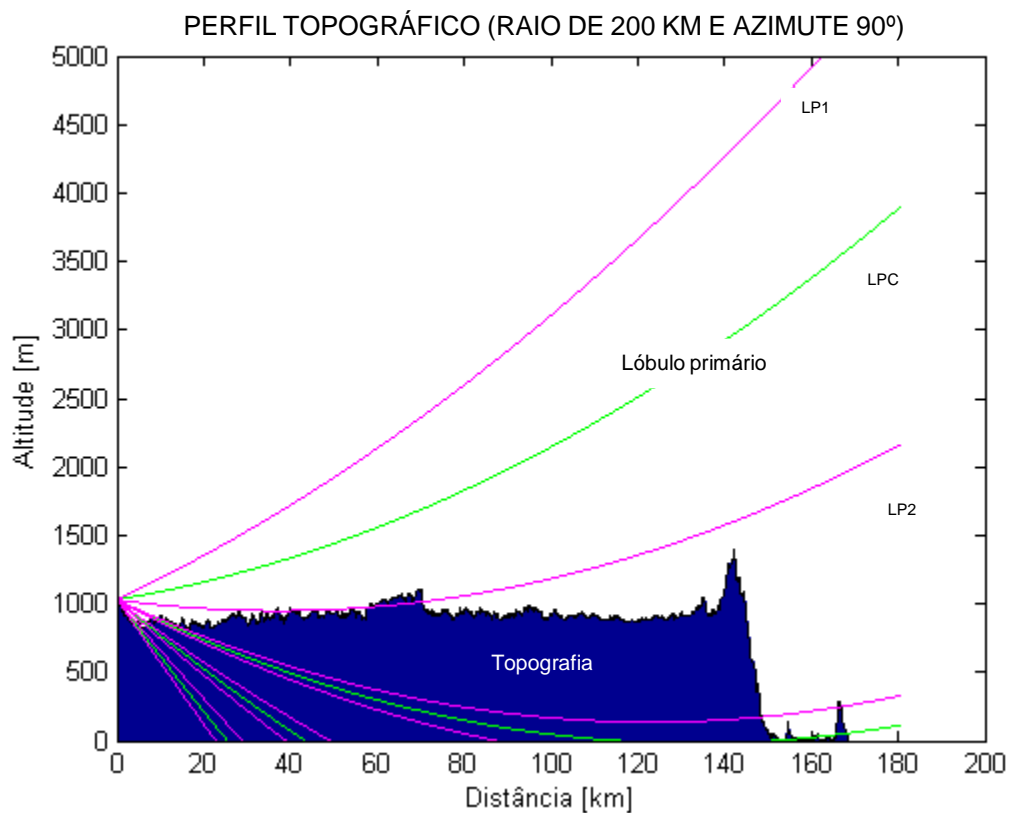


FIGURA 59 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,3°. FONTE: O AUTOR.

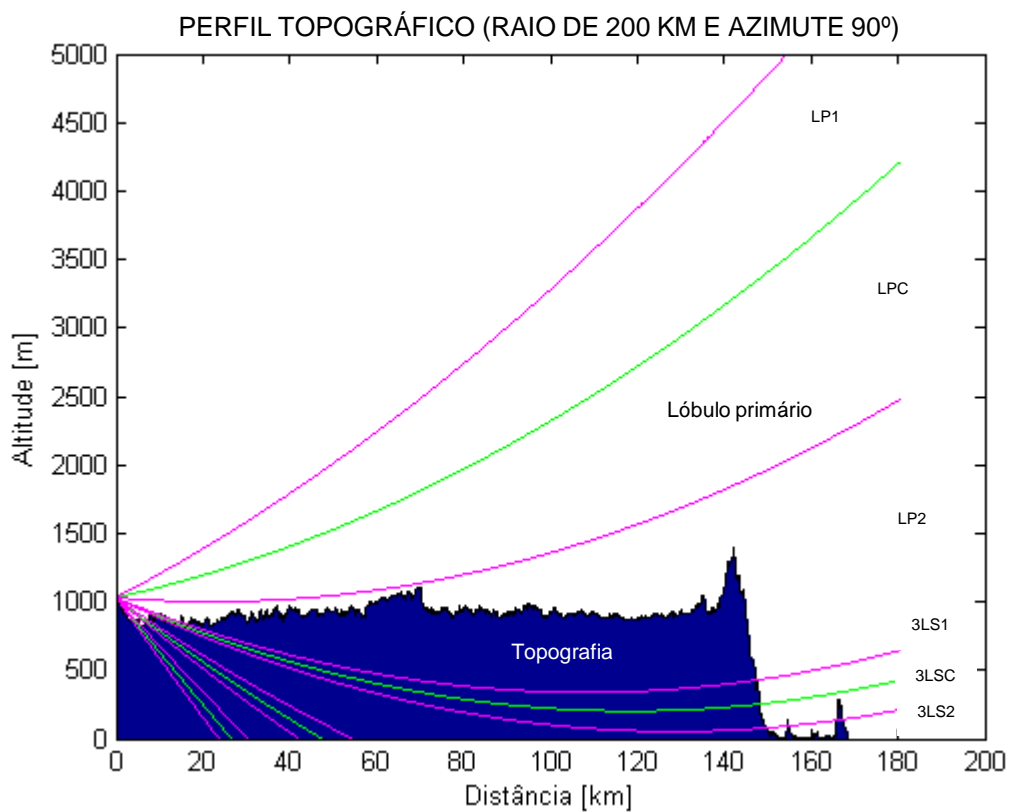


FIGURA 60 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,4°. FONTE: O AUTOR.



FIGURA 61 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,5°. FONTE: O AUTOR.

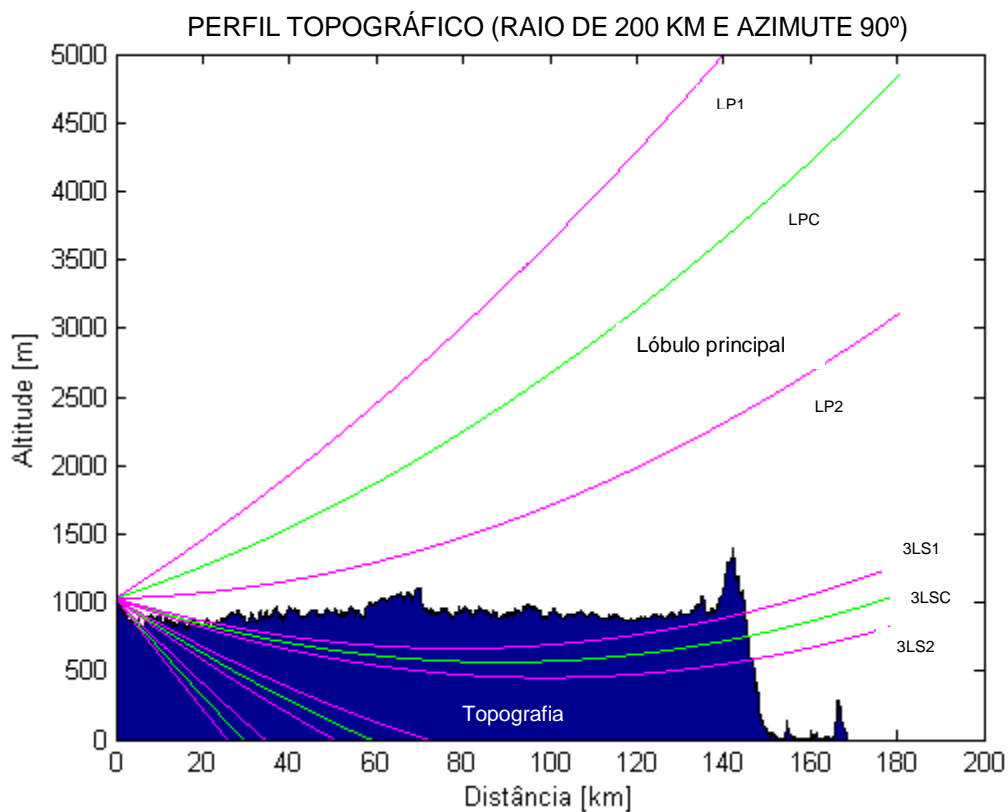


FIGURA 62 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,6°. FONTE: O AUTOR.

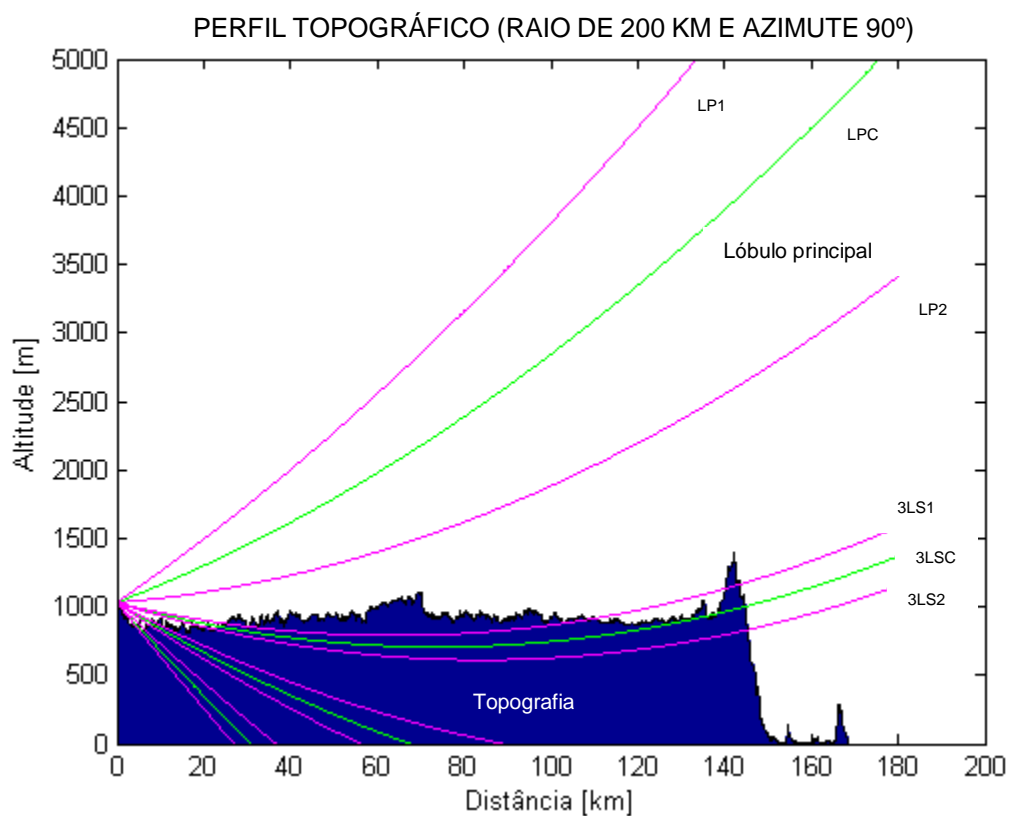


FIGURA 63 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,7°. FONTE: O AUTOR.

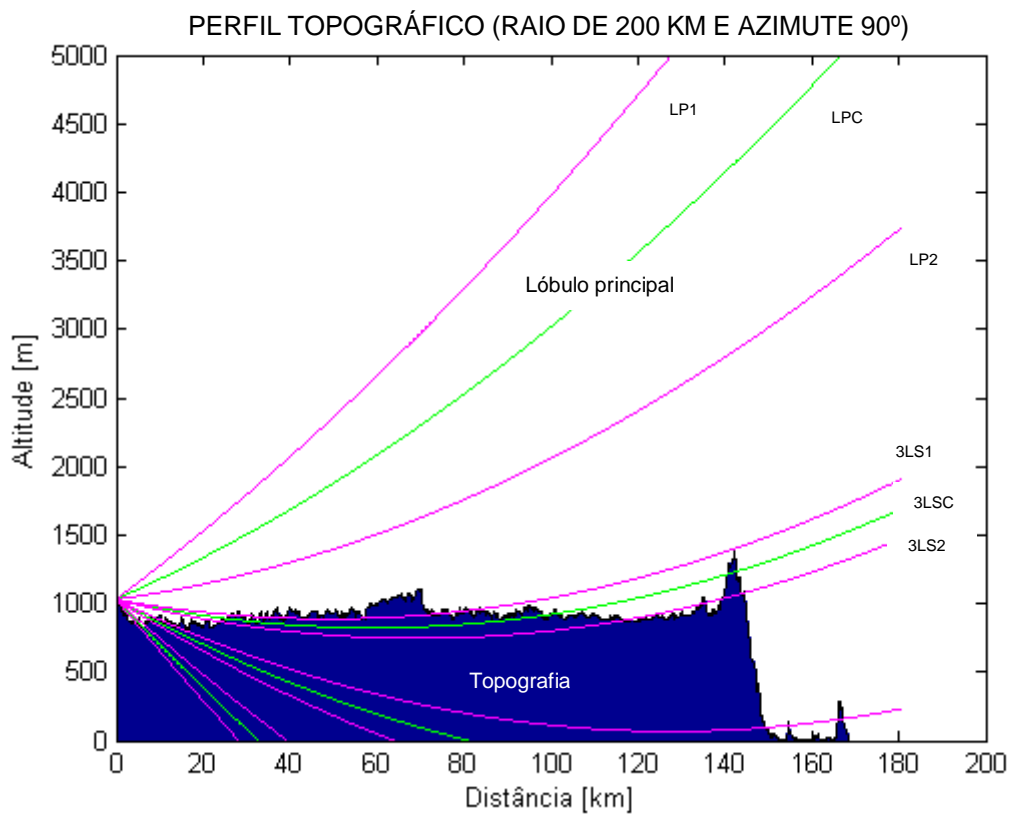


FIGURA 64 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,8°. FONTE: O AUTOR.

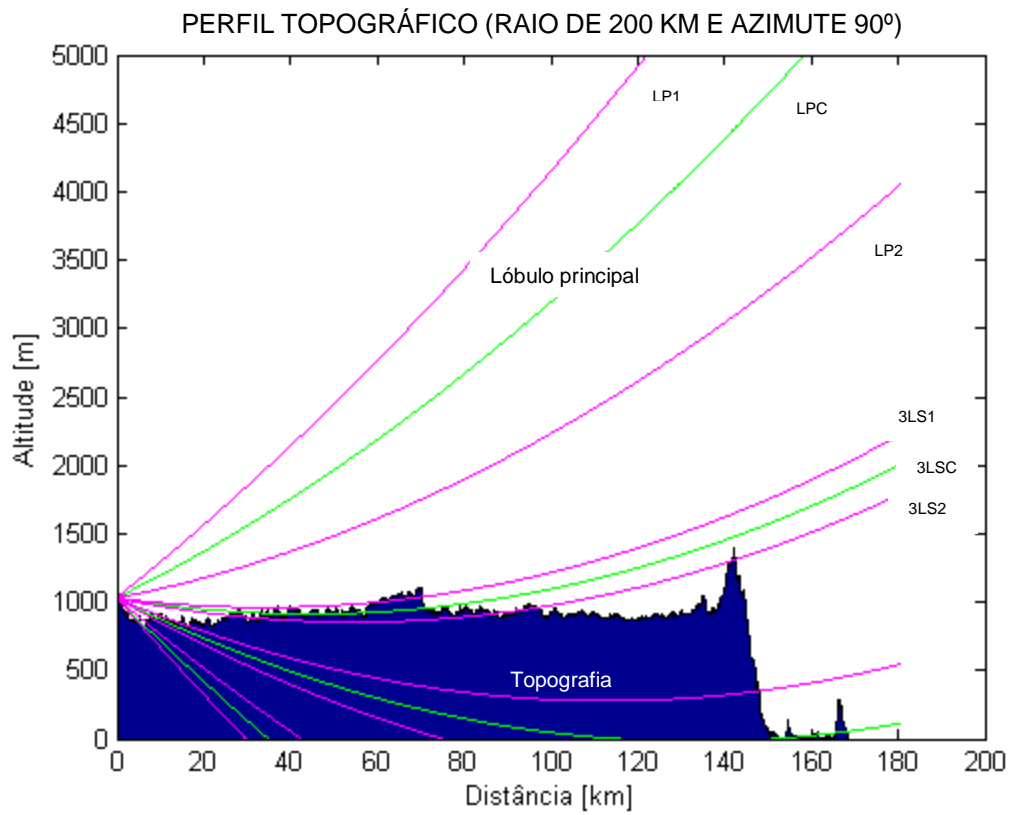


FIGURA 65 - FEIXES SOBREPOSTOS COM ELEVAÇÃO DA ANTENA EM 0,9°. FONTE: O AUTOR.