

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**



**Mateus de Castro Silva**

**CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES PARA  
MONITORAMENTO DA FRONTEIRA TERRESTRE  
BRASILEIRA**

Trabalho de Graduação  
2020

**Curso de Engenharia Aeroespacial**

**Mateus de Castro Silva**

**CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES PARA  
MONITORAMENTO DA FRONTEIRA TERRESTRE  
BRASILEIRA**

Orientador

Prof. Dr. Willer Gomes dos Santos (ITA)

Coorientadora

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Liana Dias Gonçalves (ITA)

**ENGENHARIA AEROESPACIAL**

**SÃO JOSÉ DOS CAMPOS**  
**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA**

2020

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Divisão de Informação e Documentação**

Silva, Mateus de Castro

CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES PARA MONITORAMENTO DA  
FRONTEIRA TERRESTRE BRASILEIRA / Mateus de Castro Silva.

São José dos Campos, 2020.

123f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Aeroespacial– Instituto Tecnológico de  
Aeronáutica, 2020. Orientador: Prof. Dr. Willer Gomes dos Santos. Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>.  
Liana Dias Gonçalves.

1. Microssatélites. 2. Monitoramento. 3. Constelações. 4. Satélites. 5. Fronteiras. 6. Engenharia  
aeroespacial. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Título.

**REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

SILVA, Mateus de Castro. **CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES PARA  
MONITORAMENTO DA FRONTEIRA TERRESTRE BRASILEIRA**. 2020. 123f.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica,  
São José dos Campos.

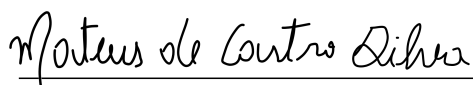
**CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Mateus de Castro Silva

TÍTULO DO TRABALHO: CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES PARA  
MONITORAMENTO DA FRONTEIRA TERRESTRE BRASILEIRA.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) / 2020

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias  
deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos  
acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte  
deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.




Mateus de Castro Silva

Av. Jorge Zarur, 471

12.243-081 – São José dos Campos–SP

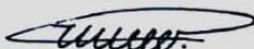
# CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES PARA MONITORAMENTO DA FRONTEIRA TERRESTRE BRASILEIRA

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Mateus de Castro Silva

Autor



Willer Gomes dos Santos (ITA)

Orientador



Liana Dias Gonçalves (ITA)

Coorientadora

Cristiane  
Aparecida Martins

Assinado digitalmente por Cristiane Aparecida Martins  
DN: C=BR, OU=Instituto Tecnológico de Aeronáutica,  
O=Cristiane Martins, CN=Cristiane Aparecida Martins,  
E=cmartins@ita.br  
Razão: Eu sou o autor deste documento  
Localização:  
Data: 2020-11-26 11:01:43

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cristiane Aparecida Martins  
Coordenadora do Curso de Engenharia Aeroespacial

São José dos Campos, 25 de novembro de 2020.



Aos amigos e família, que me motivaram para conseguir chegar até aqui, não me deixando desistir em nenhum momento. Também aos professores e orientadores que foram parceiros durante todo o projeto e forneceram total apoio para que fosse possível executá-lo.

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à minha família, que sempre estiveram comigo e me apoiaram em todos os desafios que tive em minha vida, consideração que estendo aos meus amigos e aos meus colegas de turma da AESP-20

Agradeço ainda a todos os professores que tive ao longo da faculdade, tanto no ciclo fundamental como no profissional, por me proporcionarem as condições e ferramentas adequadas para que esse trabalho fosse concluído. Em especial, gostaria de destacar meus orientadores, por estarem sempre dispostos a prestar apoio e a acrescentar.

Por fim, agradeço ao CEI (Centro Espacial ITA) por permitir a utilização dos softwares necessários nesse estudo, além do uso de suas instalações físicas, quando oportuno.

*"If I have seen farther than others,  
it is because I stood on the shoulders of giants."*

— SIR ISAAC NEWTON

# Resumo

Este trabalho apresenta a aplicação da metodologia do uso de constelações de satélites para o problema do monitoramento da fronteira terrestre brasileira, buscando entender como as figuras de mérito de tempo de revisita e de percentual de tempo de acesso são alterados com as variações dos parâmetros desse tipo de sistema. Para isso, foram utilizados dois *softwares* de forma a realizar simulações convenientes e otimizá-las, sendo eles o MATLAB<sup>®</sup> e o STK<sup>®</sup>, permitindo que fosse possível a obtenção dos valores numéricos de interesse nesse estudo. Buscou-se, portanto, a obtenção das melhores soluções compromisso para o estudo do monitoramento da fronteira terrestre brasileira. Neste contexto, foram considerados o uso de dois tipo principais de padrões de constelações dentre os mais abordados pela literatura, sendo eles o *Walker* e o Polar (ou *Street of Coverage*). Foram identificadas duas principais soluções para cada caso, sendo elas as configurações 25<sup>o</sup>:6/3/0 e 25<sup>o</sup>:8/4/0 para o uso de *Walker* e 10/5/0 e 12/4/0 para a Polar, onde a altitude encontrada é de 800 km e o argumento do nodo ascendente é arbitrário. Os tempos de revisita encontrados foram todos inferiores a 2 horas, enquanto que o percentual de tempo de acesso foram todos superiores a 5%, mas inferiores a 15% do tempo de simulação.

# Abstract

This work presents the application of the methodology of the use of satellite constellations for the problem of monitoring the Brazilian land border, seeking to understand how the figures of merit of revisit time and percentage of access time are altered with variations of the parameters of this type of system. In this context, two softwares were used in order to perform convenient simulations and optimize them, namely MATLAB<sup>®</sup> and STK<sup>®</sup>, allowing it to be possible to obtain numerical values of interest in this study. Therefore, we sought to obtain the best compromise solutions for the study of the monitoring of the Brazilian ground frontier. In this context, were considered the use of two main types of constellations patterns, the most referenced in the literature, the Walker and Polar (or Street of Coverage). Two main solutions were identified for each case, 25°: 6/3/0 and 25°: 8/4/0 for the use of *Walker* and 10/5/0 and 12/4/0 for Polar, where the altitude found is 800 km and the ascending node argument is arbitrary. The revisit times were all less than 2 hours, while the percentage of time access was all greater than 5%, but less than 15% of the simulation time.

# Lista de Figuras

FIGURA 2.1 – Sistema de coordenadas do problema de 2 corpos. . . . .	29
FIGURA 2.2 – Representação da distância relativa de dois pontos arbitrários $P$ e $P'$ em coordenadas esférica (KUGA <i>et al.</i> , 2011). . . . .	31
FIGURA 2.3 – Representação dos diferentes tipos de cobertura (ROCCO, 2002). . .	35
FIGURA 2.4 – Representação dos parâmetros orbitais da esfera celeste. Adaptado de Wertz (2001). . . . .	36
FIGURA 2.5 – Exemplos de constelações do tipo <i>Walker</i> , com $i = 65^\circ$ e $T = 15$ . Adaptado de Wertz (2001). . . . .	37
FIGURA 3.1 – Metodologia geral do procedimento usado na pesquisa. . . . .	40
FIGURA 3.2 – Detalhamento do procedimento de simulação. . . . .	40
FIGURA 3.3 – Divisão das áreas da fronteira. . . . .	41
FIGURA 3.4 – Comparação dos tempos de simulação. . . . .	42
FIGURA 3.5 – Representação dos ângulos dos sensores SAR. . . . .	43
FIGURA 3.6 – Representação do sensor SAR, retirada do software STK <sup>®</sup> . . . . .	44
FIGURA 4.1 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação da altitude. . . . .	47
FIGURA 4.2 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas. . . . .	48
FIGURA 4.3 – Revisita média das 12 áreas pela altitude. $r^2 = 0,9811$ . . . . .	49
FIGURA 4.4 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação das inclinações. . . . .	51
FIGURA 4.5 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas. . . . .	52

FIGURA 4.6 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação do total de satélites. . . . .	54
FIGURA 4.7 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas. . . . .	55
FIGURA 4.8 – Revisita média das 12 áreas pelo total de satélites. $r^2 = 0,9983$ . . .	56
FIGURA 4.9 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação do número de planos. . . . .	58
FIGURA 4.10 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas. . . . .	59
FIGURA 4.11 – Revisita média das 12 áreas pelo número de planos. $r^2 = 0,9886$ . . .	60
FIGURA 4.12 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação do RAAN. . .	61
FIGURA 4.13 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação de $F$ . . .	63
FIGURA 4.14 – Percentual de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação da altitude. . . . .	65
FIGURA 4.15 – Percentual de tempo de acesso médias em cores, com legenda de cores em %. . . . .	66
FIGURA 4.16 – Percentuais de tempo de acesso média das 12 áreas pela altitude. $r^2 = 0,9971$ . . . . .	67
FIGURA 4.17 – Percentual de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação das inclinações. . . . .	68
FIGURA 4.18 – Percentual de tempo de acesso médio das 12 áreas pela inclinação. $r^2 = 0,9969$ . . . . .	69
FIGURA 4.19 – Percentuais de tempo de acesso médios em cores, com legenda de cores em %. . . . .	70
FIGURA 4.20 – Percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação do total de satélites. . . . .	72
FIGURA 4.21 – Percentuais de acesso médios em cores, com legenda de cores em %. . .	73
FIGURA 4.22 – Percentual de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação do número de planos. . . . .	75
FIGURA 4.23 – Percentual de tempo de acesso médio das 12 áreas pelo número de planos. . . . .	76
FIGURA 4.24 – Percentual de tempo de acesso médios em cores, com legenda de cores em %. . . . .	76

FIGURA 4.25 – Percentual de tempo em cobertura máximo, mínimo e médio com variação do RAAN. . . . .	78
FIGURA 4.26 – Percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação de $F$ . . . . .	80
FIGURA 4.27 – Percentual de tempo de acesso médio das 12 áreas pelo espaçamento relativo. . . . .	81
FIGURA 4.28 – Percentuais de acessos médios em cores, com legenda de cores em %. . . . .	81
FIGURA 4.29 – Revisita média em horas para toda a fronteira pelo número de satélites para constelação <i>Walker</i> . . . . .	82
FIGURA 4.30 – Percentual de acesso médio (em %) para toda a fronteira pelo número de satélites para constelação <i>Walker</i> . . . . .	83
FIGURA 4.31 – Representações gráficas da constelação <i>Walker</i> 25°:6 3 0. . . . .	85
FIGURA 4.32 – Representações gráficas da constelação <i>Walker</i> 25°:8 4 0. . . . .	86
FIGURA 5.1 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação da altitude para constelação Polar. . . . .	88
FIGURA 5.2 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas. . . . .	89
FIGURA 5.3 – Revisita média das 12 áreas pela altitude. . . . .	90
FIGURA 5.4 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação do total de satélites para constelação Polar. . . . .	92
FIGURA 5.5 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas. . . . .	93
FIGURA 5.6 – Revisita média das 12 áreas pelo total de satélites. $r^2 = 0,9998$ . . . . .	94
FIGURA 5.7 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação do número de planos para constelação Polar. . . . .	95
FIGURA 5.8 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas para constelação Polar. . . . .	96
FIGURA 5.9 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação do RAAN para constelação Polar. . . . .	98
FIGURA 5.10 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação de $F$ para constelação Polar. . . . .	100



FIGURA 5.11 – Percentual de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação da altitude para constelação Polar. . . . .	102
FIGURA 5.12 – Percentuais de tempo de acesso médios em cores, com legenda de cores em % para constelação Polar. . . . .	103
FIGURA 5.13 – Percentuais de tempo de acesso médio das 12 áreas pela altitude. $r^2 = 0,9981$ . . . . .	104
FIGURA 5.14 – Percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação do total de satélites para constelação Polar. . . . .	105
FIGURA 5.15 – Percentuais de tempo de acesso médios em cores, com legenda de cores em %. . . . .	106
FIGURA 5.16 – Percentuais de tempo de acesso médio das 12 áreas pelo total de satélites. $r^2 = 0,9999$ . . . . .	106
FIGURA 5.17 – Percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação do número de planos para constelação Polar. . . . .	108
FIGURA 5.18 – Percentuais de tempo de acesso médio das 12 áreas pelo número de planos. . . . .	109
FIGURA 5.19 – Percentuais de tempo de acesso médios em cores, com legenda de cores em %. . . . .	109
FIGURA 5.20 – Percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação do RAAN para constelação Polar. . . . .	111
FIGURA 5.21 – Percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação de $F$ . . . . .	113
FIGURA 5.22 – Revisita média em horas para toda a fronteira pelo número de satélites para constelação Polar. . . . .	114
FIGURA 5.23 – Percentual de tempo de acesso médio (em %) para toda a fronteira pelo número de satélites para constelação Polar. . . . .	115
FIGURA 5.24 – Representações gráficas da constelação Polar 8 4 0. . . . .	117
FIGURA 5.25 – Representações gráficas da constelação Polar 12 4 0. . . . .	118

# Lista de Tabelas

TABELA 2.1 – Valores dos harmônicos zonais esféricos. Fonte: Chobotov (2002). . .	33
TABELA 3.1 – Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise dos tempos de simulação . . . . .	42
TABELA 3.2 – Dados dos sensores SAR usados na simulação. . . . .	44
TABELA 4.1 – Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise da influência das altitudes . . . . .	46
TABELA 4.2 – Dados da regressão linear da análise da influência das altitudes . . .	49
TABELA 4.3 – Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise das inclinações . . .	50
TABELA 4.4 – Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise do total de satélites .	53
TABELA 4.5 – Dados da regressão linear da análise da influência o total de satélites no tempo de revisita em constelações <i>Walker</i> . . . . .	55
TABELA 4.6 – Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise do número de planos ( $P$ ) . . . . .	56
TABELA 4.7 – Dados da regressão linear da análise da influência do número de planos na constelação <i>Walker</i> . . . . .	57
TABELA 4.8 – Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise do RAAN . . . . .	60
TABELA 4.9 – Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise do espaçamento relativo $F$ . . . . .	62
TABELA 4.10 – Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise da influência das altitudes nos percentuais de cobertura. . . . .	64
TABELA 4.11 – Dados da regressão linear da análise da influência das altitudes nos percentuais de tempo de acesso médios. . . . .	64
TABELA 4.12 – Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise das inclinações nos percentuais de tempo de acesso . . . . .	67

TABELA 4.13 –Dados da regressão linear da análise da influência das inclinações nos percentuais de acesso médio. . . . .	69
TABELA 4.14 –Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise do total de satélites .	71
TABELA 4.15 –Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise do número de planos ( $P$ ) para o percentual de acesso . . . . .	74
TABELA 4.16 –Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise da RAAN e sua influência no percentual de acesso. . . . .	77
TABELA 4.17 –Dados da constelação <i>Walker</i> usada na análise do espaçamento relativo $F$ dos percentuais de tempo de acesso. . . . .	79
TABELA 4.18 –Dados do conjunto solução geral para o tempo de revisita para a constelação de <i>Walker</i> . . . . .	84
TABELA 4.19 –Dados do conjunto solução específico para o tempo de revisita para a constelação de <i>Walker</i> . . . . .	84
TABELA 4.20 –Valores das figuras de mérito (média para as 12 áreas) para o conjunto solução para as constelações <i>Walker</i> . . . . .	84
TABELA 5.1 – Dados da constelação Polar usada na análise da influência das altitudes no tempo de revisita. . . . .	87
TABELA 5.2 – Dados da constelação Polar usada na análise da influência do total de satélites no tempo de revisita. . . . .	91
TABELA 5.3 – Dados da regressão linear da análise da influência o total de satélites em constelações Polares. . . . .	91
TABELA 5.4 – Dados da constelação Polar usada na análise do número de planos ( $P$ )	94
TABELA 5.5 – Dados da constelação Polar usada na análise do RAAN . . . . .	97
TABELA 5.6 – Dados da constelação Polar usada na análise do espaçamento relativo $F$ . . . . .	99
TABELA 5.7 – Dados da constelação Polar usada na análise da influência das altitudes nos percentuais de acesso. . . . .	101
TABELA 5.8 – Dados da regressão linear da análise da influência das altitudes nos percentuais de tempo de acesso médio. . . . .	101
TABELA 5.9 – Dados da constelação Polar usada na análise do total de satélites. .	104
TABELA 5.10 –Dados da regressão linear da análise da influência do total de satélites em constelação Polar . . . . .	104

---

TABELA 5.11 –Dados da constelação Polar usada na análise do número de planos ( $P$ ) para o percentual de acesso . . . . .	107
TABELA 5.12 –Dados da constelação Polar usada na análise da influência da RAAN nos percentuais de acesso . . . . .	110
TABELA 5.13 –Dados da constelação Polar usada na análise do espaçamento relativo $F$ dos percentuais de acesso. . . . .	112
TABELA 5.14 –Dados do conjunto solução específico para o uso de constelações Polares. . . . .	116
TABELA 5.15 –Dados das figuras de mérito (médio para as 12 áreas) para o conjunto solução para as constelações Polar. . . . .	116

# Lista de Abreviaturas e Siglas

SISFRON	Sistema Integrado de Monitoramento de Fronteiras
STK <sup>®</sup>	<i>System Tool Kit</i>
EB	Exército Brasileiro
FAB	Força Aérea Brasileira
LEO	<i>Low Earth Orbits</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
RAAN	<i>Right ascension of the ascending node</i>

# Lista de Símbolos

$\vec{r}$	Distância do alvo em estudo ao centro da Terra
$G$	Constante da gravitação universal
$a_e$	Semi-eixo equatorial do globo terrestre
$a$	Semi-eixo maior de órbita elíptica
$M$	Massa da Terra
$P_n$	Polinômios de Legendre de ordem n
$C_{nm}$ e $S_{nm}$	Harmônicos Tesserais
$J_{nm}$ e $\lambda_{nm}$	Zonais Harmônicos
$\Upsilon$	Ponto Vernal
$h$	Altitude da órbita
$T$	Total de satélites
$i$	Inclinação das órbitas
$P$	Número de planos
$S$	Número de satélites por plano
$F$	Espaçamento relativo entre planos adjacentes
$\omega$	Argumento do Perigeu
$\Delta\phi$	Distância angular entre os satélites e os planos orbitais adjacentes
$\lambda_{max}$	Ângulo central máximo

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	22
1.1	Definição de Problema . . . . .	22
1.2	Motivação e Justificativa . . . . .	23
1.3	Revisão da Literatura . . . . .	24
1.4	Hipóteses . . . . .	26
1.5	Considerações iniciais . . . . .	27
1.6	Objetivos . . . . .	27
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .	29
2.1	Dinâmica Orbital . . . . .	29
2.1.1	Dinâmica de 2 corpos . . . . .	29
2.1.2	Perturbações dos harmônicos esféricos . . . . .	30
2.2	Constelações de Satélites . . . . .	34
2.2.1	Padrão Walker . . . . .	35
2.2.2	Polar ( <i>Street of Coverage</i> ) . . . . .	37
2.3	Sensoriamento Remoto . . . . .	38
3	METODOLOGIA . . . . .	39
3.1	Procedimentos Metodológicos . . . . .	39
3.2	Integração de <i>softwares</i> . . . . .	39
3.3	Parâmetros iniciais . . . . .	41
3.3.1	Escolha das áreas . . . . .	41
3.3.2	Tempo de simulação . . . . .	42
3.3.3	Escolha do <i>Grid</i> . . . . .	43

<b>3.4</b>	<b>Sensoriamento Remoto</b>	43
<b>3.5</b>	<b>Figuras de Mérito</b>	44
3.5.1	Tempo de Revisita	44
3.5.2	Percentual de Tempo de Acesso	45
<b>3.6</b>	<b>Ordem de simulação</b>	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS - CONSTELAÇÃO <i>Walker</i></b>	46
<b>4.1</b>	<b>Tempos de revisita</b>	46
4.1.1	Variação da altitude	46
4.1.2	Variação da inclinação	50
4.1.3	Variação do total de satélites	53
4.1.4	Variação do número de planos	56
4.1.5	Variação da ascensão reta do nodo ascendente (RAAN)	60
4.1.6	Variação do espaçamento relativo ( $F$ )	62
<b>4.2</b>	<b>Percentuais de tempo de Acesso</b>	64
4.2.1	Variação da altitude	64
4.2.2	Variação da Inclinação	66
4.2.3	Variação do total de satélites	71
4.2.4	Variação do número de planos	73
4.2.5	Variação da ascensão reta do nodo ascendente (RAAN)	77
4.2.6	Variação do espaçamento relativo ( $F$ )	79
<b>4.3</b>	<b>Discussões</b>	82
<b>5</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS - CONSTELAÇÃO POLAR</b>	87
<b>5.1</b>	<b>Tempos de revisita</b>	87
5.1.1	Variação da altitude	87
5.1.2	Variação do Total de Satélites	91
5.1.3	Variação do número de planos	93
5.1.4	Variação da ascensão reta do nodo ascendente (RAAN)	96
5.1.5	Variação do espaçamento relativo ( $F$ )	99
<b>5.2</b>	<b>Percentuais de tempo de Acesso</b>	101



---

5.2.1	Variação da altitude . . . . .	101
5.2.2	Variação do total de satélites . . . . .	103
5.2.3	Variação do número de planos . . . . .	107
5.2.4	Variação da ascensão reta do nodo ascendente (RAAN) . . . . .	110
5.2.5	Variação do espaçamento relativo ( $F$ ) . . . . .	112
<b>5.3</b>	<b>Discussões</b> . . . . .	114
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	119
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	121

# 1 Introdução

## 1.1 Definição de Problema

A fronteira continental (ou terrestre) do território brasileiro possui cerca de 15.735 km de extensão (DECICINO, 2013), distância equivalente a quase o dobro da distância de Paris à Dubai. Muita desta extensão está localizada em território florestal ou em regiões inabitadas. São nessas regiões em que se registram algumas das principais rotas de entrada de drogas ilícitas no território brasileiro (ARAUJO, 2018), fazendo desta região um posicionamento estratégico para o combate às drogas pelo governo. Não obstante, as eventuais crises humanitárias em países vizinhos na América do Sul fazem aumentar o número de refugiados e de imigrantes ilegais que se dirigem ao Brasil, aumentando, indubitavelmente, a necessidade de monitoramento desta região (BRASIL, 2019). Sendo assim, torna-se latente a identificação e o desenvolvimento dos melhores métodos para a fiscalização da fronteira terrestre brasileira como um todo.

Neste contexto, uma análise do cenário atual brasileiro nos permite identificar a presença de um projeto em andamento para o monitoramento e sensoriamento de fronteiras, chamado de SISFRON (Sistema Integrado de Monitoramento de Fronteiras) (LANDIM, 2013). Esse programa se baseia em princípios de telecomunicação instantânea, com sistemas em utilização em solo (SOUZA *et al.*, 2018), com a necessidade do uso de viaturas militares e antenas instaladas nas regiões de interesse. Deste modo, pode-se perceber que este sistema possui a limitação de haver a necessidade que o local a ser monitorado seja acessível e, contudo, não é essa a realidade de boa parte das zonas a serem estudadas. Deste modo, este trabalho busca apresentar uma forma alternativa para a solução desse problema, por meio do uso de um sistema espacial, tal como uma constelação de pequenos satélites. Tal proposta não possui restrições de acessos e pode ser capaz de realizar o monitoramento da região, com transmissão e recebimento de dados dentro de um tempo hábil pré-determinado, de forma a cumprir as necessidades dos *stakeholders*.

Para isso, será utilizado o software STK<sup>®</sup> (*Systems Tool Kit*), da empresa americana AGI, que permite realizar diversas análises e simulações das possíveis configurações que podem ser utilizadas para a realização da missão em questão. Para isso, delimita-se a área

de interesse para a análise (no caso, a área da fronteira terrestre brasileira), escolhendo as órbitas e as características da mesma, e configurando os satélites da constelação com seus respectivos sensores a serem utilizados. Ademais, o uso apenas deste software pode não se mostrar suficiente, uma vez que ele realiza aproximações em certas variáveis relevantes ao problema (como o campo de visualização dos sensores e não considera parâmetros como o *duty cycle* e a escolha de trajetórias ascendentes e descendentes), o que não é interessante para o estudo a ser realizado. A forma escolhida para mitigar este problema é a utilização do software MATLAB<sup>®</sup>, da empresa americana MathWorks, que apresenta uma boa interface com o STK<sup>®</sup>, permitindo o desenvolvimento de rotinas para superar esta dificuldade.

Por fim, convém ressaltar que o trabalho de graduação a ser realizado busca responder às questões:

“Qual o tempo de revisita e área de cobertura que apresentam a melhor relação de compromisso para cumprir a missão de monitoramento da fronteira terrestre brasileira?”

“Quais as configurações de constelações de satélites a serem adotadas, a fim de minimizar o tempo de revisita e maximizar o tempo de acesso? ”

## 1.2 Motivação e Justificativa

Conforme mencionado anteriormente, o estudo da fronteira terrestre brasileira é estratégico para o governo brasileiro. Isso se deve ao fato de ser uma região de porta de entrada para as drogas ilícitas no país, além de imigrantes ilegais vindo de países vizinhos que podem estar passando por uma crise humanitária.

Neste sentido, o SISFRON foi criado em 2008 pelo EB (Exército Brasileiro), com apoio da FAB (Força Aérea Brasileira), com a finalidade de fortalecer a presença e a capacidade de apoio à decisão e de emprego operacional na faixa da fronteira. Contudo, embora seja notória a importância do SISFRON, a configuração do sistema como está hoje confere a ele limitações que podem afetar os eventuais benefícios previstos no longo prazo (ANDRADE *et al.*, 2019).

Neste sentido, entendendo-se a importância desta questão para o governo brasileiro, este trabalho busca realizar um estudo sobre a utilização de constelações de CubeSats para a realização do monitoramento da área de interesse, conferindo características diferentes ao problema como está hoje.

Esta análise pode ser encarada como um ponto de partida para uma abordagem diferente para a resolução do problema de cobertura da fronteira terrestre brasileira. Este problema é de difícil solução pelo país devido à sua extensão continental e da região a ser

considerada e, também, pelo número de ocorrências que precisam ser controladas.

### 1.3 Revisão da Literatura

O estudo das constelações de satélites vem sendo abordado desde a segunda metade do século XX, com um trabalho que tratou do problema de uma constelação de satélites posicionados de tal forma que pelo menos um satélite estivesse visível a partir de qualquer ponto da superfície da Terra (GOBETZ, 1963). Essa primeira pesquisa foi importante para o surgimento de outros estudos na área, inclusive o estudo de um problema semelhante, embora fosse considerado mais de um satélite visível simultaneamente (EASTON; BRESCIA, 1969).

Em seguida, foram apresentados estudos de constelações de satélites capazes de realizar a cobertura de toda a superfície terrestre (MOZHAEV, 1973; BALLARD, 1980). Para isso, tais constelações foram estudadas considerando órbitas circulares e de mesma altitude, recebendo, posteriormente, o nome de constelações de *Walker* (WALKER, 1970; WALKER, 1977; WALKER *et al.*, 1978).

Em contrapartida, em um trabalho similar no qual verificou-se a cobertura total da Terra e a cobertura contínua de apenas um hemisfério, foi proposto um novo tipo de constelação: a Polar (ou *Street of Coverage*), que utiliza, como o próprio nome sugere, órbitas polares (ADAMS; RIDER, 1987). Enquanto isso, um estudo da mesma época descreve o desenvolvimento de uma metodologia que utiliza o tempo entre duas passagens consecutivas em um ponto de interesse para o desenvolvimento de constelações simétricas com órbitas circulares (LANG, 1988).

Com algumas propostas de modelos de constelações já bem definidas por pesquisas anteriores, foi publicado um estudo no qual as constelações de Walker são usadas para se estudar a repetibilidade do traçado das órbitas, constatando-se melhores resultados para as não-repetitivas no caso de cobertura parcial (HANSON *et al.*, 1990).

Não obstante, com o desenvolvimento das pesquisas no âmbito aeroespacial e, em especial, na área de pequenos satélites, tornou-se latente o desenvolvimento de metodologias de controle desses sistemas. Sendo assim, foram executadas pesquisas sobre a manutenção de órbitas (LAMY; PASCAL, 1993), enquanto que foram analisados sistemas autônomos para o controle de órbita dos satélites (KONIGSMANN *et al.*, 1996; KLUEVER; TANCK, 1997).

Com esse desenvolvimento, tornou-se importante estudar não apenas sistemas de controle, mas também as configurações ótimas com base nas missões a serem executadas. Neste sentido, analisaram-se a utilização de algoritmos genéticos para obtenção de uma configuração ótima de constelação para cobertura regional (FRAYSSINHES, 1996; ELY *et*

*al.*, 1999). Posteriormente, foi apresentado o design de constelação de satélites para cobertura parcial da Terra, considerando períodos de visibilidade sobre a Terra (adotando um modelo oblato) para obtenção do tempo que os satélites irão observar os pontos em solo (MA; HSU, 1997). Não obstante, os sistemas de navegação também foram impactados, já que o uso de uma constelação de satélites para sistemas de navegação começou a ser considerado (GALATI *et al.*, 1996).

Posteriormente, foram desenvolvidos estudos buscando abranger as metodologias de emprego de constelações de satélites para missões de cobertura parcial ou total do globo terrestre. Entre eles, uma pesquisa efetuada verifica a dinâmica e o controle de cinco satélites geossíncronos com plano orbital inclinado (KECHICHIAN, 1998), enquanto que outro estudo apresentou uma análise da utilização de órbitas hélio-síncronas retrógradas (CASTIEL *et al.*, 1999). Por fim, é introduzido uma metodologia para o design de constelação de satélites com órbitas de formato idêntico (em termo dos elementos orbitais), compatíveis com a linha dos nodos ao longo do plano equatorial e igualmente espaçado, consistindo na constelação do tipo *Flower*, que poderiam ser usadas tanto para cobertura regional como total do globo terrestre (MORTARI *et al.*, 2004).

Em estudos mais recentes, os problemas que já eram estudados começaram a apresentar uma metodologia mais moderna para sua abordagem, muitas vezes direcionando as pesquisas para resultados mais específicos para uso em missões desejadas, obtendo assim um alto grau de descrição da solução. Neste sentido, encontra-se na literatura o uso de constelações do tipo polar para a cobertura descontínua do globo (SARNO *et al.*, 2016). Esse estudo apresenta uma aplicabilidade que diminui as limitações desse tipo de constelação, identificando o número de satélites, a distância entre as órbitas e a localização dos planos de órbita para a obtenção de cobertura das áreas alvo.

Além disso, seguiu sendo importante não apenas pesquisas com o objetivo de se obter constelações para cobertura periódica da Terra, como em um método semi-análítico baseado no uso de programação inteira linear e programação binária (CHEN *et al.*, 2018), e também para a cobertura contínua usando um método baseado em subdivisão de geometria esférica para obtenção dos parâmetros orbitais (DAI *et al.*, 2017). Não obstante, no estudo da diminuição de satélites nas constelações empregadas nas missões espaciais, propõe-se o uso de uma estrutura integrada que utiliza constelações de satélites (em múltiplos estágios) otimizadas, considerando a evolução das áreas de interesse com o tempo (LEE *et al.*, 2018). Cada estágio da constelação foi adotado como sendo do tipo *Flower* com órbitas circulares, promovendo cobertura regional da área alvo e uma cobertura adicional para as futuras áreas de interesse.

Em uma tentativa de diminuir o tempo de revisita dos pontos de interesse, foi apresentado um design de constelações de satélite para órbitas LEO (*Low Earth Orbits*) (MA *et al.*, 2018). O estudo teve como parâmetro 225 pontos-alvo em solo, fixando o tempo de

revisita máximo em 1 hora, obtendo assim uma constelação de 6 planos orbitais, cada uma com 24 satélites. Ainda no contexto de órbitas LEO, pesquisas buscaram compreender melhor o problema regional do globo com tempo de cobertura prolongado (SHTARK; GURFIL, 2019). Buscou-se otimizar as constelações, considerando uma combinação de vários fatores, dentre os quais constam: comensurabilidade de repetibilidade do *ground-track* (ou seja, o quanto se pode mensurar a repetição das projeções na Terra das órbitas dos satélites), latitude do receptor, número de satélites e arranjo interno dos satélites usados em uma eventual missão. Obteve-se soluções quase-polares com altitudes próximas a 550 a 870 km, latitudes de 30° a 60° e cerca de 13 a 36 satélites, com tempo de cobertura variando entre 20 e 80 minutos.

Por fim, em um dos estudos mais recentes de otimização de missão espacial utilizando constelações de satélites, é apresentado um método baseado em programação inteira binária para a realização de cobertura regional complexa, ou seja, para múltiplas áreas-alvo (LEE *et al.*, 2020). Em outra pesquisa em termos de otimização, configurações de constelações de satélite para uma cobertura aproximadamente global de baixo custo são analisadas, mostrando que para pequenas perdas na área observada (ou seja, uma pequena parcela do globo terrestre não é coberta) se obtém uma diminuição de 60% de massa orçada de propelente em relação à satélites geoestacionários (SINGH *et al.*, 2020). Tal resultado mostra os possíveis ganhos em termos de custo-benefício do uso dessa tecnologia.

## 1.4 Hipóteses

Inicialmente, no estudo do tempo de revisita (que é o tempo entre duas observações em sequência de uma região) o fato da faixa da fronteira do Brasil ser considerada de 150 km a partir dos limites do país (ROCHA, 2016), faz com que o uso de um veículo que permita uma velocidade média de 60 km/hr garanta um tempo de 2 horas e meia para cruzar a faixa completamente. Sendo assim, diminui-se esse valor em 30 minutos a fim de se observar eventuais veículos mais rápidos ou regiões que permitam uma maior facilidade de locomoção, garantindo um tempo máximo de 2 horas.

Já para o percentual de tempo de acesso, considerado como sendo a porcentagem de tempo durante o qual uma região é coberta, é feita uma suposição de 5% de limite, o que nos trás um valor de cerca de 4320 segundos de observação por dia, o que para uma revisita de 2 horas, leva a um tempo médio acesso por passagem de 360 segundos, ou ainda, 6 minutos. Esse período seria usado para a obtenção de imagens da região de interesse.

Deste modo, considerando ainda uma pesquisa bibliográfica a respeito do tema apresentado, pode-se observar as seguintes hipóteses norteadoras deste trabalho:

- Hipótese (1): A constelação apresentada deve possuir tempo de revisita de, no máximo, 2 horas (em média) com um percentual de tempo de acesso de cada região superior a 5%.
- Hipótese (2): O uso da constelação do tipo Walker com 15 pequenos satélites consegue realizar o monitoramento da fronteira terrestre brasileira, com 100% de cobertura (SANTOS *et al.*, 2020).
- Hipótese (3): As constelações de Walker apresentam menores tempo de revisita para maiores altitudes e maior quantidade de satélites.

## 1.5 Considerações iniciais

A fim de se realizar os estudos que serão desenvolvidos neste trabalho de graduação, as principais restrições são:

- Consideração (1): As hipóteses e equações utilizadas para o desenvolvimento do software STK<sup>®</sup> são condizentes, a priori, para a realização das simulações necessárias para este trabalho.
- Consideração (2): Quando necessário, os sensores a serem considerados serão do tipo radar SAR (*Synthetic Aperture Radar*).
- Consideração (3): Restringe-se as altitudes possíveis das constelações de forma a serem LEO (*Low Earth Orbits*), com uma altura máxima de 800 km.
- Consideração (4): Utilização de dois tipos diferentes de configurações de constelações para as simulações: *Walker* e *Polar*.

## 1.6 Objetivos

Este trabalho possui, como **objetivo geral**:

“Identificar, dentre as possíveis soluções para a cobertura da fronteira terrestre brasileira, a configuração de constelação de CubeSats que apresenta a melhor solução compromisso com a missão, em termos de tempo de revisita, área de cobertura e parâmetros da constelação, como o número de satélites.”

Neste contexto, um detalhamento do objetivo geral nos leva à obtenção de **objetivos específicos**, conforme:

- Desenvolver um modelo teórico computacional para obtenção das órbitas e do número de satélites a serem utilizados;
- Identificar as melhores soluções compromisso referente ao tipo de constelação;
- Desenvolver rotinas em MATLAB<sup>®</sup> que permitam a conexão com o STK<sup>®</sup>;
- Realizar o dimensionamento adequado da área de interesse no STK<sup>®</sup>;
- Obter o percentual de tempo de acesso e o tempo de revisita da área de interesse considerando os sensores apropriados;
- Refazer eventuais simulações a fim de se obter melhores soluções de compromisso com a missão;
- Confrontar os resultados obtidos com as hipóteses previamente estabelecidas.



## 2 Fundamentação teórica

Neste capítulo, será apresentada a fundamentação teórica necessária para a compreensão do funcionamento de uma constelação de satélites.

### 2.1 Dinâmica Orbital

No contexto do movimento de satélites em torno da Terra, deve-se entender como os movimentos são executados e o que os influencia, sendo tudo isso entendido através do estudo da dinâmica orbital.

#### 2.1.1 Dinâmica de 2 corpos

Para o estudo do problema proposto, é considerado inicialmente a formulação e o estudo das equações de movimento de dois corpos. Sendo assim, tem-se a Figura 2.1 como representante do movimento dos dois corpos em um sistema de coordenadas cartesiano  $\Sigma = (0, \hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ , com origem arbitrária, com o corpo 1 com massa  $m_1$  e distância à origem de  $\vec{r}_1$  e um corpo 2 com massa  $m_2$  e distância à origem de  $\vec{r}_2$ .

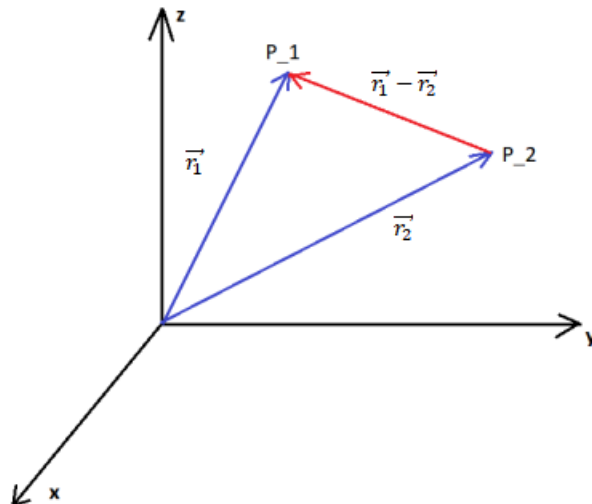


FIGURA 2.1 – Sistema de coordenadas do problema de 2 corpos.

Sendo assim, considerando as equações de movimento baseadas na gravitação universal, segue que (NUSSENZVEIG, 2013):

$$m_1 \ddot{\vec{r}}_1 = -\frac{Gm_1m_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3}(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \quad (2.1)$$

$$m_2 \ddot{\vec{r}}_2 = -\frac{Gm_1m_2}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^3}(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) \quad (2.2)$$

Fazendo a operação Equação 2.1  $\times (-m_2)$  + Equação 2.2  $\times (m_1)$ , definindo  $\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$ , segue que (NUSSENZVEIG, 2013):

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{G(m_1 + m_2)}{|\vec{r}|^3}\vec{r} \quad (2.3)$$

Finalmente, toma-se  $r = |\vec{r}|$  e definindo  $\mu = G(m_1 + m_2)$ , de onde temos (CURTIS, 2010):

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{\mu}{r^3}\vec{r} \quad (2.4)$$

Não obstante, pode-se ainda escrever o comportamento da distância relativa entre dois corpos conforme (NUSSENZVEIG, 2013):

$$\ddot{\vec{r}} = -\vec{\nabla}\Phi \quad (2.5)$$

Onde  $\Phi$  representa o potencial gravitacional representativo do sistema, ou seja, a aceleração relativa entre os corpos pode ser calculada pelo gradiente do potencial.

Em particular, para as simulações a serem desenvolvidas com o auxílio do STK<sup>®</sup>, é considerado o truncamento até o termo  $J_4$  dos harmônicos esféricos. Neste caso, são consideradas apenas as perturbações gravitacionais devido ao geopotencial, as quais apenas os harmônicos zonais causam flutuações, e as de longo período se forem evitadas as ressonâncias harmônicas estruturais e setoriais (HOUGH, 1980).

### 2.1.2 Perturbações dos harmônicos esféricos

O desenvolvimento da equação de movimento relativo apresentado anteriormente desconsidera eventuais anomalias na distribuição de massa dos corpos em questão. Essas anomalias causam flutuações no potencial gerado e, por consequência, altera o movimento relativo dos corpos.

Sendo assim, são utilizadas coordenadas esféricas para se reescrever a distância rela-

tiva entre dois pontos  $P$  e  $P'$ , conforme apresentado pela Figura 2.2, com o sistema de coordenadas fixado em um dos corpos (no caso, a Terra). Deste modo, a distância  $\Delta$  entre esses pontos é dada por (KUGA *et al.*, 2011):

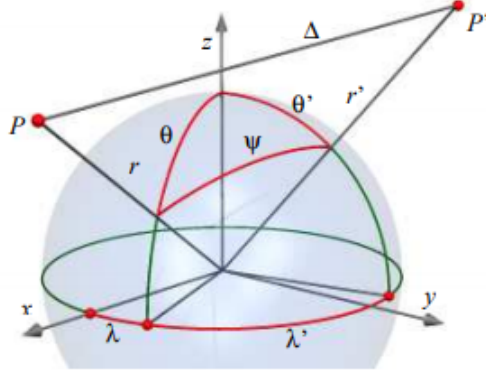


FIGURA 2.2 – Representação da distância relativa de dois pontos arbitrários  $P$  e  $P'$  em coordenadas esférica (KUGA *et al.*, 2011).

$$\Delta = \sqrt{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \psi} \quad (2.6)$$

E o ângulo  $\psi$  pode ser escrito, da geometria da esfera celeste, conforme (KUGA *et al.*, 2011):

$$\cos \psi = \cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos(\lambda' - \lambda) \quad (2.7)$$

Não obstante, como estamos interessado no inverso da distância entre os corpos para a determinação do potencial, segue que (KUGA *et al.*, 2011):

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{1}{r \sqrt{1 - 2 \frac{r'}{r} \cos \psi + \frac{r'^2}{r^2}}} \quad (2.8)$$

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{1}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{r'}{r} \right)^n P_n(\cos \psi) \quad (2.9)$$

Onde  $P_n(\cos \psi)$ , com  $n = 0, 1, 2, \dots, \infty$  são os Polinômios de Legendre. Considerando o cálculo do potencial gravitacional variando com a distribuição de massa como mostra a equação 2.10, com  $dM$  sendo o elemento diferencial de massa do corpo principal, obtemos a equação 2.11 (KUGA *et al.*, 2011).

$$\Phi = - \int \frac{GdM}{\Delta} \quad (2.10)$$

$$\Phi = - \int \frac{GdM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{r'}{r} \right)^n P_n(\cos \psi) \quad (2.11)$$

Contudo, essas expressões podem ainda ser reescritas de forma a facilitar o seu entendimento. O teorema de adição dos polinômios de Legendre (ABRAMOWITZ *et al.*, 1988) mostra que:

$$P_n(\cos \theta) = \sum_{m=0}^n (2 - \delta_{mo}) \frac{(n-m)!}{(n+m)!} P_{nm}(\cos \theta) P_{nm}(\cos \theta') \cos(m(\lambda - \lambda')) \quad (2.12)$$

Onde  $\delta_{mo}$  é o delta de Kronecker e  $P_{nm}$  são os polinômios associados de Legendre. Usando essa relação e aplicando-a em 2.11 chegamos na equação 2.13 (KUGA *et al.*, 2011).

$$\Phi = \frac{GdM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (2 - \delta_{mo}) \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \left( \frac{r'}{r} \right)^n P_{nm}(\cos \theta) P_{nm}(\cos \theta') \cos(m(\lambda - \lambda')) \quad (2.13)$$

Integrando essa equação sobre toda a distribuição de massa e considerando  $\mu \approx GM$  (ou seja, a massa do corpo secundário é muito menor que a do primário), temos (KUGA *et al.*, 2011):

$$\Phi = \frac{\mu}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left( \frac{a_e}{r} \right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \phi) \quad (2.14)$$

Onde:

$$C_{nm} = \frac{(2 - \delta_{mo})}{a_e^n M} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \int r'^n P_{nm}(\sin \phi') \cos(m\lambda') dM \quad (2.15)$$

$$S_{nm} = \frac{(2 - \delta_{mo})}{a_e^n M} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \int r'^n P_{nm}(\sin \phi') \sin(m\lambda') dM \quad (2.16)$$

Onde, para o planeta Terra como corpo principal,  $a_e$  é o semi-eixo equatorial do elipsóide terrestre,  $M$  é a massa do planeta Terra e os coeficiente  $C_{nm}$  e  $S_{nm}$  são os coeficientes harmônicos esféricos.

Contudo, as representações dos harmônicos costumam ser diferentes em algumas situações. Em particular, uma das mais utilizadas é a consideração dos zonais harmônicos representados pelos coeficientes  $J_{nm}$  e  $\lambda_{nm}$  ao invés dos harmônicos tesserais ( $C_{nm}$  e  $S_{nm}$ ). Matematicamente, eles estão relacionados conforme (CHOBOTOV, 2002):

$$J_{nm}^2 = C_{nq}^2 + S_{nq}^2 \quad (2.17)$$

$$\lambda_{nm} = \arctan\left(\frac{S_{nq}}{C_{nq}}\right) / m, q = m \quad (2.18)$$

Sendo assim, segue que (CHOBOTOV, 2002):

$$\Phi = -\frac{\mu}{r} \left[ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} J_n \left(\frac{a_e}{r}\right)^n P_n(\sin \phi) + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=1}^n J_{nm} \left(\frac{a_e}{r}\right)^n P_{nm}(\sin \phi) \cos(m(\lambda - \lambda_{nm})) \right] \quad (2.19)$$

Com  $J_n$  sendo  $J_{n0}$ , com os harmônicos  $J_{nm}$  e  $\lambda_{nm}$  podendo ser entendidos como sendo os coeficientes harmônicos e os valores de longitude de equilíbrio (para  $J_{nm}$ ), respectivamente.

Neste contexto, as perturbações a serem consideradas foram incluídas até a 4ª ordem (excluindo-se os polinômios associados de Legendre), conforme apresentado pela Equação 2.20 (PETTY; BREAKWELL, 1960), na qual o potencial é escrito como função da posição relativa  $r$  e da inclinação  $\phi$ . Além disso,  $s_\phi$  é uma forma simplificada de se escrever  $\sin(\phi)$ , enquanto que  $R_0$  é o raio da Terra na linha do equador. Por fim,  $J_2$  representa termos de perturbação de 2ª ordem, assim como  $J_3$  representa a de 3ª ordem e  $J_4$  a de 4ª ordem.

$$\Phi(r, \phi) = \frac{\mu}{r} \left[ 1 + \frac{J_2 R_0^2}{3r^2} (1 - 3s_\phi^2) + \frac{J_3 R_0^3}{2r^3} (3 - 5s_\phi^2) + \frac{J_4 R_0^4}{35r^4} (3 - 30s_\phi^2 + 35s_\phi^4) \right] \quad (2.20)$$

Finalmente, a fim de se ilustrar os valores numéricos dessas influências perturbativas, consideramos os valores apresentados na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Valores dos harmônicos zonais esféricos. Fonte: Chobotov (2002).

<b>n</b>	$J_n$
2	$1080,6300 \times 10^{-6}$
3	$-2,5321531 \times 10^{-6}$
4	$-1,6109876 \times 10^{-6}$

Convém ressaltar que os harmônicos  $J_4$  são considerados neste trabalho devido a possibilidade de se utilizar essas expansões nos softwares utilizados para o estudo proposto.

## 2.2 Constelações de Satélites

Uma constelação é um conjunto de satélites distribuídos pelo espaço buscando, por meio de trabalho em conjunto, alcançar um objetivo pré-estabelecido (WERTZ, 2001). Convém destacar ainda que quando os satélites se encontram em voo próximos um do outro, com troca de dados e com interdependência na lei de controle, tal configuração não condiz com o esperado de constelações, recebendo então o nome de formação em voo.

Neste sentido, o propósito das constelações é o de fornecer cobertura terrestre ou do espaço próximo à Terra. Para um grande número de satélites, como é comum em análises de constelações, a cobertura é um fator fundamental de performance. Contudo, a cobertura terrestre não é um parâmetro Gaussiano e muitas vezes dados estatísticos podem levar a resultados enganosos (WERTZ, 2001). Deste modo, a cobertura como parâmetro de performance é melhor entendida através de simulações computacionais do problema. Não obstante, embora a cobertura apresente uma influência importante a respeito do desempenho, o número de satélites escolhidos para fazer parte da constelação apresenta uma importante relação com o custo, fazendo com que uma análise de custo-benefício seja necessária para a montagem deste tipo de missão.

Outro conceito importante no estudo de constelações é a de tempo de revisita que pode ser, a depender dos requisitos de missão especificados pelos *stakeholders*, fundamental para a missão. Isto decorre do fato dele representar o tempo entre duas observações de um ponto no globo terrestre por qualquer um dos satélites da constelação (LANG, 1988). Já o tempo de cobertura, com uma especial aplicação nas simulações, representa o tempo durante o qual os pontos da grade são cobertos (AGI, 2018). Finalmente, convém ressaltar que o *ground-track* (ou rota em solo, o traçado) é o caminho percorrido pelo satélite projetado na superfície da Terra (CURTIS, 2010).

As constelações de satélites são desenvolvidas com o objetivo de satisfazer diferentes tipos de cobertura terrestre, podendo ser global contínua, zonal contínua, regional contínua ou parcial com revisitação. A Figura 2.3 apresenta uma representação desses tipos de cobertura.

Neste sentido, tipos diferentes de constelações foram desenvolvidos, cada um com suas peculiaridades. Os mais comuns são (WERTZ, 2001; ROCCO, 2002):

- *Walker*;
- Polar (ou *Street of Coverage*);
- *Rossete*;
- *Ellipso*;

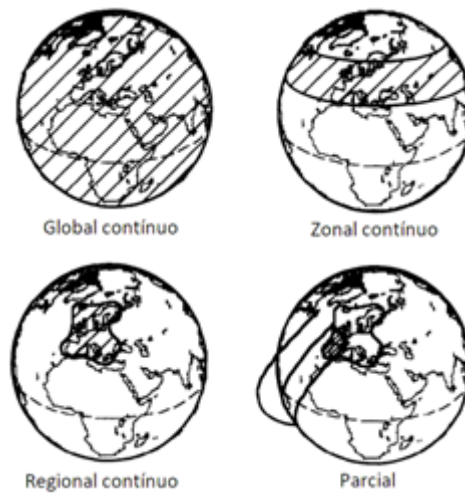


FIGURA 2.3 – Representação dos diferentes tipos de cobertura (ROCCO, 2002).

- *Molnyia*;
- Poliedro;
- *Flower*.

A seguir, tem-se uma abordagem das configurações do tipo *Walker* e Polar, por serem as escolhidas para a realização das simulações apresentadas neste trabalho.

### 2.2.1 Padrão Walker

O estudo do padrão de constelações conhecido como *Walker* se tem início no final da década de 1960, na qual Easton e Brescia (1969) concluíram que para a cobertura global da Terra, era necessário o uso de no mínimo 6 satélites. Contudo, ao incluir uma órbita circular a mais, Walker (1970, 1977, 1978) mostrou serem necessários apenas 5 satélites para essa missão.

Esse tipo de constelação considera a utilização de órbitas circulares (ou seja, cuja excentricidade é nula) para todas os satélites pertencentes à configuração adotada. Além disso, são fixadas as alturas e as inclinações (em relação ao plano do equador da Terra) das órbitas de cada um dos satélites.

Sendo assim, as constelações do padrão *Walker* são bem caracterizadas pela identificação da altitude  $h$ , da sua inclinação  $i$ , do total de satélites  $T$ , do número de planos no qual são distribuídos os mesmos  $P$ , a quantidade de satélites por planos  $S$ , o espaçamento relativo entre planos orbitais adjacentes  $F$  e, finalmente, pela ascensão reta do nodo ascendente (denotado por RAAN ou  $\Omega$ ). De forma geral, a representação adotada para uma constelação de *Walker* é feita considerando a notação  $(i:T|P|F)$ , onde a inclinação é

fornecida em graus e o valor do espaçamento relativo entre planos  $F$  é um número inteiro que varia de 0 a  $P - 1$ .

No sistema de coordenadas equatorial terrestre, cujo centro de massa da Terra é a origem, a inclinação das órbitas pode ser entendida como sendo o ângulo entre o plano orbital e o plano de referencial (no caso, o equatorial), enquanto que a ascensão reta do nodo ascendente é o ângulo presente no plano equatorial da Terra, entre o eixo que segue a direção do ponto vernal ( $\Upsilon$ ) e o ponto no qual a órbita do veículo espacial cruza a linha dos nodos. A indicação desses parâmetros é feita na Figura 2.4, onde  $a$  é considerado como sendo o semi-eixo maior da órbita elíptica e os ângulos  $\Omega$  e  $\omega$  indicam a ascensão reta do nodo ascendente (ao longo do trabalho sendo identificado por RAAN) e o argumento do perigeu, respectivamente. Cabe ainda destacar que a inclinação pode variar de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , enquanto que o RAAN varia de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

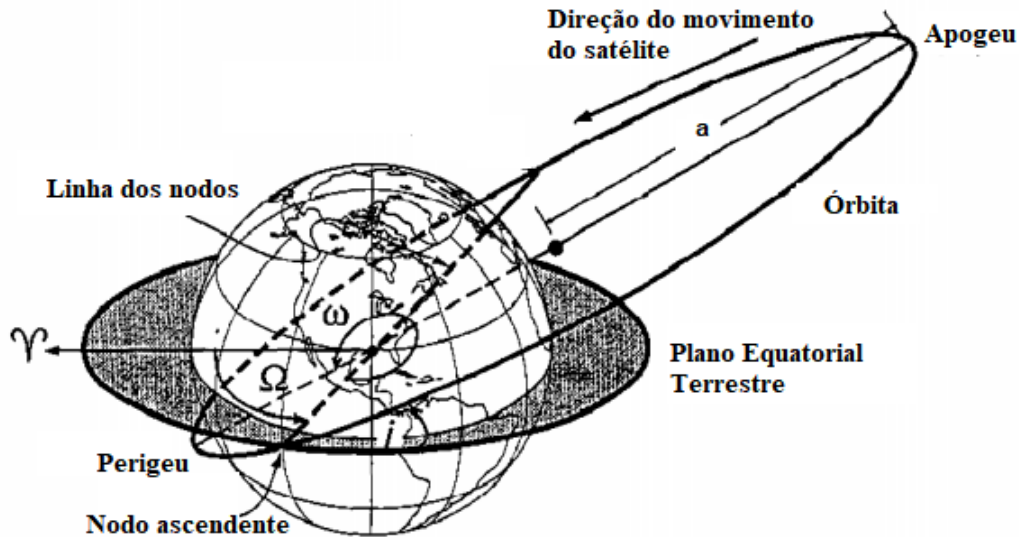


FIGURA 2.4 – Representação dos parâmetros orbitais da esfera celeste. Adaptado de Wertz (2001).

Para a disposição espacial dos satélites nessa constelação, parte-se da utilização de planos orbitais uniformemente distribuídos ao longo do equador, estando a uma distância relativa de  $360^\circ/P$ . Internamente aos planos, a distribuição entre os satélites é feita considerando, mais uma vez, uma igualdade na distribuição dos veículos, levando a uma variação angular de  $360^\circ/S$ . Não obstante, deve-se ainda identificar a distância angular entre os satélites e os planos orbitais adjacentes ( $\Delta\phi$ ), variável que pode ser identificada com a utilização de  $F$ , conforme a equação  $\Delta\phi = 360^\circ \frac{F}{T}$ .

Finalmente, representações de duas configurações de constelação *Walker*, ambas com 15 satélites e com uma inclinação de  $i = 65^\circ$ , são apresentadas na Figura 2.5, porém à esquerda o espaçamento entre planos adjacentes é de  $F = 2$ , enquanto que à direita ele é



de  $F = 4$ , com número de planos de  $P = 3$  e  $P = 5$ , respectivamente.

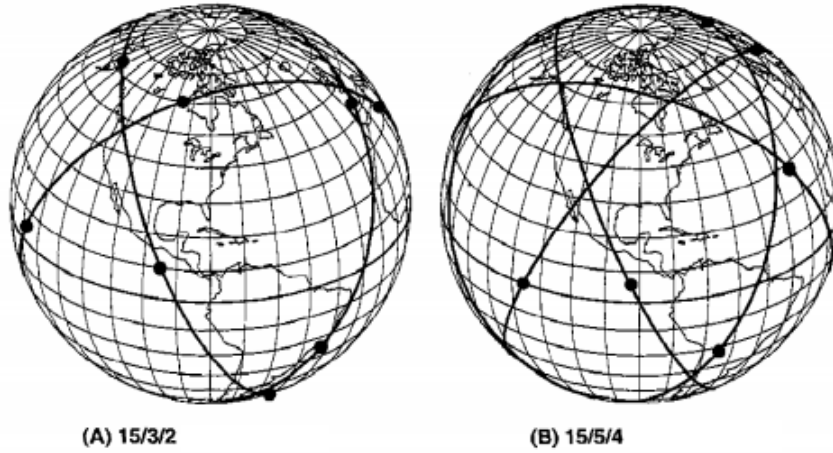


FIGURA 2.5 – Exemplos de constelações do tipo *Walker*, com  $i = 65^\circ$  e  $T = 15$ . Adaptado de Wertz (2001).

### 2.2.2 Polar (*Street of Coverage*)

Estudada inicialmente por Gobetz (1963), esse tipo de configuração caracteriza-se pela interceptação das órbitas dos satélites pertencentes à constelação em dois pontos afastados em  $180^\circ$ . Neste tipo de problema, são considerados que todos os satélites são localizados em uma mesma altitude, mais uma vez denotada aqui por  $h$ , assemelhando-se bastante à de *Walker* por também apresentar excentricidade nula, ou seja, as órbitas são circulares.

Mais uma vez, o número de satélites pode ser distribuído uniformemente dentro de uma órbita, considerando-se  $T$  o total de satélites,  $P$  o número de planos e  $S$  o número de satélites por planos. Por fim, o espaçamento relativo entre planos orbitais adjacentes possui a mesma notação de *Walker*, ou seja,  $F$ .

A diferença de  $180^\circ$  entre os pontos de encontro das órbitas não precisam ser, necessariamente, nos polos do globo terrestre. Contudo, as perturbações decorrentes do achatamento da Terra podem ser responsáveis por alterar as órbitas ocasionando possíveis derivas dos parâmetros (WERTZ, 2001), embora esses efeitos sejam minimizados nos polos, razão pela qual a inclinação ao longo deste projeto foi escolhida fixa e igual a  $i = 90^\circ$ .

Por fim, essa constelação é caracterizada pela variação da cobertura com a altitude  $h$  não ser contínua e suave (WERTZ, 2001), havendo pequenos saltos de cobertura, que dependem do ângulo central máximo do satélite ( $\lambda_{max}$ ), que é em relação à Terra (entre a linha que liga o centro da Terra e o ponto de observação direta do satélite sobre o planeta). Ademais, a escolha de uma inclinação fixa deve fazer com que os resultados de

cobertura e revisita no estudo apresentado sejam menos interessantes que os apresentados pelas constelações *Walker* pela perda de um grau de liberdade na análise (a inclinação).

## 2.3 Sensoriamento Remoto

No contexto do sensoriamento remoto no problema proposto, deve-se destacar que o sensor do tipo SAR foi o escolhido para as simulações com o auxílio do software STK<sup>®</sup>.

A tecnologia utilizada parte do princípio da detecção de ondas eletromagnéticas para a obtenção de imagens com maior resolução espacial, sendo este tipo de sensor adequado ao estudo da fronteira terrestre. Essa tecnologia é baseada na utilização de ondas eletromagnéticas para a detecção de objetos (presença e localização dos mesmos) e alguns estudos mostram o comportamento dessas ondas utilizadas como base para o sensoriamento remoto com o sensor SAR (FRANCESCHETTI; PERNA, 2006).

Outrossim, esse tipo de sensor apresenta a utilização de antenas que operam na faixa do comprimento de onda variando entre 1 mm e 1 m, o que representa a faixa do micro-ondas (PARADELLA *et al.*, 2015). Contudo, as resoluções espaciais podem variar com a mudança de altitude da órbita dos satélites utilizados para o acoplamento dos sensores.

Buscando exemplificar o uso desse tipo de sensoriamento, temos o Sentinel-1, pertencente a ESA (*Europe Space Agency*), cujo primeiro lançamento foi executado em abril de 2014 com o objetivo de realizar o monitoramento de florestas e áreas agrícolas, além de outras funções como monitorar mudanças climáticas e incêndios. O Sentinel-1 opera com o uso de um sensor SAR com resolução espacial de 5 x 5 metros e está posicionado em uma órbita circular de 693 km de altitude, utilizando a faixa de onda X-band (8-12 Ghz) para o downlink de dados para os receptores em solo (ESA, 2014).

## 3 Metodologia

Neste capítulo, é apresentado o método utilizado para a integração dos softwares empregados nas simulações realizadas, destacando-se os procedimentos empregados. Além disso, são definidos os parâmetros iniciais adotados, tais como a área, o tempo de simulação e a escolha do *grid* de pontos de obtenção de resultados. Por fim, também é estabelecido os dados a serem usados nos sensores acoplados aos satélites das constelações em análise.

### 3.1 Procedimentos Metodológicos

Para o desenvolvimento da pesquisa proposta neste trabalho de graduação preliminar, o procedimento utilizado é o descrito no fluxograma da Figura 3.1. Nele verifica-se o método que é usado no início, partindo da escolha do tipo de constelação a ser utilizada, passando por uma visão geral da simulação a ser desenvolvida, chegando, finalmente às escolhas dos melhores resultados.

Não obstante, a Figura 3.2 detalha o procedimento usado na simulação, abordando o uso dos softwares STK<sup>®</sup> e MATLAB<sup>®</sup>, mostrando os casos que podem ocorrer com o uso dos mesmos. Esse procedimento é usado em *loop* para os dados escolhidos para a constelação com base na revisão bibliográfica e o estudo específico do caso abordado.

### 3.2 Integração de *softwares*

A fim de se realizar as simulações desejadas, foram desenvolvidas rotinas em MATLAB<sup>®</sup> de tal forma a automatizar o processo de geração de dados com o auxílio do STK<sup>®</sup>. Tal escolha de procedimento está diretamente ligada à boa conectividade que existe entre as duas plataformas consideradas, permitindo que além de se automatizar o processo de simulação, facilita-se o mesmo e gasta-se menos tempo para a realização e criação dos cenários de simulação.

Com isso, foi definida uma constelação padrão e foi alterado a quantidade total de

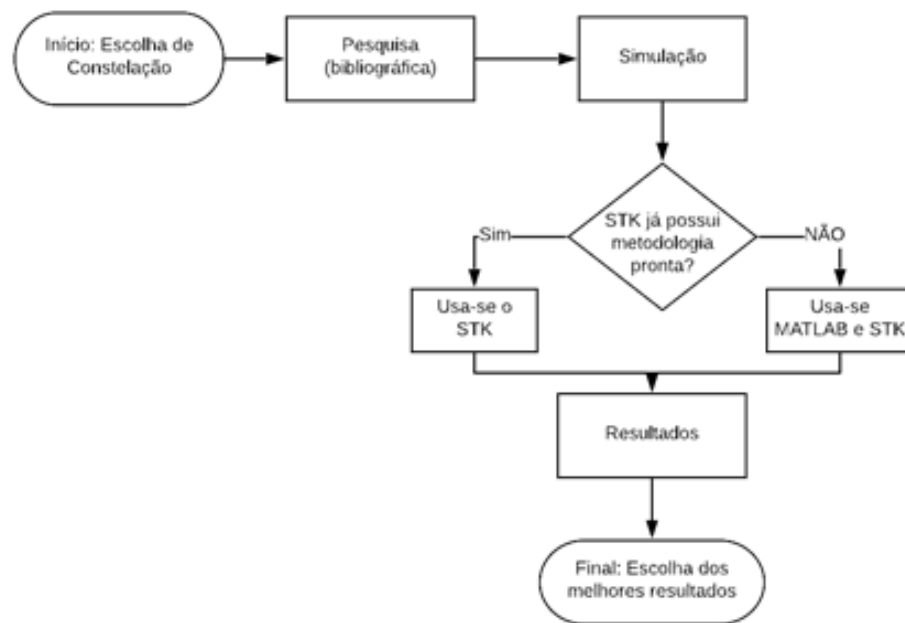


FIGURA 3.1 – Metodologia geral do procedimento usado na pesquisa.

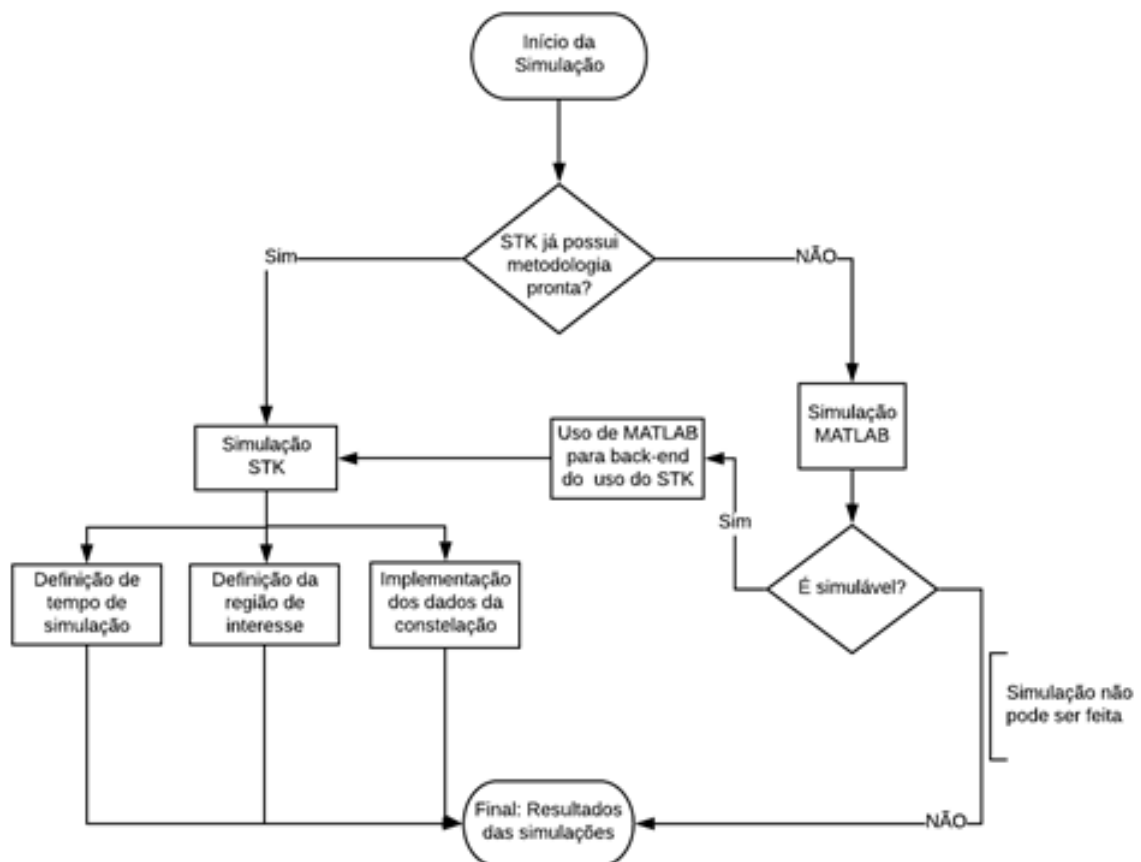


FIGURA 3.2 – Detalhamento do procedimento de simulação.

satélites, com todos eles apresentando um mesmo tipo de sensor SAR e seus parâmetros. A execução dos procedimentos descritos foi realizada com o desenvolvimento de funções capazes de gerar as constelações *Walker* e *Polar*, além de um arquivo principal capaz de construir todo o cenário de simulação.

### 3.3 Parâmetros iniciais

Para a realização das simulações, é necessário definir parâmetros de partida, que serão mantidos constantes em todos os casos abordados. São eles: as áreas de estudo, o tempo de simulação e a escolha do *grid* de pontos.

#### 3.3.1 Escolha das áreas

O estudo dos tempos de revisita e de cobertura em torno da fronteira brasileira está diretamente relacionado ao espaço geográfico selecionado para se submeter a análise, podendo os resultados estarem sujeitos à essa escolha.

Nesse propósito, considerou-se a fronteira terrestre legal do Brasil, delimitada como sendo dos limites do país até uma distância de 150 km (conforme a Constituição Brasileira de 1988 (ROCHA, 2016)), dividindo-a em 12 áreas distintas, referentes aos 11 estados brasileiros que estão na fronteira terrestre do país (com o estado do Amazonas sendo considerado 2 vezes), conforme apresenta a Figura 3.3.



FIGURA 3.3 – Divisão das áreas da fronteira.

### 3.3.2 Tempo de simulação

Outro parâmetro de análise importante é o tempo de simulação nos cenários do software STK<sup>®</sup>, que podem alterar significativamente o tempo computacional exigido para a execução das análises de interesse.

Neste sentido, visando entender a influência do tempo de simulação no resultado final dos tempos de revisita, considera-se duas análises distintas, com uma configuração de constelação com os parâmetros apresentados na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – Dados da constelação *Walker* usada na análise dos tempos de simulação

Parâmetro	Valor
Total de Satélites ( $T$ )	6
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaçamento relativo ( $F$ )	0
Altitude	400 km
Inclinação da órbita	45 <sup>o</sup>
Ascensão reta do nodo ascendente	45 <sup>o</sup>

Sendo assim, os cenários considerados são de 3 meses e de 1 ano e 6 meses de tempo de simulação e os dados de saída são apresentados na Figura 3.4. Observa-se que os resultados são muito próximos um do outro, com pequenas diferenças na casa dos segundos, o que indica que não é necessário o uso de um tempo de simulação longo para os cenários no STK<sup>®</sup>.

Tal resultado é importante por permitir uma diminuição do tempo computacional da simulação, uma vez que um tempo menor de simulação permite uma maior rapidez no período de simulação necessário para os estudos apresentados.

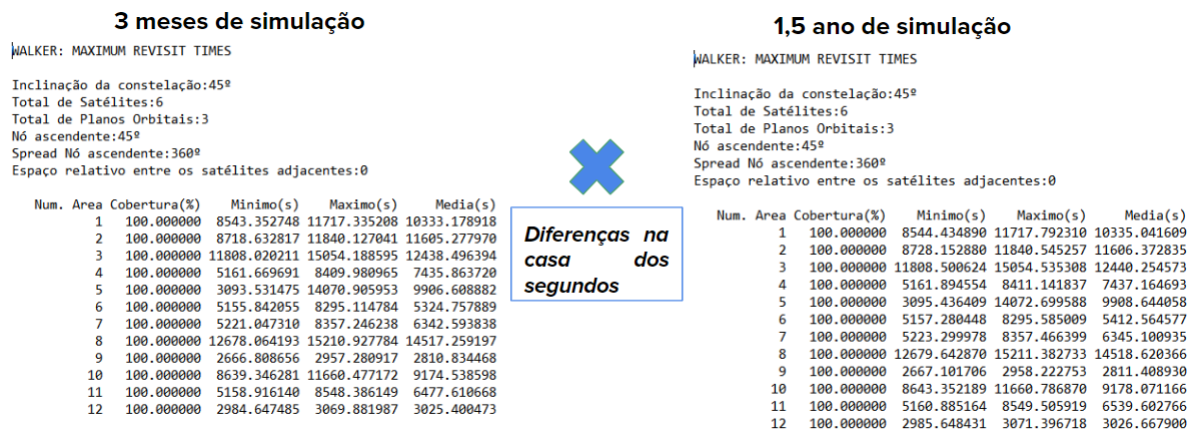


FIGURA 3.4 – Comparação dos tempos de simulação.

Neste sentido, foi adotado um tempo de cerca de 6 meses (um meio termo entre os valores simulados), cujo início se dá em 1<sup>o</sup> de julho de 2020 e o término ocorre em 1<sup>o</sup> de janeiro de 2021.

### 3.3.3 Escolha do *Grid*

Para que seja possível analisar de forma satisfatória toda a região da fronteira após sua divisão em 12 áreas, escolhe-se uma resolução de  $0,5^\circ$  de latitude e longitude. Deste modo, até para as menores áreas escolhidas, são gerados pontos que podem ser usados como objetos-alvo para gerar resultados médios mais coerentes com o total da região.

## 3.4 Sensoriamento Remoto

Considerando como sendo o principal objeto de estudo deste trabalho a obtenção dos tempos de revisita médio para a fronteira brasileira, os parâmetros dos sensores do tipo SAR usados em cada satélite foram supostos constantes e podem ser subdivididos em duas categorias principais: os ângulos de elevação e os ângulos de exclusão.

Os ângulos de elevação máximo e mínimo representam os ângulos limites onde o sensor SAR pode fornecer cobertura do objeto em estudo (no caso, as regiões da fronteira). Já os ângulos de exclusão representam o ângulo mínimo entre a projeção para frente ou para trás do vetor de velocidade fixa na Terra e o vetor do objeto de estudo ao objeto de origem, estando relacionado com o deslocamento Doppler máximo sob o qual o sensor pode operar. Tais ângulos são representados na Figura 3.5 e os seus valores numéricos utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 3.2. Convém ressaltar que os valores adotados para os ângulos de elevação foram escolhidos conforme dados encontrados na literatura, usando como referência o satélite RADARSAT-1, de função de observação terrestre e desenvolvido para monitorar mudanças ambientais (RADARSAT, 2020), enquanto que os ângulos de exclusão foram considerados os padrões do software em uso.

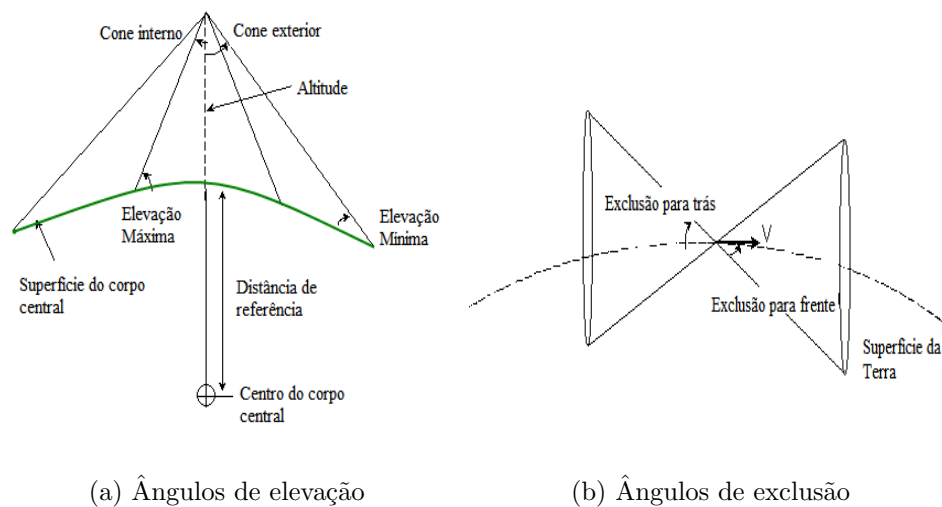


FIGURA 3.5 – Representação dos ângulos dos sensores SAR.

Convém destacar que esses parâmetros são os fatores de entrada para a simulação no

STK<sup>®</sup>, gerando a representação gráfica mostrada pela Figura 3.6.

TABELA 3.2 – Dados dos sensores SAR usados na simulação.

Ângulos	Valor
Elevação máxima	20 <sup>o</sup>
Elevação mínima	50 <sup>o</sup>
Exclusão: <i>forward</i>	35 <sup>o</sup>
Exclusão: <i>aft</i> .	35 <sup>o</sup>

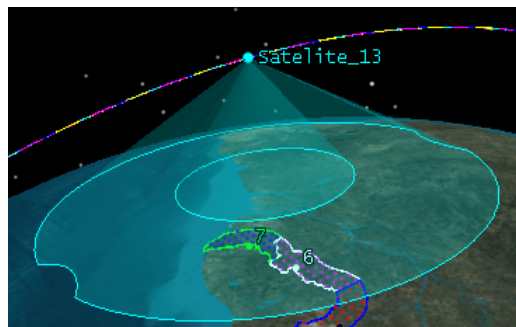


FIGURA 3.6 – Representação do sensor SAR, retirada do software STK<sup>®</sup>.

## 3.5 Figuras de Mérito

### 3.5.1 Tempo de Revisita

O tempo de revisita representa os intervalos durante os quais a cobertura não é fornecida (também chamadas de lacunas), ou ainda, indica o tempo entre duas observações em sequência de dois satélites pertencentes a constelação.

Sendo assim, considerando o intervalo de cobertura como o tempo total da simulação, foram empregados três conceitos principais nesse estudo com o uso do *software* STK<sup>®</sup>, que são:

- Tempo de Revisita Médio: é o valor médio entre das durações de todas as lacunas na cobertura durante todo o intervalo de cobertura;
- Tempo de Revisita Mínimo: é a duração da menor lacuna na cobertura em todo o intervalo de cobertura;
- Tempo de Revisita Máximo: é a duração da maior lacuna na cobertura em todo o intervalo de cobertura.



### 3.5.2 Percentual de Tempo de Acesso

Esta figura de mérito representa a porcentagem de tempo durante o qual um ponto ou região é coberto por completo (se houver cobertura total do local). Neste sentido, também são usadas três definições para o estudo deste parâmetro, são eles:

- Percentual de Tempo de Acesso Médio: é o valor médio entre os percentuais de acesso de todos os pontos de uma região;
- Percentual de Tempo de Acesso Mínimo: é o menor percentual de acesso observado em um ponto na região;
- Percentual de Tempo de Acesso Máximo: é o maior percentual de acesso observado em um ponto na região.

Uma situação capaz de exemplificar o funcionamento desta figura de mérito é imaginar que se uma determinada região é estudada em um tempo de simulação de cerca de 1 ano e o percentual de acesso apresentado for de 25%, então o tempo total no qual a área em questão apresenta ao menos um satélite monitorando a região é de cerca de 3 meses.

## 3.6 Ordem de simulação

Para a constelação *Walker*, iniciou-se o estudo determinando a altitude que apresenta os melhores resultados para as figuras de mérito. Em seguida, determinou-se a inclinação mais indicada para o prosseguimento das simulações, de onde foi possível realizar a simulação do total de satélites, que foi feita considerando uma quantidade de planos fixada, sendo estudada a sua variação logo em seguida. Para o estudo da RAAN, o valor dela para um dos satélites em uma órbita foi alterado, fazendo com que todos os outros estivessem igualmente espaçados a partir deste valor inicial. Tal metodologia foi adotada ao longo de todo o estudo. Finalmente, verificou-se o efeito da variação do espaçamento relativo entre planos, finalizando as análises.

O mesmo procedimento é adotado para as constelações Polares, com a diferença de que o estudo de inclinação não se fez necessário pelo fato do valor ter sido fixado em  $90^\circ$ .

## 4 Resultados Obtidos - Constelação *Walker*

Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações considerando a utilização de constelações *Walker*, além de uma discussão a respeito dos resultados encontrados

### 4.1 Tempos de revisita

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações da figura de mérito de tempo de revisita para constelações do tipo *Walker*.

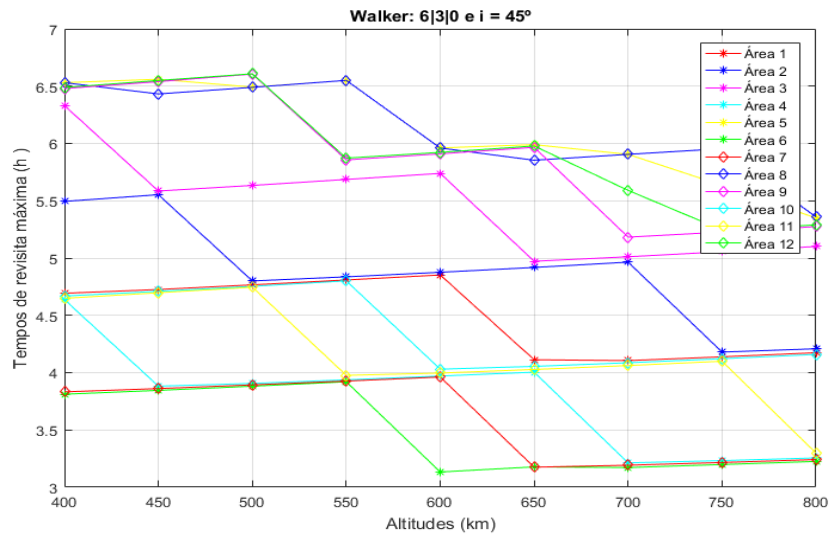
#### 4.1.1 Variação da altitude

A fim de se avaliar o efeito da variação da altitude no contexto da utilização de *Walker* e o seu efeito no tempo de revisita, considera-se uma constelação com os dados fixados conforme apresentados na Tabela 4.1.

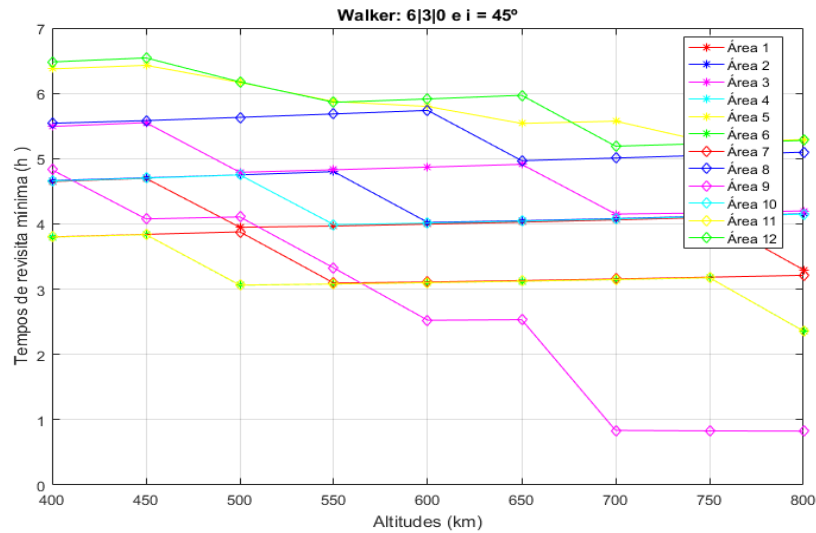
TABELA 4.1 – Dados da constelação *Walker* usada na análise da influência das altitudes

Parâmetro	Valor
Total de Satélites ( $T$ )	6
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Inclinação da órbita	45 <sup>o</sup>
Ascensão reta do nodo ascendente	45 <sup>o</sup>

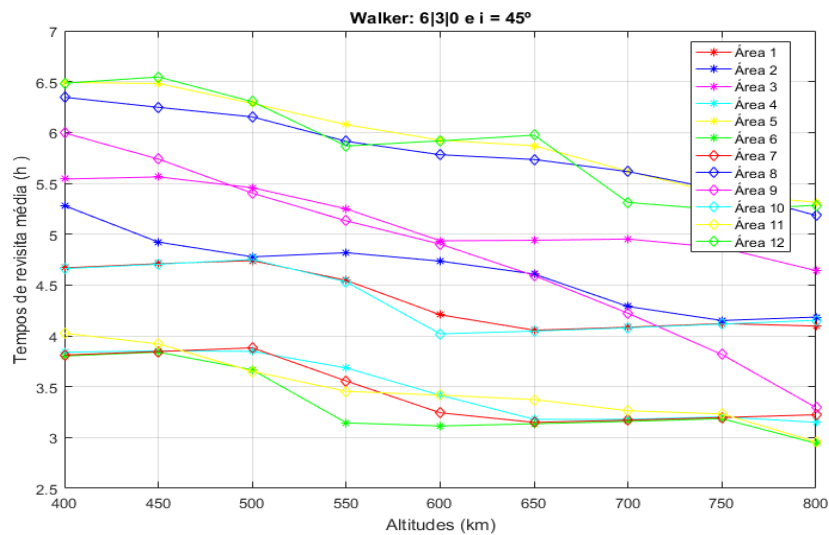
Desta forma, com a utilização dos softwares MATLAB<sup>®</sup> e STK<sup>®</sup> é possível obter a Figura 4.1 que apresenta os resultados dos tempos de revisita máximo, mínimo e médio. Convém ressaltar que as altitudes foram variadas de 50 km em 50 km, começando com 400 km e indo até 800 km de altitude (mantendo-se, portanto, os satélites em órbitas LEO).



(a) Tempo de revisita máximo por área



(b) Tempo de revisita mínimo por área

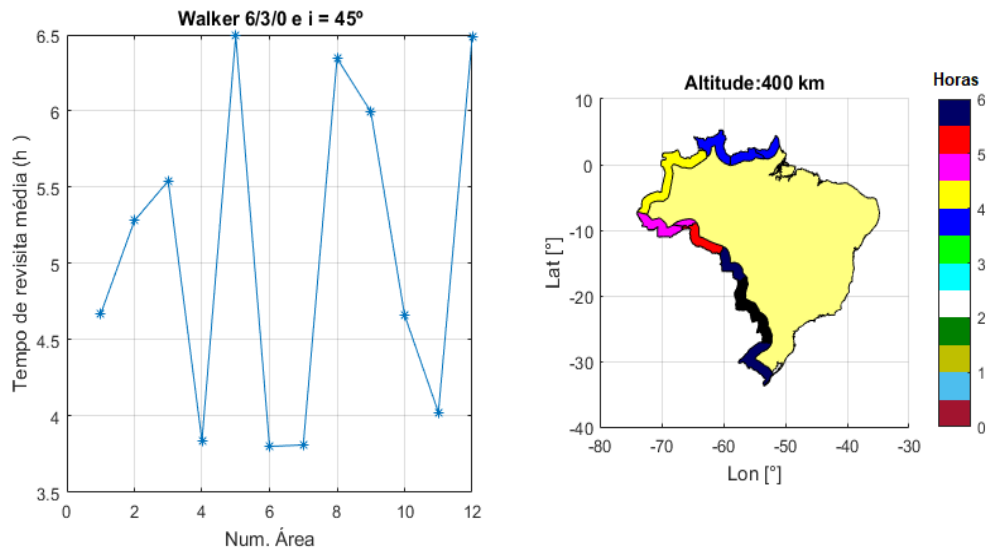


(c) Tempo de revisita médio por área

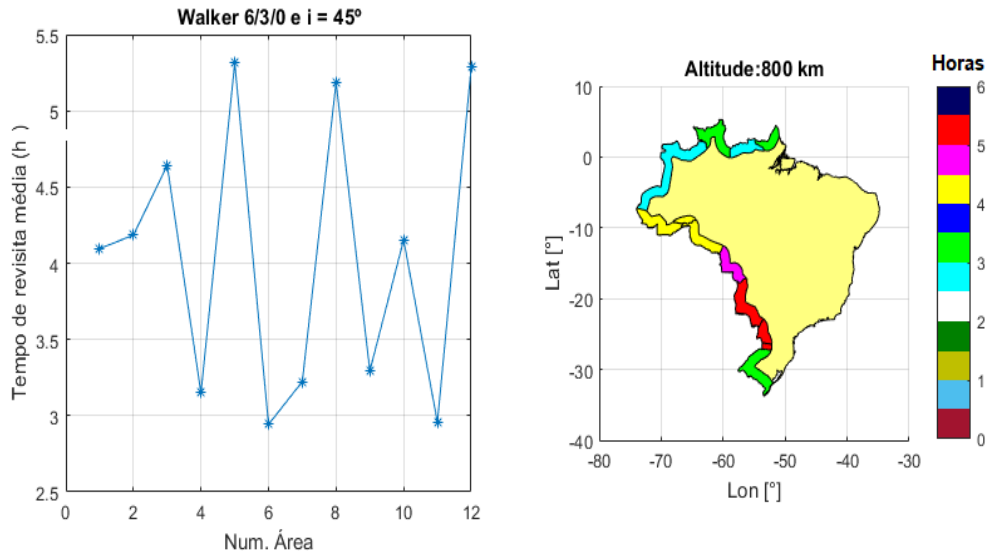
FIGURA 4.1 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação da altitude.

Na Figura 4.1, observa-se uma tendência linear de decaimento dos valores dos tempos de revisita (tanto máximo, quanto mínimo e médio) com o aumento das altitudes. Tais resultados estão de acordo com o esperado, uma vez que essa diminuição está relacionada com o aumento da área de visualização do satélite com o aumento da altitude.

As Figuras 4.2 (a, b) mostram a variação dos tempos de revisita por áreas da fronteira brasileira, com altitudes de 400 km e 800 km, respectivamente. Pode-se assim perceber uma clara diminuição dos tempos de revisita em todas as regiões consideradas neste estudo.



(a) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 400 km de altitude



(b) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 800 km de altitude

FIGURA 4.2 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas.

Ademais, buscando-se verificar o comportamento linear da curva de tempo de revisita pela atitude, é utilizada a função *Curve Fitting Tool* do software MATLAB® para gerar

a curva dos tempos de revisita médio das 12 áreas pela altitude. Neste sentido, ao considerarmos o tempo de revisita médio para uma determinada altitude, considera-se as 12 regiões de delimitação da simulação. O resultado obtido é aquele apresentado na Figura 4.3, com os dados obtidos da regressão linear apresentados na Tabela 4.2.

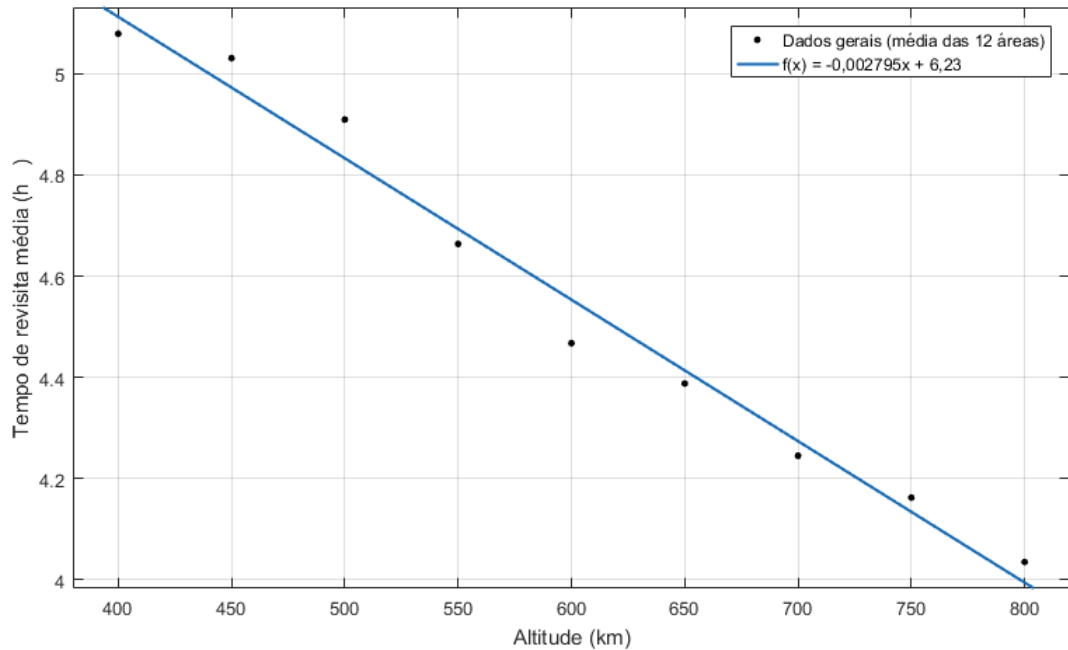


FIGURA 4.3 – Revisita média das 12 áreas pela altitude.  $r^2 = 0,9811$ .

TABELA 4.2 – Dados da regressão linear da análise da influência das altitudes

Parâmetro	Valor
$f(x)$	$-0,0022795x + 6,23$
$r^2$	0,9811

Com base nos resultados apresentados, verifica-se que, de fato, considerar a diminuição dos tempo médios de revisita como sendo aproximadamente linearmente dependentes da altitude é bastante razoável, fazendo com que aumentos de altitude sejam capazes de fornecer melhores valores de revisita, embora possam diminuir as resoluções espaciais fornecidas pelos sensores, devido à tecnologia do sensor SAR ser de origem de ondas eletromagnéticas, que possui um sinal inversamente proporcional ao quadrado da distância ao alvo (NUSSENZVEIG, 2015), comprometendo os dados.

### 4.1.2 Variação da inclinação

Após o estudo da variação das altitudes, as inclinações das órbitas são alteradas, buscando-se entender quais apresentam os melhores resultados para os tempos de revisita da fronteira terrestre brasileira. Para isso, os dados apresentados na Tabela 4.3 são considerados fixos nesse estudo.

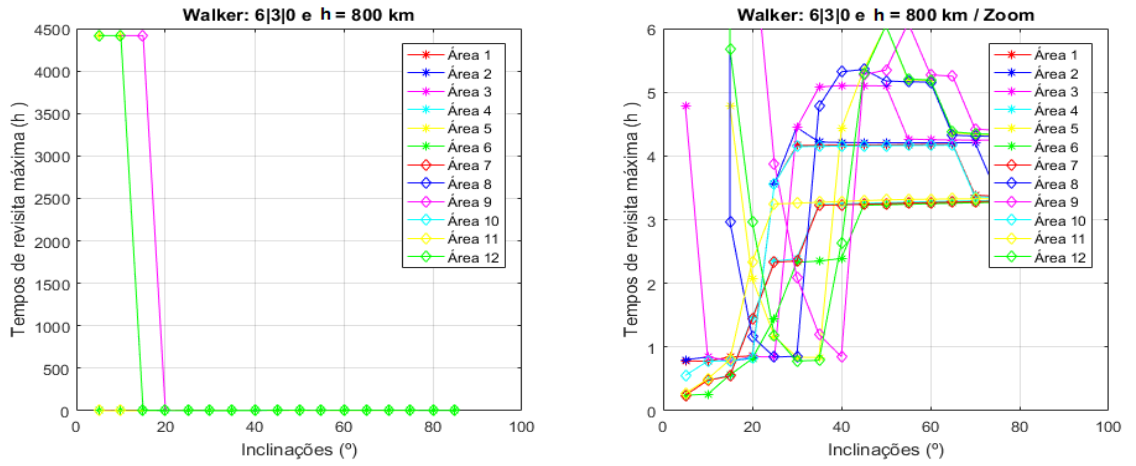
TABELA 4.3 – Dados da constelação *Walker* usada na análise das inclinações

Parâmetro	Valor
Total de Satélites ( $T$ )	6
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Ascensão reta do nodo ascendente	$45^\circ$

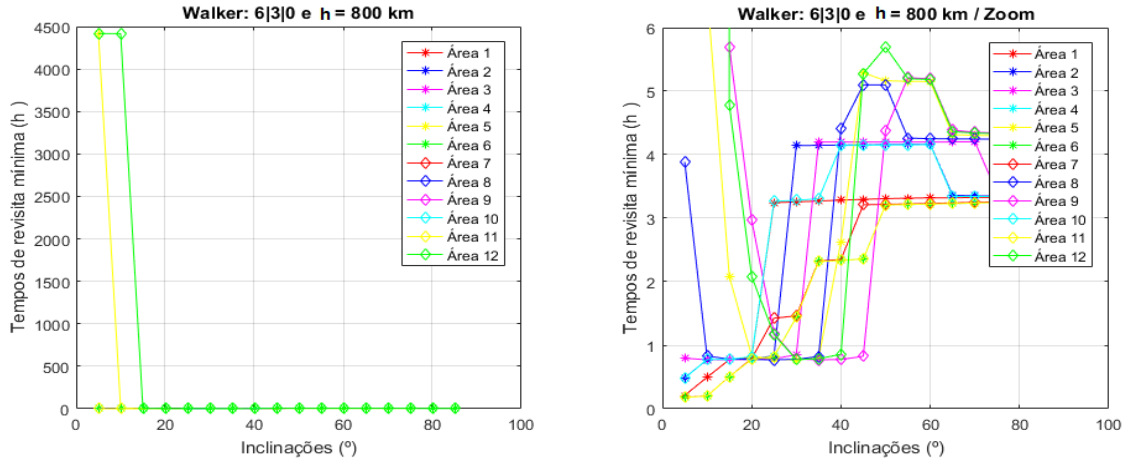
Deste modo, varia-se as inclinações de  $5^\circ$  em  $5^\circ$ , partindo de  $5^\circ$  até  $85^\circ$ , obtendo-se a Figura 4.4 com os tempos de revisita máxima, mínima e média. Tal procedimento foi realizado, mais uma vez, com o uso dos softwares MATLAB<sup>®</sup> e STK<sup>®</sup>.

Com base nos resultados encontrados, observa-se que os menores tempos de revisita são encontrados em algumas regiões com inclinação de  $5^\circ$ . Contudo, nesta inclinação temos regiões sem serem cobertas, o que é observado pelo elevado número de horas de tempo de revisita (horas equivalente ao total do tempo de simulação), logo a inclinação de  $5^\circ$  não é favorável a toda a fronteira. Por outro lado, para uma inclinação de  $25^\circ$ , temos um tempo de revisita mais uniforme entre todas as 12 áreas, além de valores interessantes de tempo de revisita (em horas).

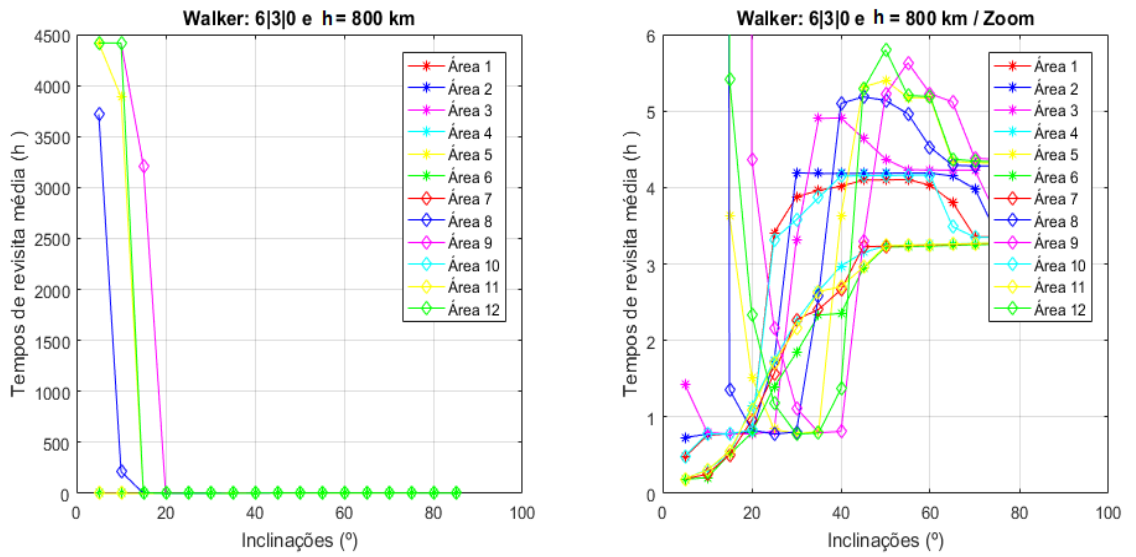
Neste sentido, as Figuras 4.5 (a, b) apresentam graficamente os resultados dos tempos de revisita para as inclinações de  $5^\circ$  e  $25^\circ$ , respectivamente. Elas mostram que para uma inclinação de  $5^\circ$ , apenas a região da fronteira localizada ao Norte do país é coberta satisfatoriamente, enquanto que a região Sul nem é coberta. Outrossim, todas as regiões do país são cobertas de forma aproximadamente uniforme e com valores de tempos de revisita baixos quando a inclinação é de  $25^\circ$ .



(a) Tempo de revisita máximo por área

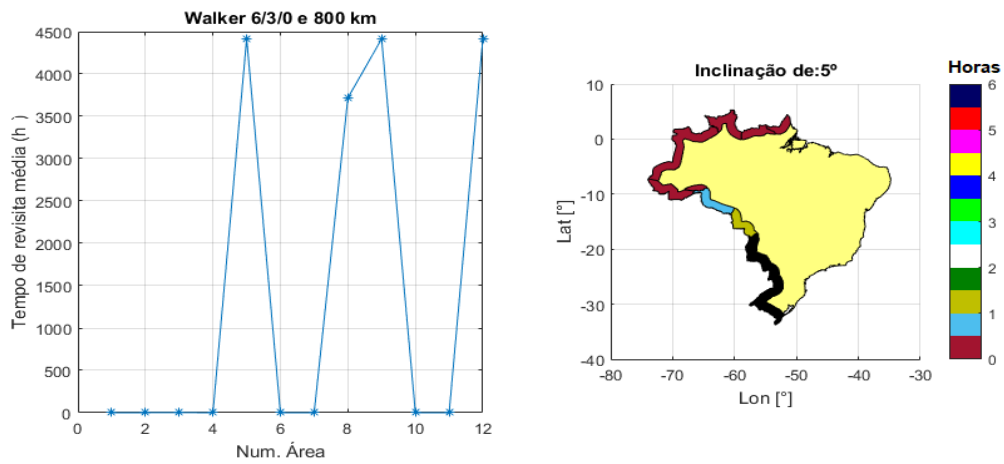


(b) Tempo de revisita mínimo por área

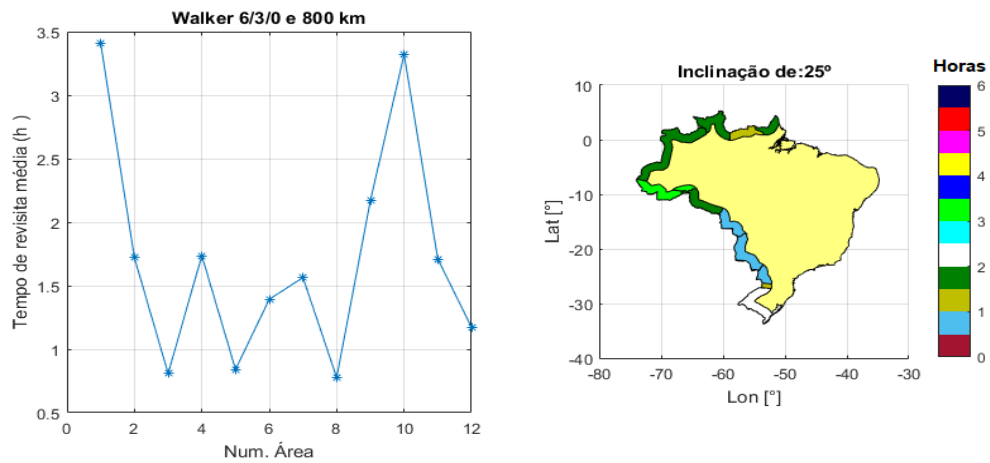


(c) Tempo de revisita médio por área

FIGURA 4.4 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação das inclinações.



(a) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 5° de inclinação.



(b) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 25° de inclinação.

FIGURA 4.5 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas.



### 4.1.3 Variação do total de satélites

Para a realização do estudo da influência do número total de satélites no tempo de revisita, o número de planos orbitais é fixado, o que limita o número de satélites (devendo ser proporcional ao número de planos). No contexto deste trabalho, são escolhidos 3 planos orbitais, variando-se de 3 em 3 satélites (sempre aumentando 1 em cada plano), partindo de 3 satélites (1 em cada plano) e chegando em 18 satélites (6 em cada plano). Os demais parâmetros são fixados conforme apresentados na Tabela 4.4.

TABELA 4.4 – Dados da constelação *Walker* usada na análise do total de satélites

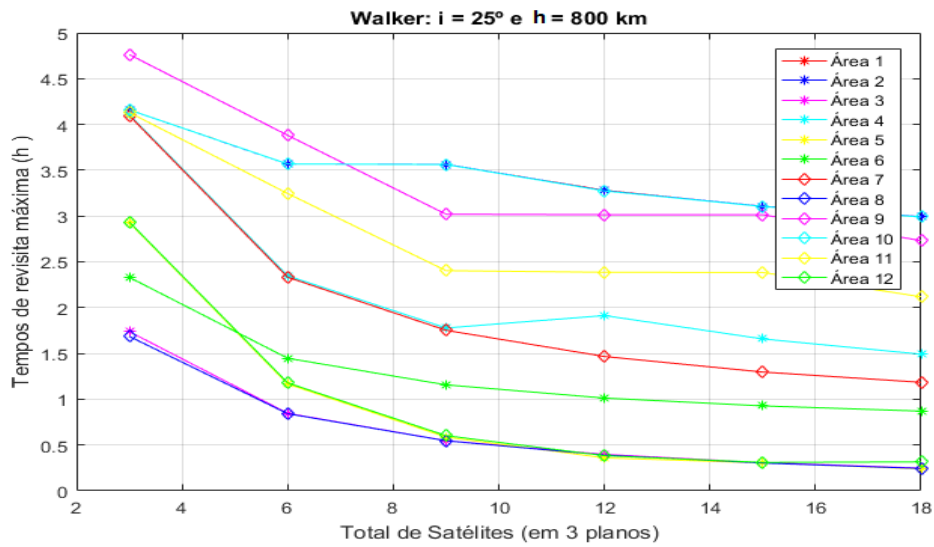
Parâmetro	Valor
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Inclinação da órbita	25°
Ascensão reta do nodo ascendente	45°

Desta forma, é obtida a Figura 4.6 com os tempos de revisita máxima, mínima e média. Tal procedimento foi realizado, mais uma vez, com o uso dos softwares MATLAB® e STK®. Percebe-se uma tendência de queda exponencial do tempo de revisita com a diminuição da quantidade total de satélites.

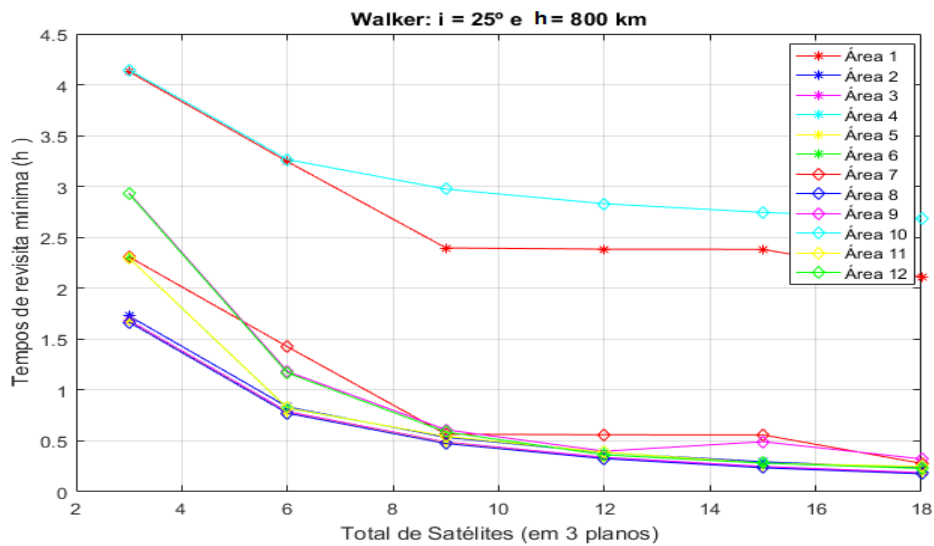
Sendo assim, as Figuras 4.7 (a, b) mostram representações gráficas da fronteira terrestre brasileira, com 6 e 18 satélites (respectivamente), alterando-se as cores conforme os tempos de revista em cada região.

Por fim, para comprovar a hipótese de comportamento exponencial da curva de tempo de revisita pela altitude, é utilizada a função *Curve Fitting Tool* do software MATLAB® para gerar a curva dos tempos de revisita médio das 12 áreas pelo total de satélites. Neste sentido, ao considerarmos o tempo de revisita médio para um determinado número de satélites, considera-se as 12 regiões de delimitação da simulação. O resultado obtido é o apresentado na Figura 4.8, com os dados obtidos da regressão linear apresentados na Tabela 4.5.

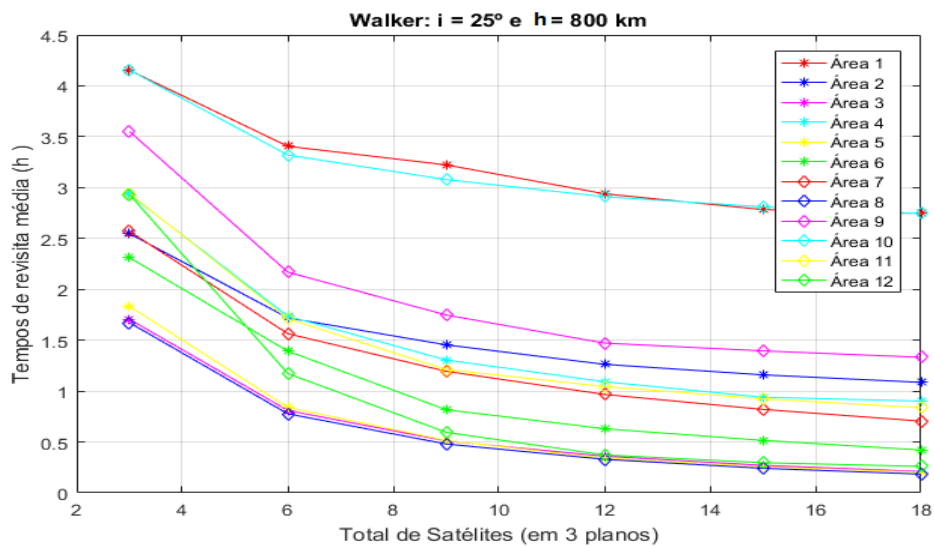
Com base nos resultados apresentados para 3 satélites, a solução apresenta menores tempos de revisita para o oeste da região Norte do país, com destaque para as áreas 1 (no Acre) e 10 (no Amazonas), o que pode estar diretamente relacionado com a inclinação escolhida para o estudo. Verifica-se ainda que a diferença relativa entre o maior e o menor tempo de revisita de cerca de 54%. Contudo, quando se analisam os tempos com 18 satélites verifica-se uma diferença relativa de cerca de 90% entre o maior e o menor tempo de revisita, observados nas áreas 1 (no Acre) e 3 (no Mato Grosso) respectivamente, com resultados muito semelhantes sendo verificados na literatura (SILVA *et al.*, 2020).



(a) Tempo de revisita máximo por área

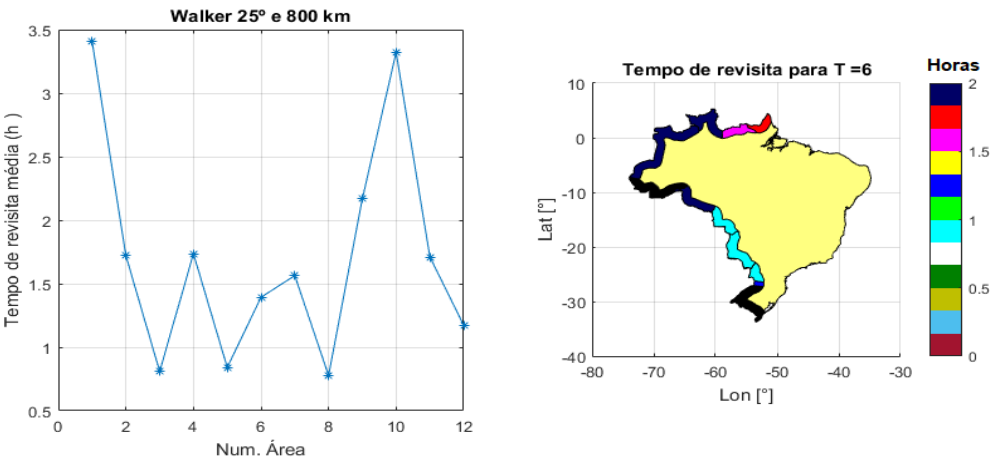


(b) Tempo de revisita mínimo por área

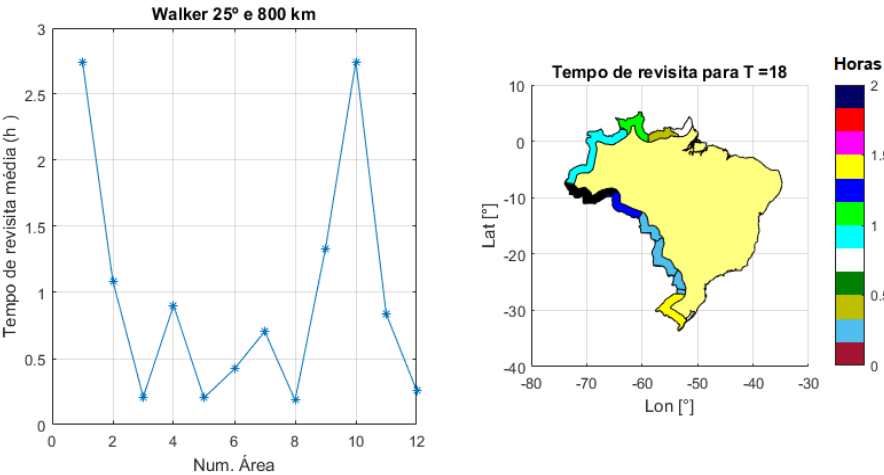


(c) Tempo de revisita médio por área

FIGURA 4.6 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação do total de satélites.



(a) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 6 satélites.



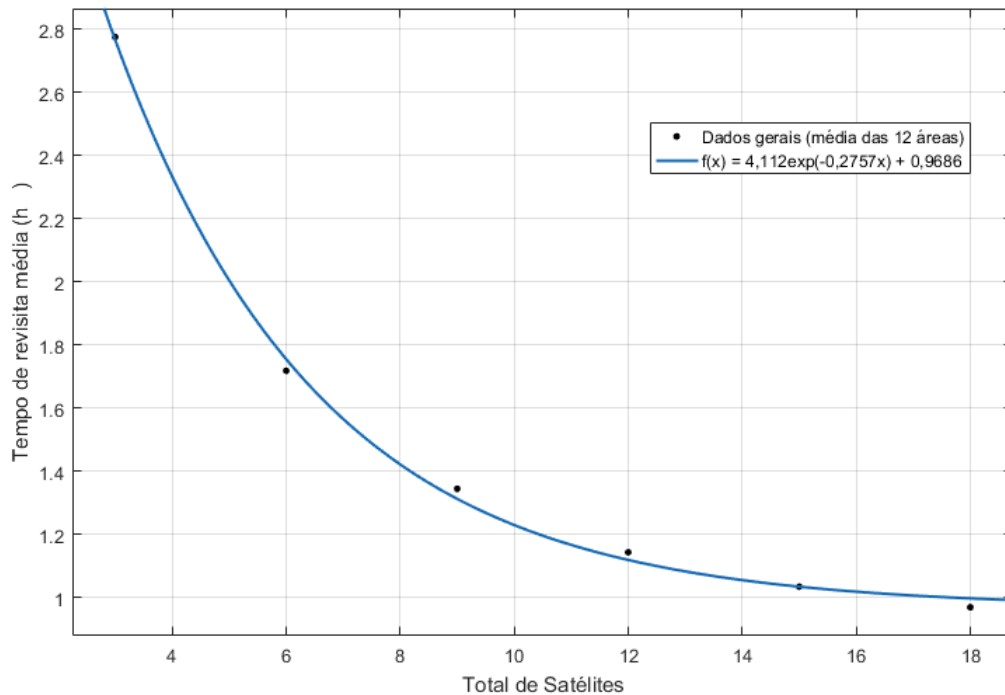
(b) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 18 satélites.

FIGURA 4.7 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas.

TABELA 4.5 – Dados da regressão linear da análise da influência o total de satélites no tempo de revisita em constelações *Walker*.

Parâmetro	Valor
$f(x)$	$4,112e^{-0,2757x} + 0,9686$
$r^2$	0,9983

Finalmente, no contexto da escolha das melhores soluções compromisso, uma quantidade de satélites muito elevada passa a não ser interessante (aumento de custos e complexidade de projeto) (WERTZ, 2001), levando a um número mais razoável de satélites de cerca de 6 veículos espaciais.

FIGURA 4.8 – Revisita média das 12 áreas pelo total de satélites.  $r^2 = 0,9983$ .

#### 4.1.4 Variação do número de planos

Ademais, deve-se realizar um estudo da variação do tempo de revisita com a mudança do número de planos da constelação. Para isso, consideram-se os dados apresentados na Tabela 4.6, na qual observa-se um número de 12 satélites, permitindo-se uma variação de 6 planos orbitais para que sejam mantidos os números de satélites por plano.

TABELA 4.6 – Dados da constelação *Walker* usada na análise do número de planos ( $P$ )

Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	12
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Inclinação da órbita	$25^\circ$
Ascensão reta do nodo ascendente	$45^\circ$

Sendo assim, foram considerados 1, 2, 3, 4, 6 e 12 planos orbitais, obtendo-se as Figuras 4.9 (a, b, c) com os tempos de revisita máximo, mínimo e médio, respectivamente. Observa-se uma tendência linear no aumento do tempo de revisita a partir de 3 planos orbitais, muito embora os tempos com 1 e 2 planos estejam fora dessa tendência.

Deste modo, para realizar uma comparação em termos de tempo de revisita entre

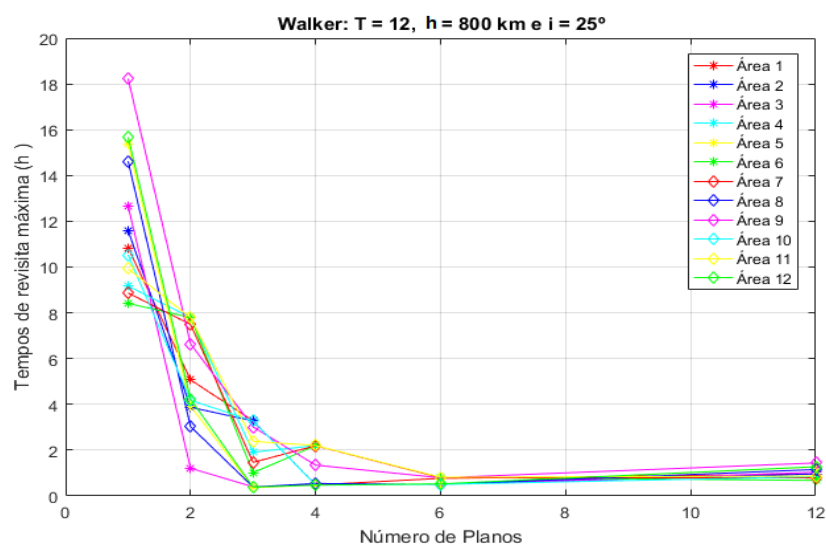
cada região da fronteira terrestre brasileira, consideramos as Figuras 4.10 (a e b) com a representação gráfica para 1 e 3 satélites, respectivamente. Observa-se que a distribuição dos satélites nos planos orbitais possui papel fundamental na diminuição dos tempo de revisita médios obtidos nesse estudo.

Finalmente, a fim de se entender o comportamento do sistema com 3 ou mais planos orbitais, os dados das 12 regiões foram condensados em termos de uma média e é utilizada a função *Curve Fitting Tool* do software MATLAB® para a determinação da melhor regressão linear nos pontos de interesse. Os resultados da função obtida e do seu coeficiente de regressão são apresentados na Tabela 4.7. A Figura 4.11 apresenta os dados com a respectiva curva do comportamento dos tempos de revisita médios.

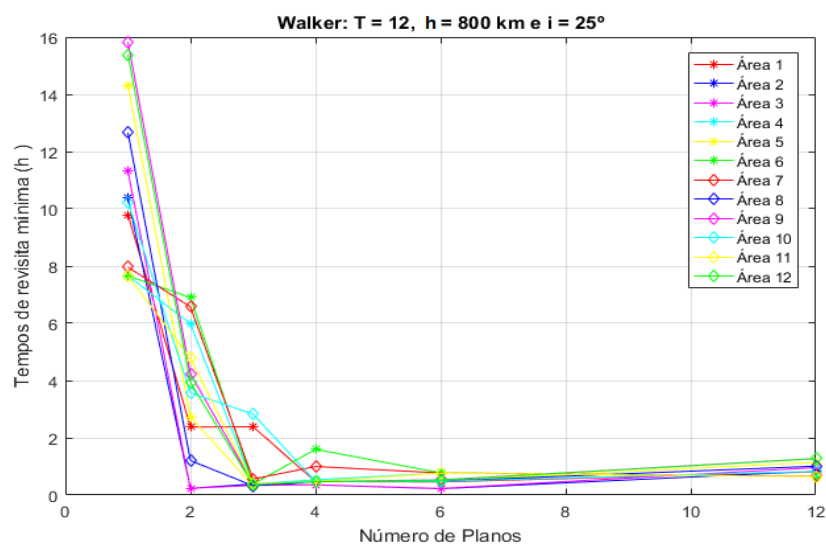
Com base nos dados apresentados, verifica-se que o comportamento dos tempos de revisita médios de todas as áreas tende a diminuir como soma de exponenciais com o aumento do número de planos. Além disso, os maiores tempos de revisita são encontrados para a presença de apenas 1 plano orbital, o que está diretamente relacionado à falta de cobertura fornecida pelo uso deste tipo de configuração.

TABELA 4.7 – Dados da regressão linear da análise da influência do número de planos na constelação *Walker*.

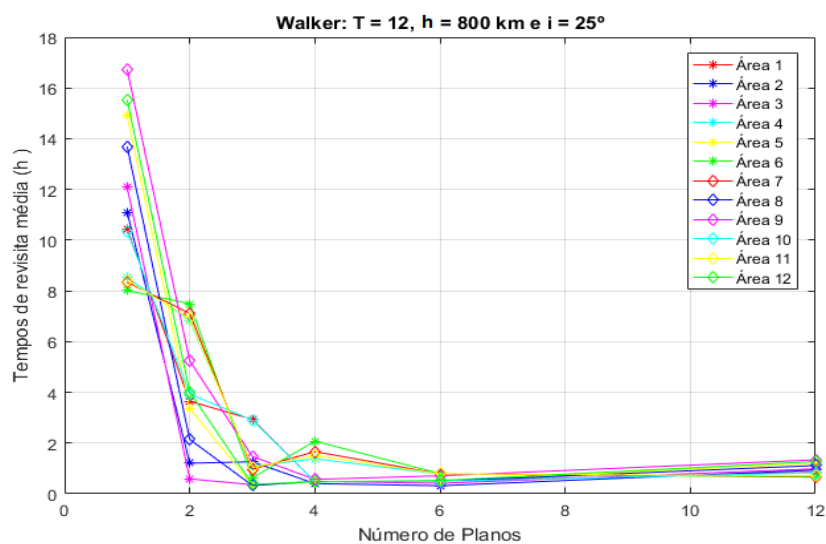
Parâmetro	Valor
$f(x)$	$33,22e^{-1,074x} + 0,1789e^{0,1399x}$
$r^2$	0,9967



(a) Tempo de revisita máximo por área

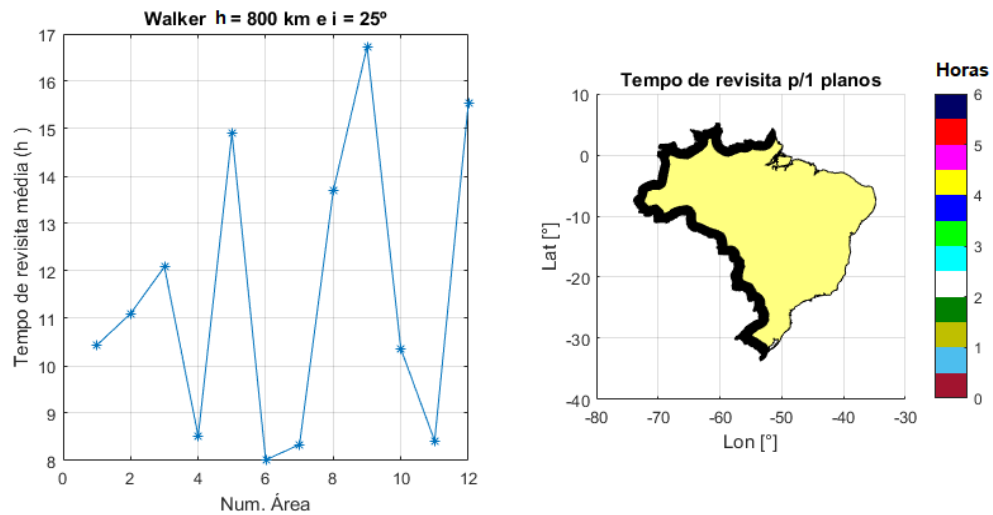


(b) Tempo de revisita mínimo por área

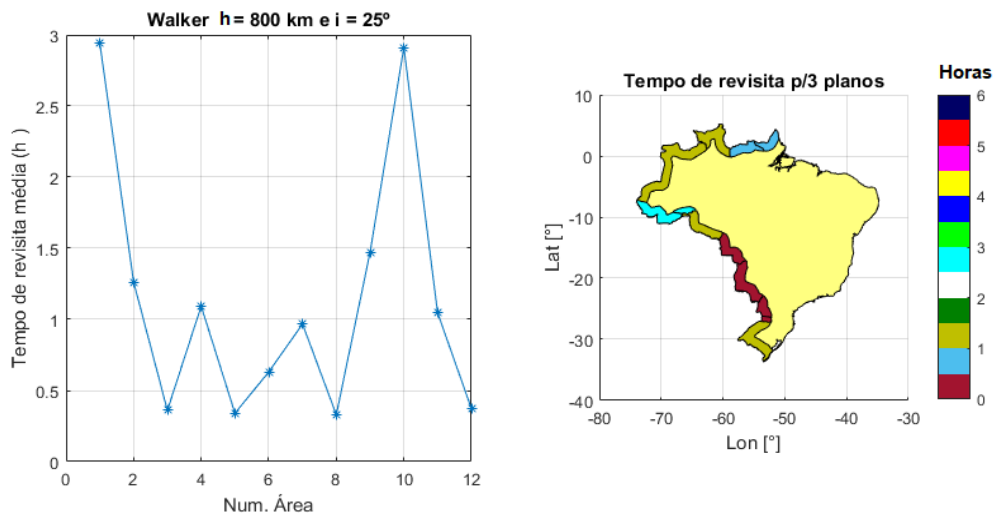


(c) Tempo de revisita médio por área

FIGURA 4.9 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação do número de planos.

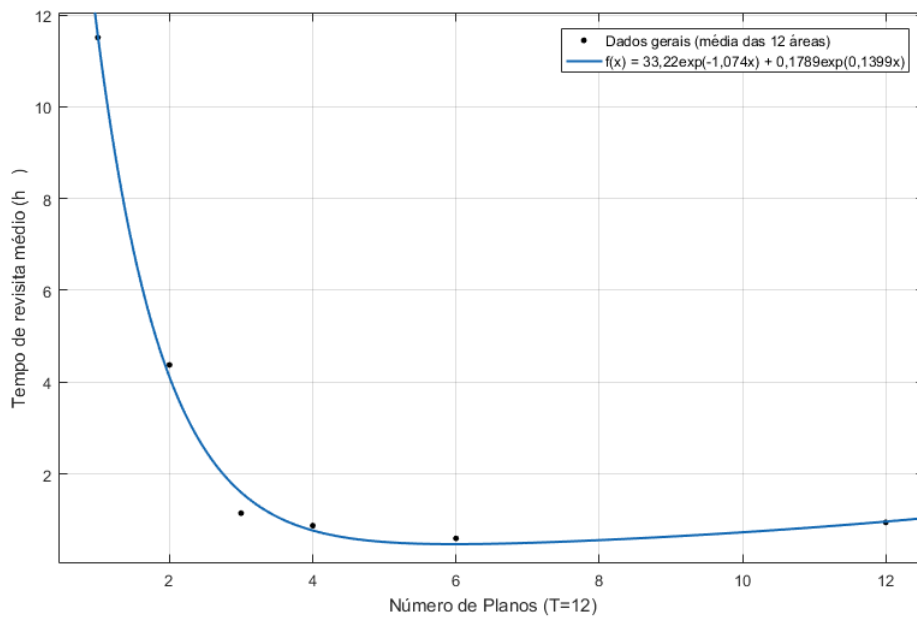


(a) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 1 plano orbital.



(b) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 3 planos orbitais.

FIGURA 4.10 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas.

FIGURA 4.11 – Revisita média das 12 áreas pelo número de planos.  $r^2 = 0,9886$ .

#### 4.1.5 Variação da ascensão reta do nodo ascendente (RAAN)

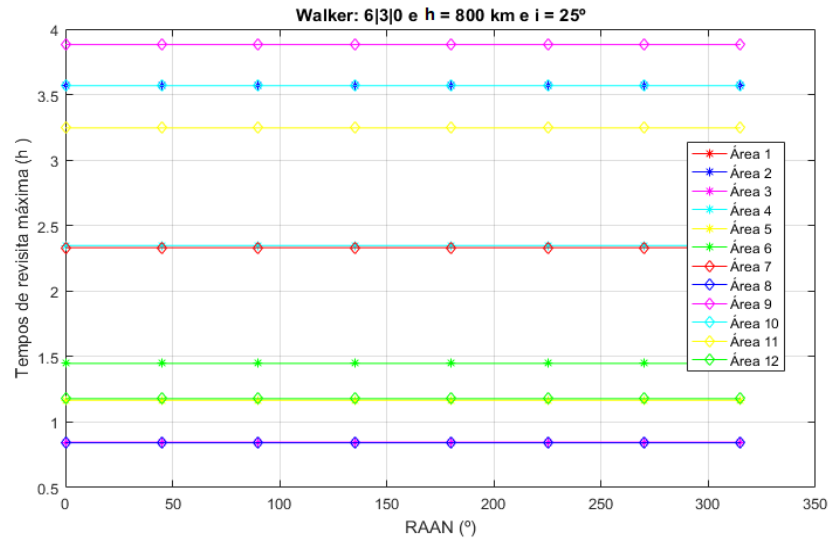
Não obstante, para se entender a importância da variação dos valores de RAAN no estudo das constelações de *Walker*, utilizam-se os dados padrões apresentados na Tabela 4.8.

TABELA 4.8 – Dados da constelação *Walker* usada na análise do RAAN

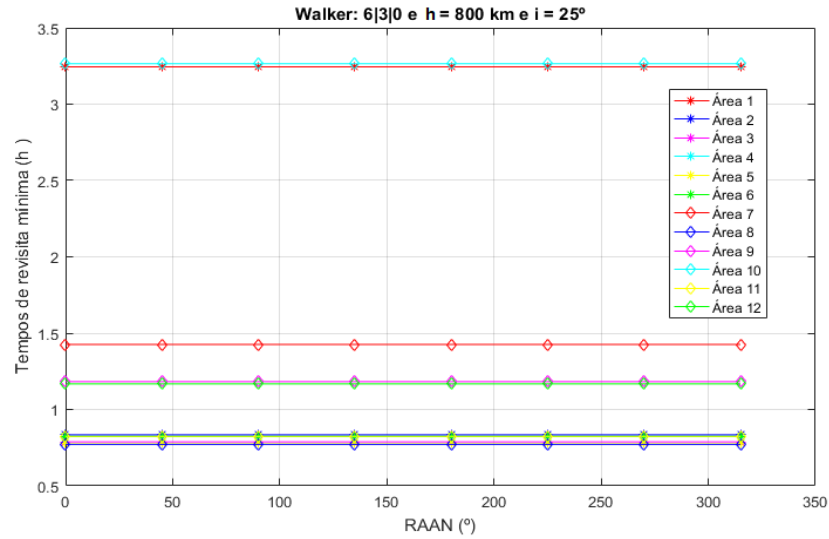
Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	6
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Inclinação da órbita	$25^\circ$

Neste sentido, utilizando-se a metodologia proposta com o uso dos softwares MATLAB<sup>®</sup> e STK<sup>®</sup> são geradas as Figuras 4.12 (a, b, c), com tempos de revisita máximo, mínimo e médio respectivamente. Os valores de RAAN foram alterados a partir de  $0^\circ$  até  $360^\circ$ , de  $45^\circ$  em  $45^\circ$ . Observa-se uma clara tendência linear e constante, ou seja, a mudança da RAAN na simulação das constelações não apresentam alterações significativas nos tempos de revisita. Logo, a escolha deste parâmetro é indiferente para o resultado final da simulação.

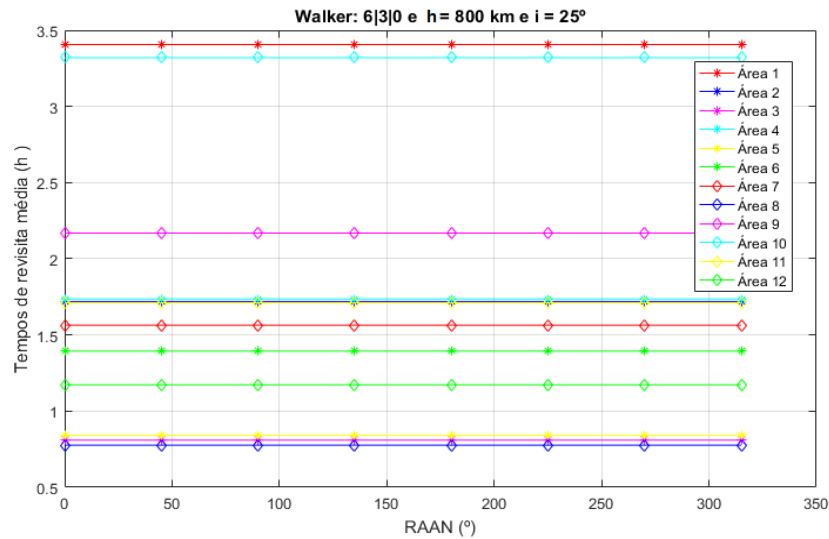




(a) Tempo de revisita máximo por área



(b) Tempo de revisita mínimo por área



(c) Tempo de revisita médio por área

FIGURA 4.12 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação do RAAN.

#### 4.1.6 Variação do espaçamento relativo ( $F$ )

Por fim, o último dos parâmetros da constelação do tipo *Walker* que pode ser variado é o espaçamento relativo  $F$ . Neste sentido, como ele varia de 0 a  $P - 1$  com valores inteiros, os dados escolhidos para se realizar a simulação são os apresentados na Tabela 4.9, onde  $P = 6$ . Com os dados apresentados, são geradas as Figuras 4.13 (a, b, c), mais uma vez com os valores de tempo de revisita máximo, mínimo e médios, respectivamente.

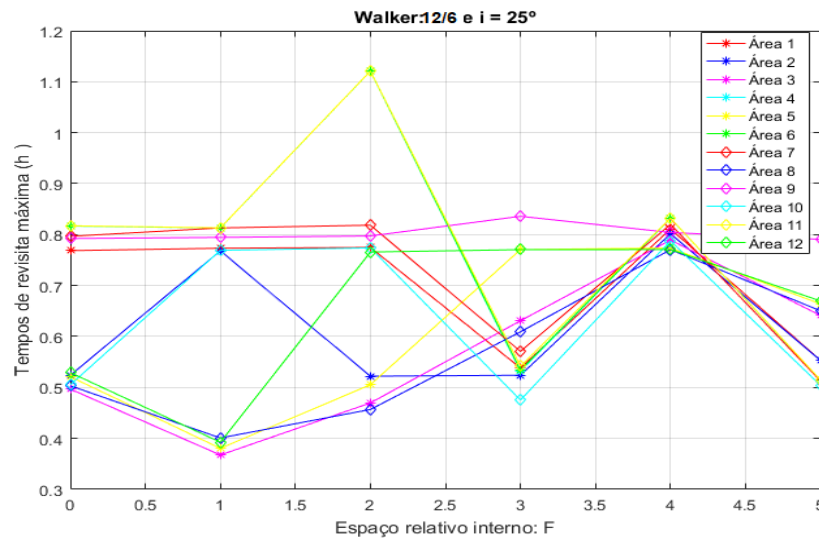
Observa-se que os resultados encontrados não apresentam um padrão claro. Deste modo, a escolha do melhor  $F$  para a realização da cobertura da região deve ser feita após a realização de simulações que permitam comparar cada caso em particular.

Contudo, deve-se destacar que este parâmetro não deve ser negligenciado na escolha das melhores soluções compromisso de constelações do tipo *Walker*, uma vez que os resultados são significativamente alterados.

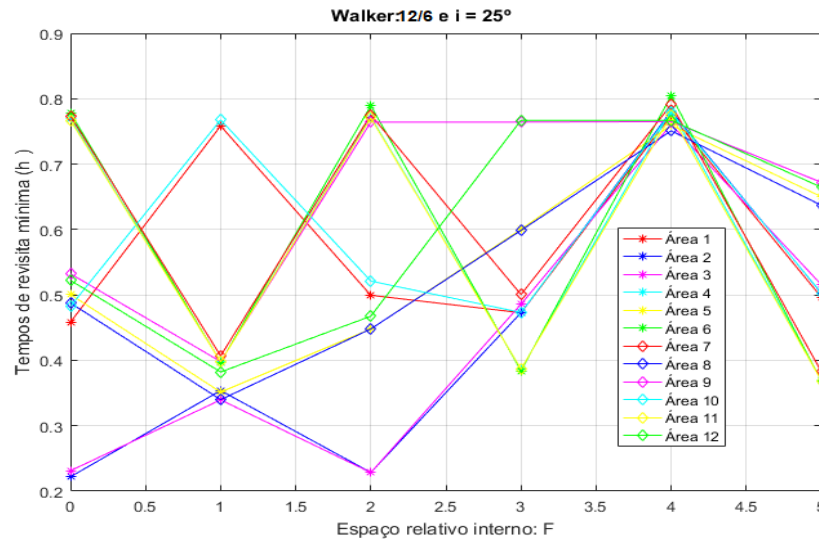
Um exemplo dessa alteração dos resultados encontrados, considera-se a região 8, correspondente ao Mato Grosso do Sul. Nessa localidade, os valores encontrados para o tempo de revisita para um  $F = 0$  é de cerca de 0,3 hora, ou cerca de 18 minutos, enquanto que para um espaçamento interno de 4, o tempo de revisita se torna cerca de 0,8 hora (48 minutos). Deste modo, a diferença relativa entre os dois é de 65%, mostrando que uma escolha conveniente de  $F$  pode acarretar em ganhos significativos em termos de tempo de revisita.

TABELA 4.9 – Dados da constelação *Walker* usada na análise do espaçamento relativo  $F$ .

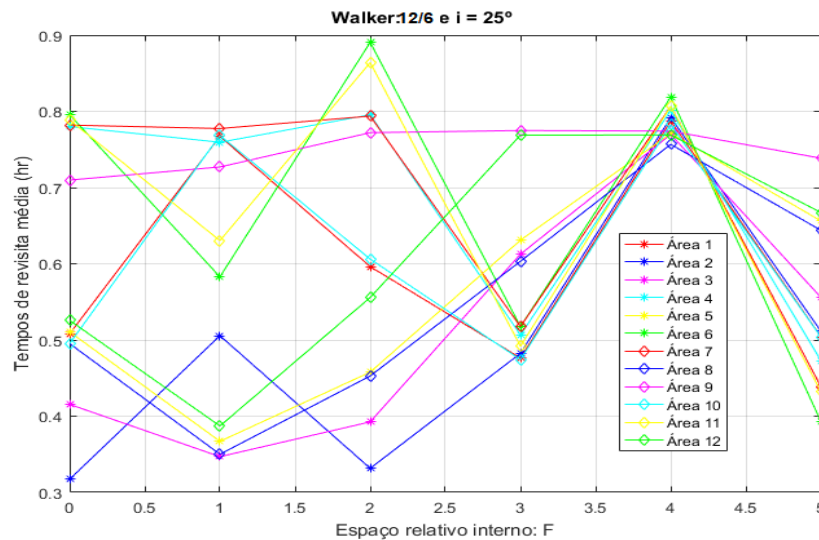
Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	12
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	6
Altitude	800 km
Inclinação da órbita	25°
Ascensão reta do nodo ascendente	45°



(a) Tempo de revisita máximo por área



(b) Tempo de revisita mínimo por área



(c) Tempo de revisita médio por área

FIGURA 4.13 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação de  $F$ .

## 4.2 Percentuais de tempo de Acesso

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações da figura de mérito de percentual de tempo de acesso para constelações do tipo *Walker*.

### 4.2.1 Variação da altitude

Mais uma vez, inicia-se o estudo da figura de mérito dos percentuais de tempo de acesso, fazendo alterações no valor da altitude da constelação de *Walker* escolhida. Para isso, são fixados os dados apresentados na Tabela 4.10.

TABELA 4.10 – Dados da constelação *Walker* usada na análise da influência das altitudes nos percentuais de cobertura.

Parâmetro	Valor
Total de Satélites ( $T$ )	6
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Inclinação da órbita	45 <sup>o</sup>
Ascensão reta do nodo ascendente	45 <sup>o</sup>

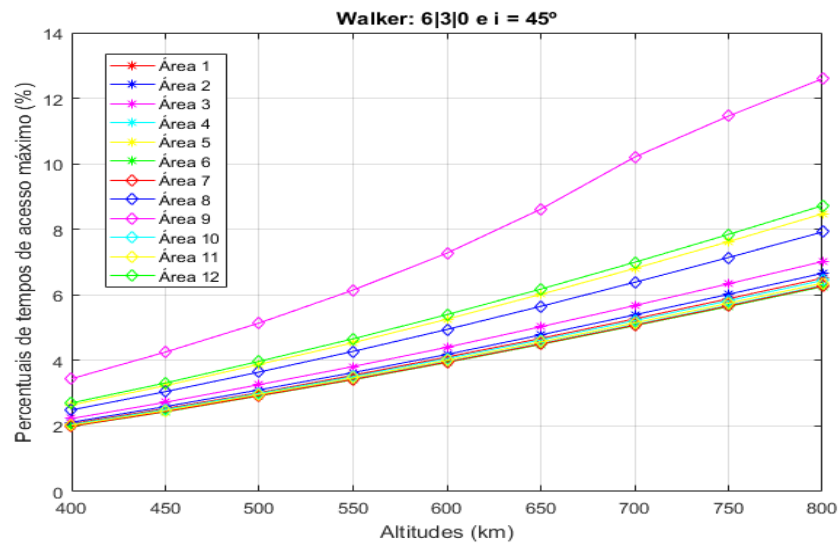
Desta forma, com a utilização dos softwares MATLAB<sup>®</sup> e STK<sup>®</sup> é possível obter as Figuras 4.14 (a, b, c) que apresentam os resultados dos percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio, respectivamente. Conforme realizado anteriormente, com 400 km e indo até 800 km de altitude, percebendo-se um aumento linear dos percentuais com o aumento das altitudes.

As Figuras 4.15 (a, b) mostram a variação dos percentuais de tempo de acesso por áreas da fronteira brasileira, com altitudes de 400 km e 800 km, respectivamente. Ademais, buscando-se comprovar o comportamento linear da curva de tempo de revisita pela altitude, é utilizada a função *Curve Fitting Tool* do software MATLAB<sup>®</sup> para gerar a curva dos percentuais de tempo de acesso média das 12 áreas pela altitude. O resultado obtido é o apresentado na Figura 4.16, com os dados obtidos da regressão linear apresentados na Tabela 4.11.

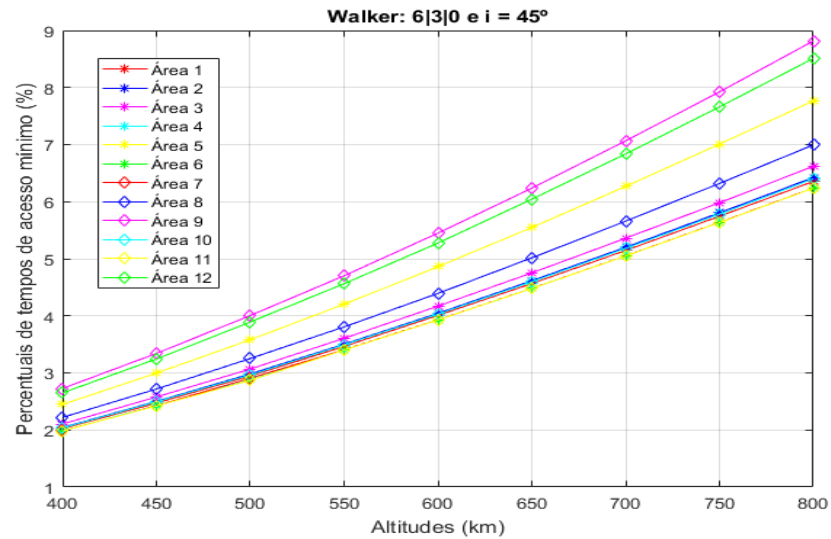
TABELA 4.11 – Dados da regressão linear da análise da influência das altitudes nos percentuais de tempo de acesso médios.

Parâmetro	Valor
$f(x)$	$-0,01226x - 2,808$
$r^2$	0,9971

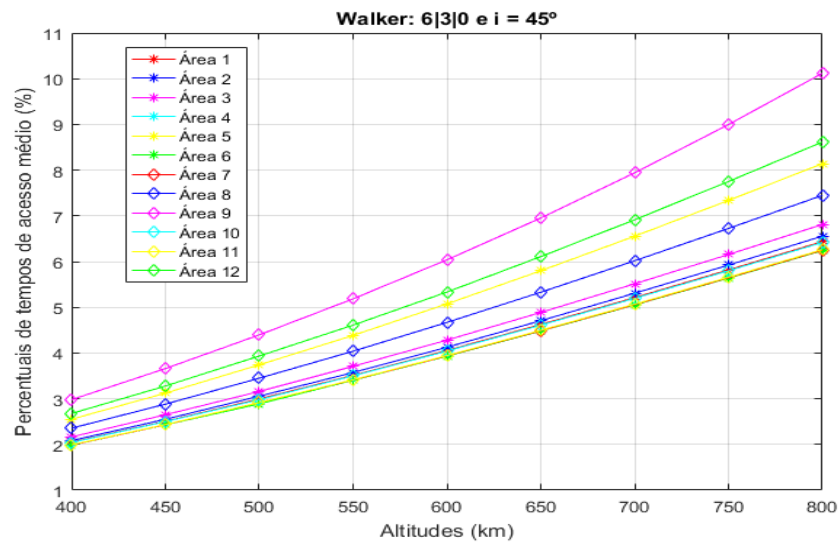
Com base nos resultados apresentados, verifica-se a tendência linear do aumento do percentual de tempo de acesso com o aumento da altitude. Esse aumento é esperado já que o aumento da altitude permite um aumento do campo de visão do satélite.



(a) Percentual de tempo de acesso máximo por área

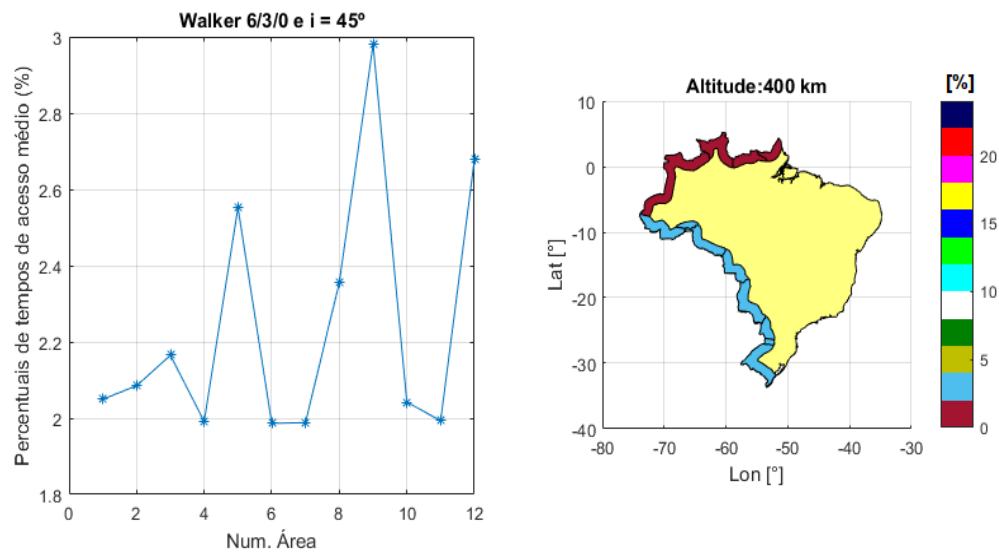


(b) Percentual de tempo de acesso mínimo por área

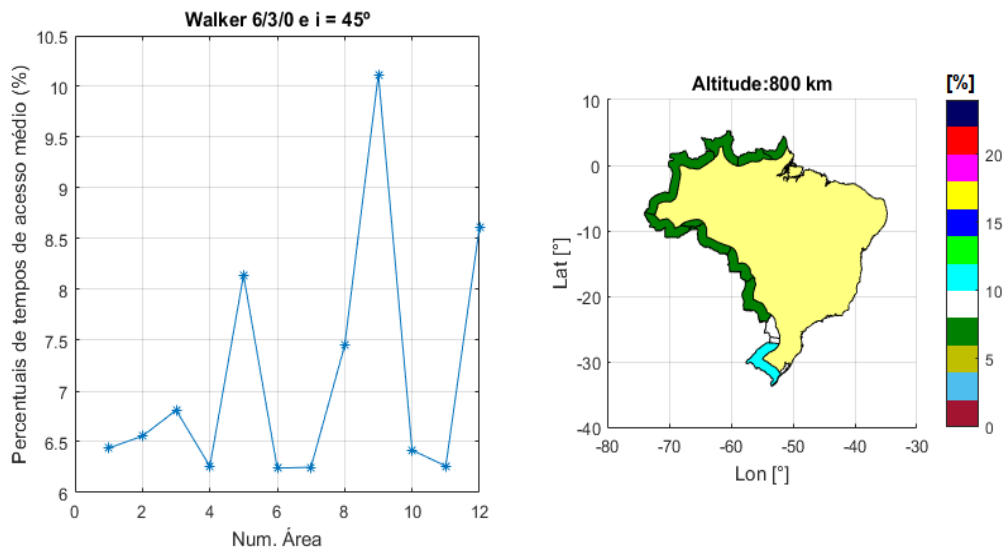


(c) Percentual de tempo de acesso médio por área

FIGURA 4.14 – Percentual de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação da altitude.



(a) Percentual de tempo de acesso por área da fronteira para 400 km de altitude



(b) Percentual de tempo de acesso por área da fronteira para 800 km de altitude

FIGURA 4.15 – Percentual de tempo de acesso médias em cores, com legenda de cores em %.

### 4.2.2 Variação da Inclinação

Assim como foi feito para o estudo dos tempos de revisita médio, o segundo parâmetro a ser avaliado são as inclinações das órbitas. Neste sentido, são utilizados os dados apresentados na Tabela 4.12 que são considerados fixos nesse estudo.

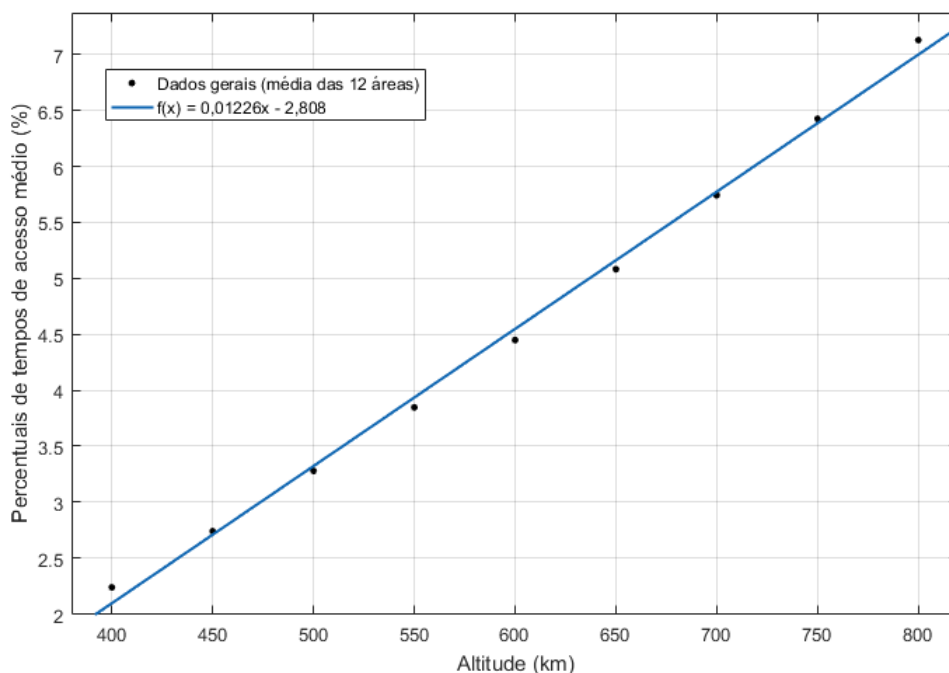


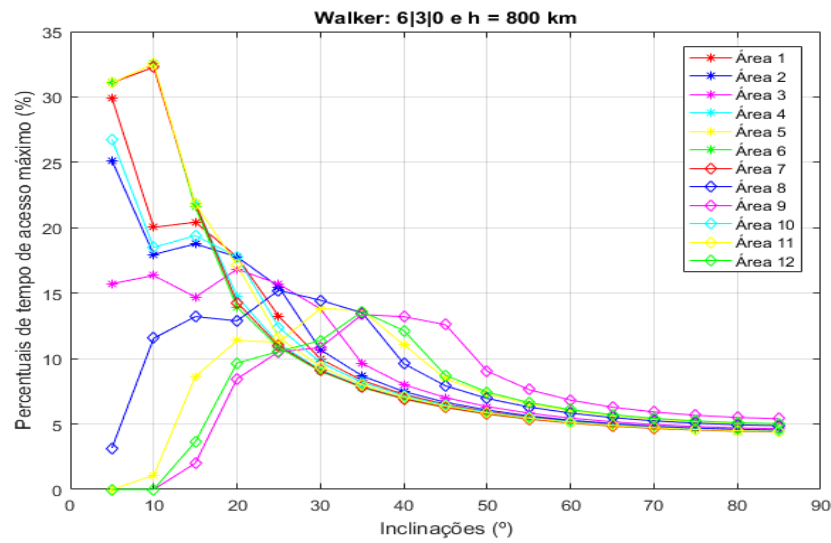
FIGURA 4.16 – Percentuais de tempo de acesso média das 12 áreas pela altitude.  $r^2 = 0,9971$ .

TABELA 4.12 – Dados da constelação *Walker* usada na análise das inclinações nos percentuais de tempo de acesso

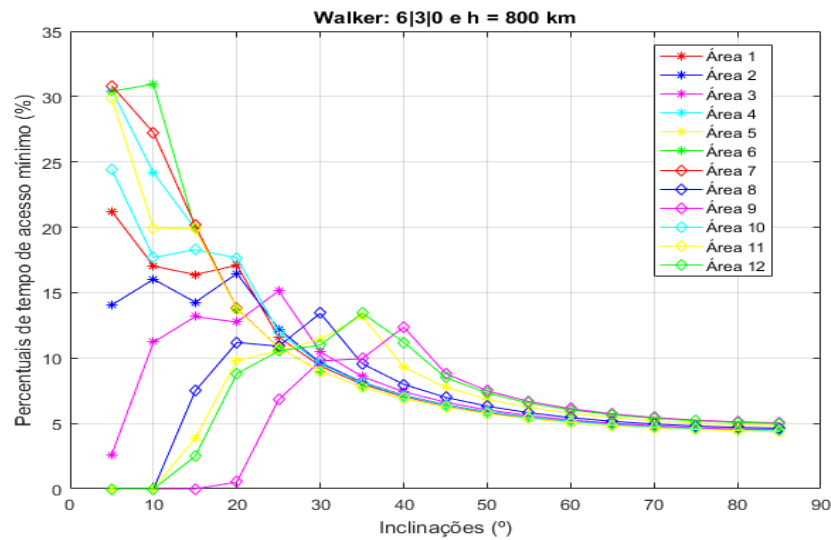
Parâmetro	Valor
Total de Satélites ( $T$ )	6
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Ascensão reta do nodo ascendente	$45^\circ$

Deste modo, variam-se as inclinações de  $5^\circ$  em  $5^\circ$ , partindo de  $5^\circ$  até  $85^\circ$ , obtendo-se as Figuras 4.17 (a, b, c) com os percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio, respectivamente. Tal procedimento foi realizado, mais uma vez, com o uso dos softwares MATLAB® e STK®.

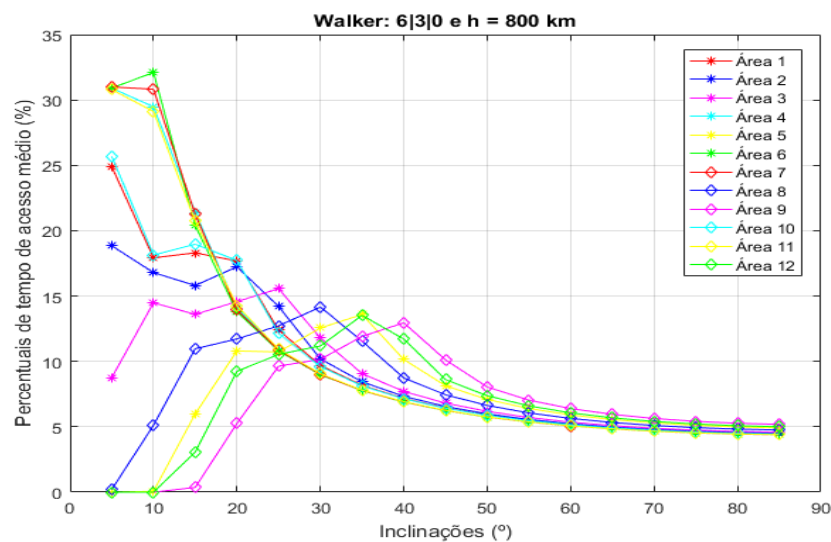
Os resultados apresentados permitem verificar que para valores mais elevados de inclinação (acima de  $50^\circ$ ), os percentuais de cobertura tendem a se uniformizar e a não variar muito, mantendo-se em valores percentuais próximos a 5%. Verificamos ainda que os maiores percentuais de cobertura ocorrem para as áreas próximas à linha do equador com altitudes mais baixas, como  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  e  $15^\circ$ , muito embora as regiões do Sul do país não sejam completamente cobertas nessas inclinações.



(a) Percentual de tempo de acesso máximo por área



(b) Percentual de tempo de acesso mínimo por área



(c) Percentual de tempo de acesso médio por área

FIGURA 4.17 – Percentual de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação das inclinações.



Não obstante, foi gerada uma curva dos percentuais de tempo de acesso médio para as 12 áreas e, ao se excluir os pontos gerados pelas três primeiras inclinações que não apresentaram cobertura total, gerou-se uma regressão linear com um comportamento exponencial, conforme apresentado na Figura 4.18, com os dados da regressão linear apresentados na Tabela 4.13. Com base nos resultados apresentados, verifica-se que inclinações de até cerca de 35° conseguem gerar percentuais de acesso médio para todas as áreas entre 10% e 15%, muito embora valores de 15° e 20° apresentam áreas com valores mais baixos de percentual de acesso, em específico as áreas 9 (Rio Grande do Sul) e 12 (Paraná).

TABELA 4.13 – Dados da regressão linear da análise da influência das inclinações nos percentuais de acesso médio.

Parâmetro	Valor
$f(x)$	$22,5e^{-0,02638x} + 0,07667e^{0,0402x}$
$r^2$	0,9969

Sendo assim, destaca-se que em termos de percentuais de acesso, os valores de inclinações mais interessantes para o problema proposto são de 25°, 30° e 35°. Contudo, 25° é valor que gera os resultados mais interessantes para o tempo de revisita, logo, por satisfazer as condições das figuras de mérito analisadas, essa inclinação é a mais indicada para o estudo deste tipo de problema de monitoramento com constelações de *Walker*.

Por fim, as Figuras 4.19 (a, b) apresentam graficamente os resultados dos percentuais de acesso para as inclinações de 5° e 25°, respectivamente. Verifica-se que para 5° a região Sul não é coberta, mas o é com  $i = 25^\circ$ .

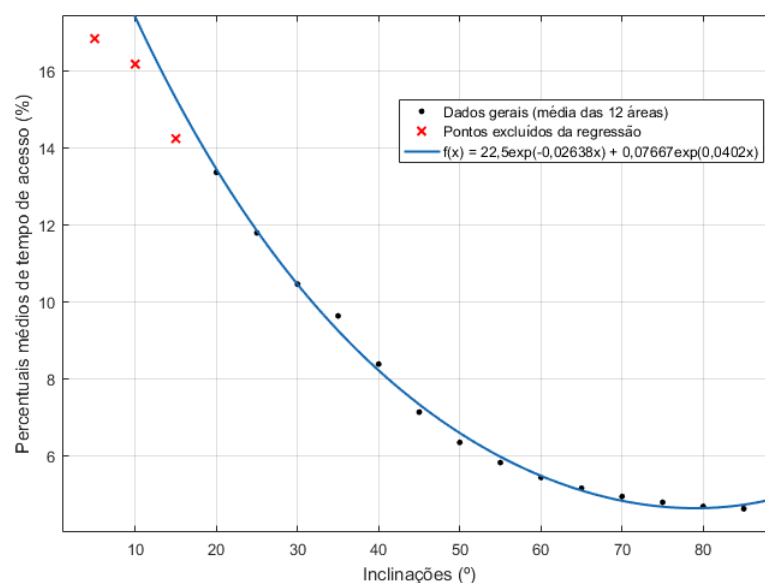
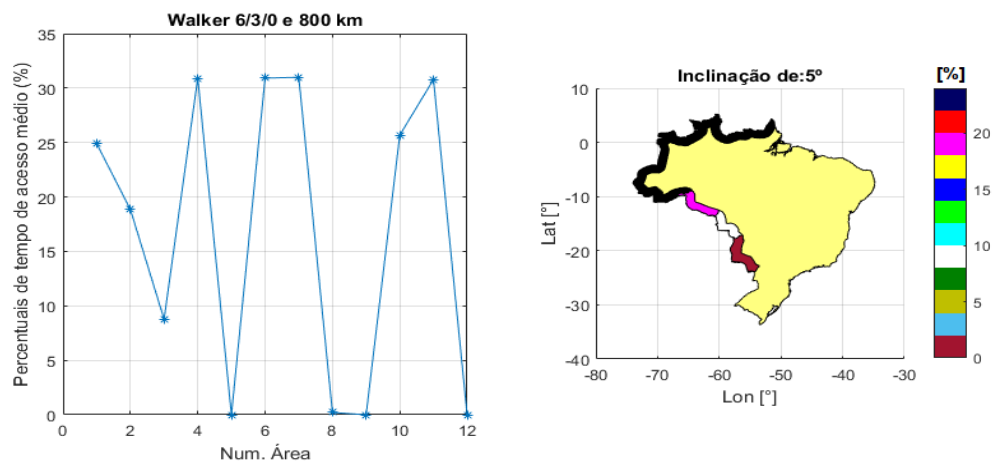
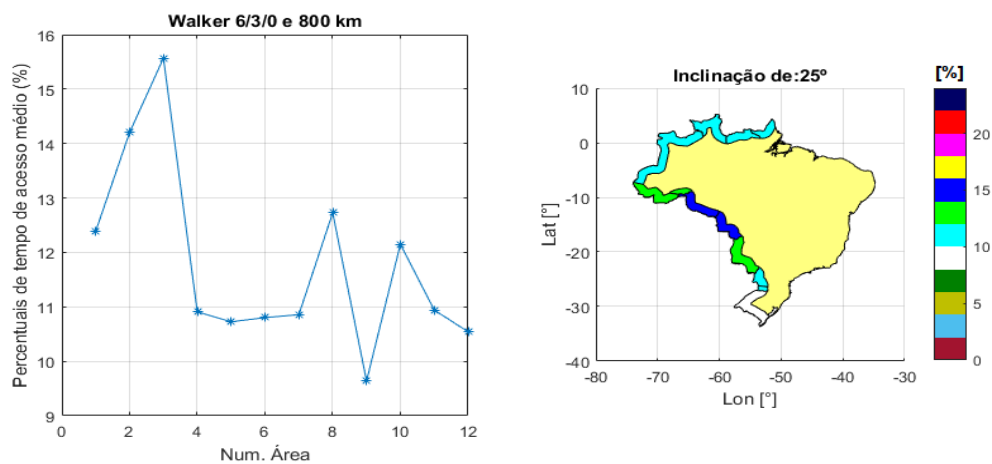


FIGURA 4.18 – Percentual de tempo de acesso médio das 12 áreas pela inclinação.  $r^2 = 0,9969$ .



(a) Percentual de tempo de acesso por área da fronteira para 5° de inclinação.



(b) Percentual de tempo de acesso por área da fronteira para 25° de inclinação.

FIGURA 4.19 – Percentuais de tempo de acesso médios em cores, com legenda de cores em %.

### 4.2.3 Variação do total de satélites

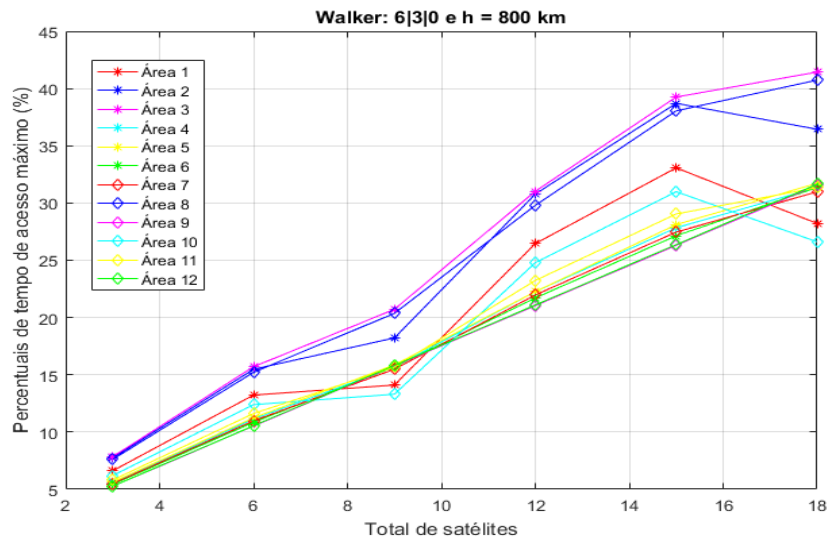
Conforme feito no estudo dos tempos de revisita, são adotados 3 planos orbitais, variando-se de 3 em 3 satélites (sempre aumentando 1 em cada plano), partindo de 3 satélites (1 em cada plano) e chegando em 18 satélites (6 em cada plano) para o estudo da influência da variação do total de satélites nos percentuais de acesso. Os demais parâmetros são fixados conforme apresentados na Tabela 4.14.

TABELA 4.14 – Dados da constelação *Walker* usada na análise do total de satélites

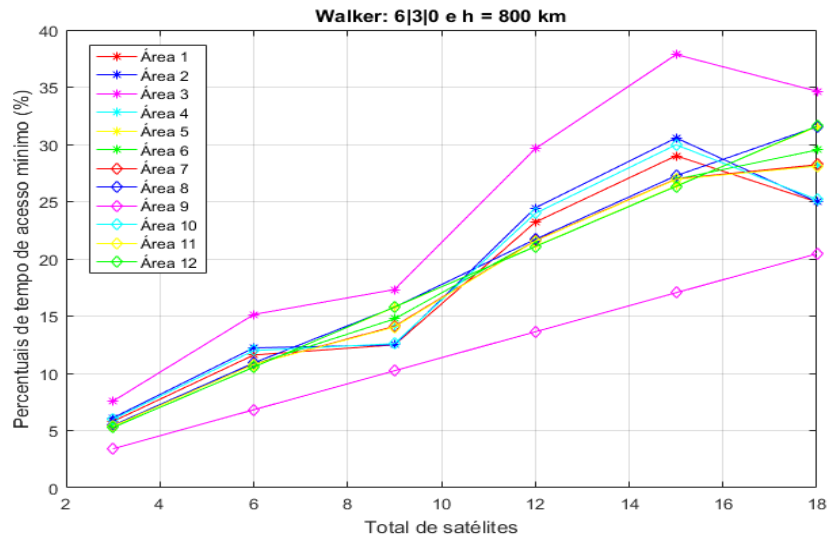
Parâmetro	Valor
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Inclinação da órbita	25°
Ascensão reta do nodo ascendente	45°

Desta forma, é obtida a Figura 4.20 (a, b, c) com os percentuais de acesso máximo, mínimo e médio. Não obstante, a Figura 4.21 (a, b) mostra representações gráficas da fronteira terrestre brasileira, com 6 e 18 satélites, alterando-se as cores conforme os tempo de acesso em cada região. Convém ressaltar que, excluindo-se o ponto de 15 satélites, temos uma tendência quase exponencial, ou de soma de curvas exponenciais, do comportamento do aumento dos percentuais de acesso com o aumento do número de satélites.

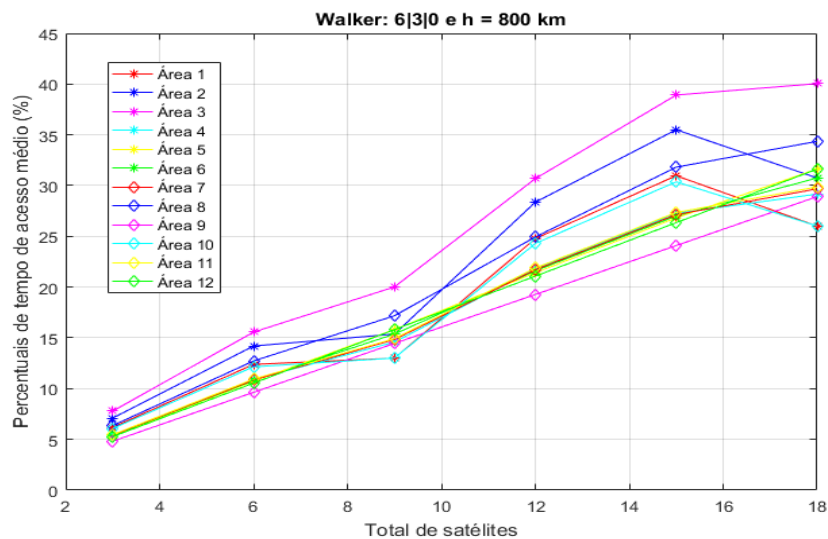
Verifica-se que os percentuais de tempo de acesso médios são, no geral, muito próximos para todas as 12 áreas, o que indica que o parâmetro inclinação é mais determinante para a uniformidade dos percentuais. Entretanto, pode-se perceber ainda que o aumento do número de satélites proporciona um aumento significativo dos valores numéricos dessa figura de mérito, com uma variação relativa média para as 12 áreas de 50% quando varia-se de 3 para 6 satélites e de 25% ao variar de 6 para 9 satélites. Por fim, uma escolha de 6 satélites já permite um percentual médio acima de 10% (se a inclinação é mantida em 25° e a altitude em 800 km) e para 9 artefatos esse valor chega a quase 20%, superando os 30% para 18 satélites.



(a) Percentual de tempo de acesso máximo por área

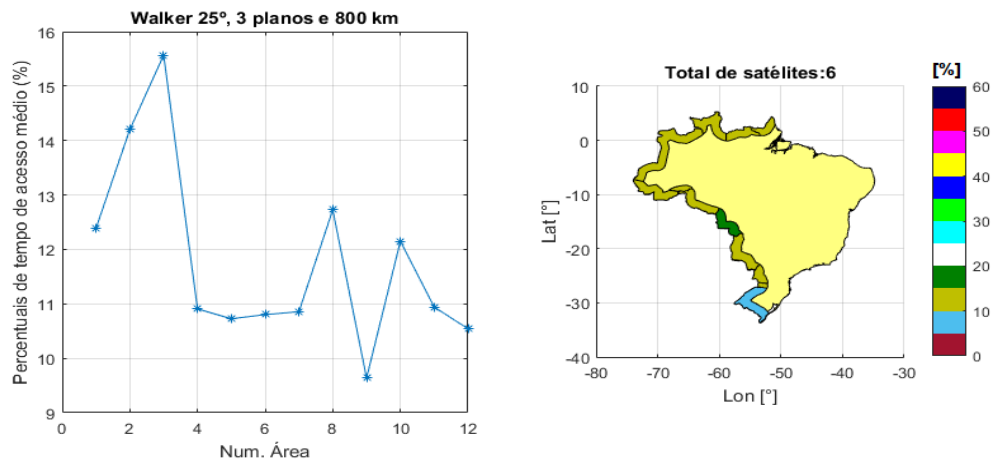


(b) Percentual de tempo de acesso por área

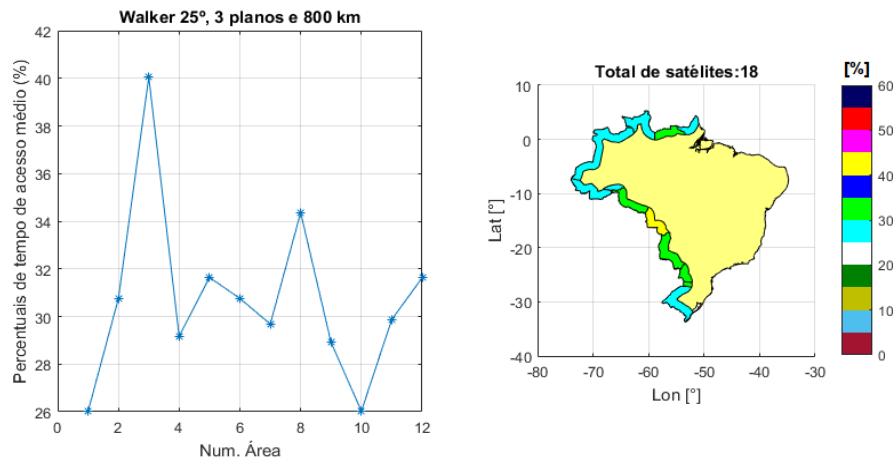


(c) Percentual de tempo de acesso médio por área

FIGURA 4.20 – Percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação do total de satélites.



(a) Percentuais de acesso por área da fronteira para 6 satélites.



(b) Percentuais de acesso por área da fronteira para 18 satélites.

FIGURA 4.21 – Percentuais de acesso médios em cores, com legenda de cores em %.

#### 4.2.4 Variação do número de planos

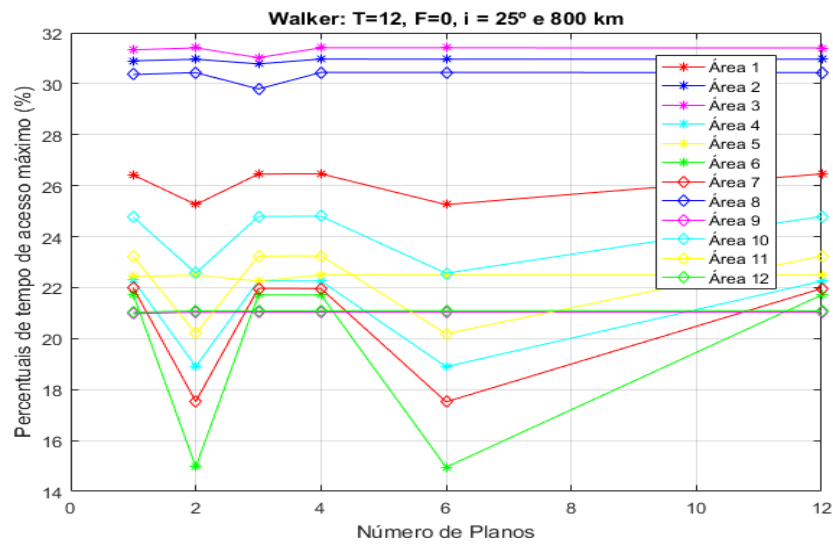
Seguindo o estudo da influência dos parâmetros orbitais da constelação *Walker*, realiza-se a variação do número de planos. Para isso, consideram-se os dados apresentados na Tabela 4.15, na qual observa-se um número de 12 satélites, permitindo-se uma variação de 6 planos orbitais para que sejam mantidos os números de satélites por plano, ou seja, foram considerados 1, 2, 3, 4, 6 e 12 planos orbitais.

TABELA 4.15 – Dados da constelação *Walker* usada na análise do número de planos ( $P$ ) para o percentual de acesso

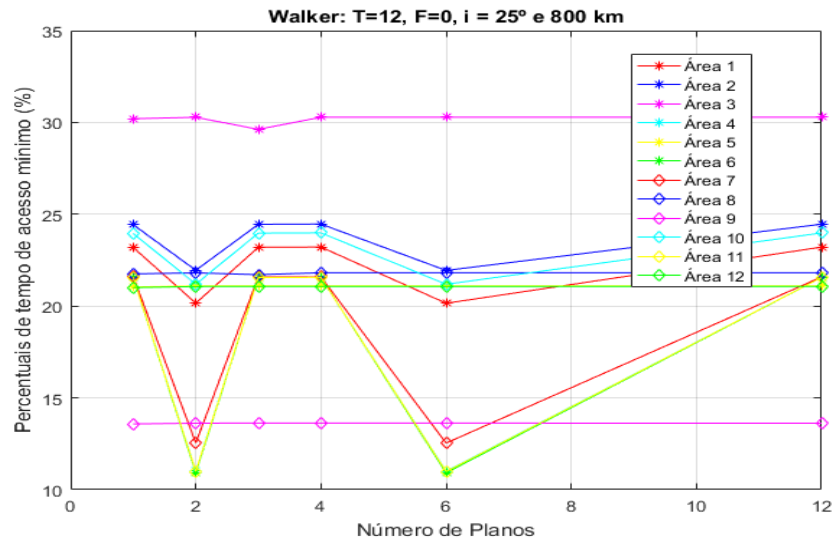
Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	12
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Inclinação da órbita	25°
Ascensão reta do nodo ascendente	45°

Deste modo, obtém-se as Figuras 4.22 (a, b, c) com os percentuais de acesso máximo, mínimo e médio, respectivamente. Além disso, a Figura 4.23 representa a média das 12 áreas para cada número de plano orbital. Percebe-se valores muito próximos em todos os casos de números de planos, exceto para as áreas 4 (Roraima), 6 (Pará), 7 (Amapá) e 11 (Amazônia), ou seja, a região Norte do país mais próxima à linha do equador. Isso indica que em determinados números de planos orbitais não é possível ocorrer uma cobertura mais extensiva e que, possivelmente, os satélites não apresentam um acesso razoável às áreas supracitadas.

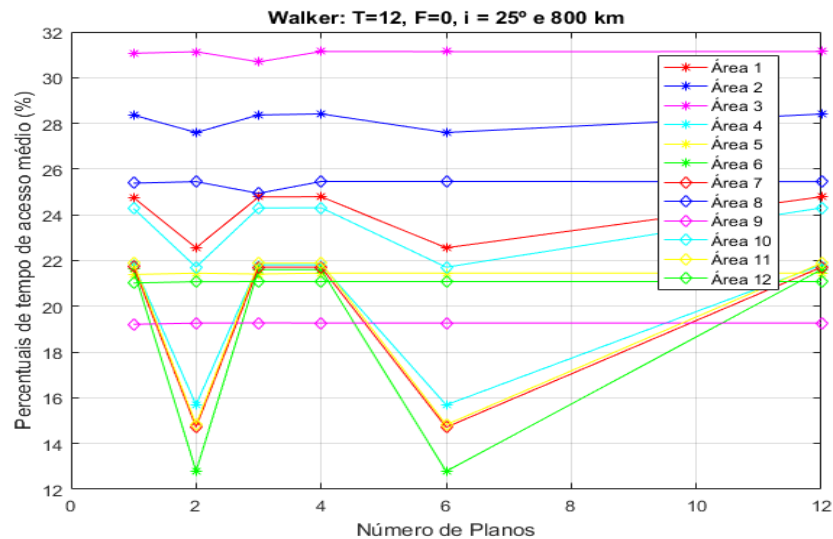
Para se verificar graficamente os resultados encontrados, são geradas as Figuras 4.24 (a e b) com a representação gráfica para 3 e 6 satélites, respectivamente. Observa-se que a distribuição dos satélites nos planos orbitais realmente ocasionam resultados de mudança de percentuais de acesso para as 12 áreas escolhidas no estudo.



(a) Percentual de tempo de acesso máximo por área



(b) Percentual de tempo de acesso mínimo por área



(c) Percentual de tempo de acesso médio por área

FIGURA 4.22 – Percentual de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação do número de planos.

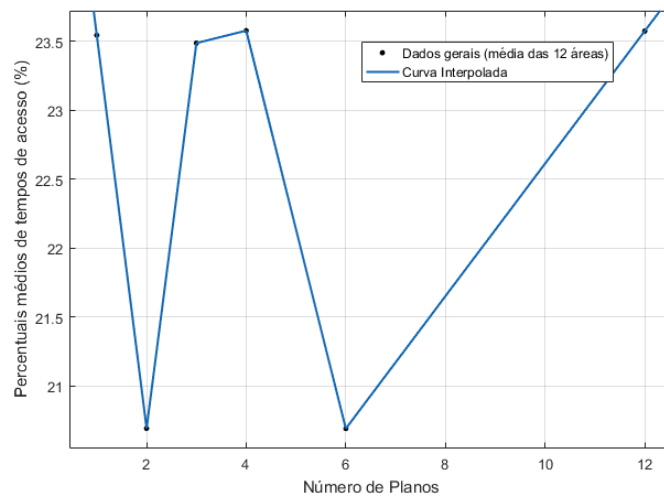
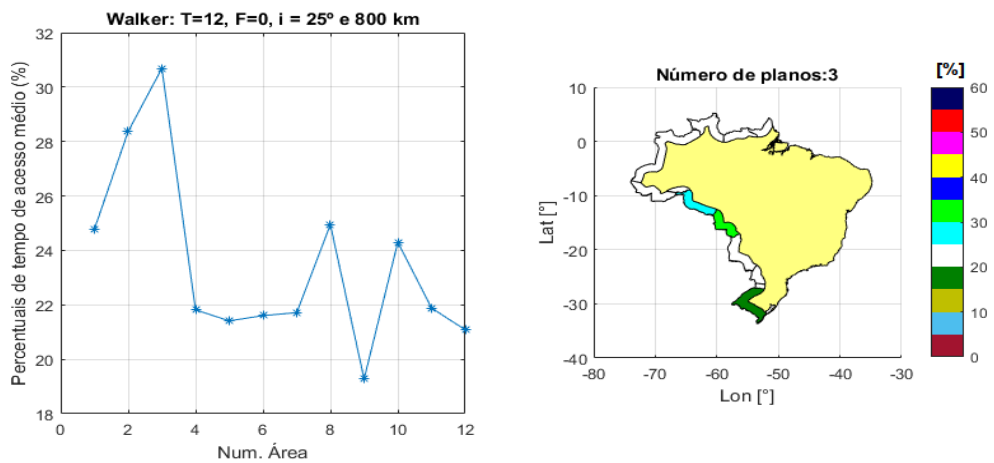
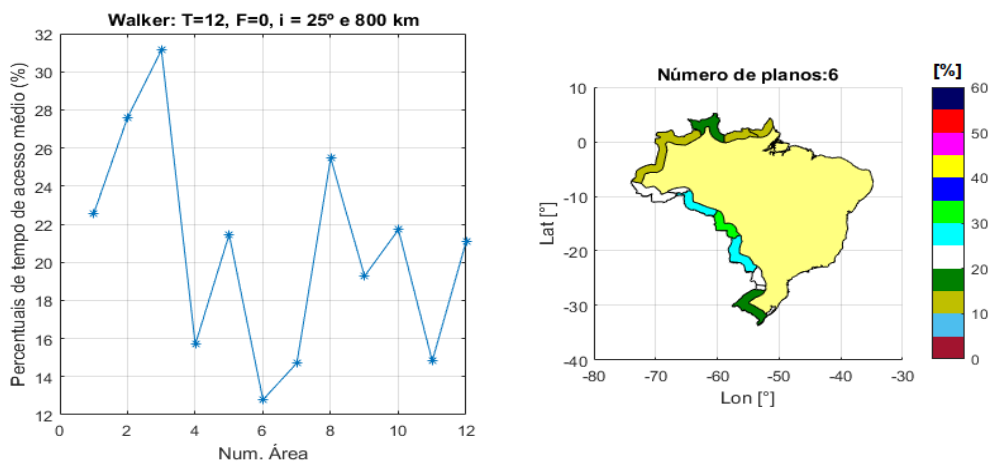


FIGURA 4.23 – Percentual de tempo de acesso médio das 12 áreas pelo número de planos.



(a) Percentual de tempo de acesso médio por área da fronteira para 3 planos orbitais.



(b) Percentual de tempo de acesso médio por área da fronteira para 6 planos orbitais.

FIGURA 4.24 – Percentual de tempo de acesso médios em cores, com legenda de cores em %.



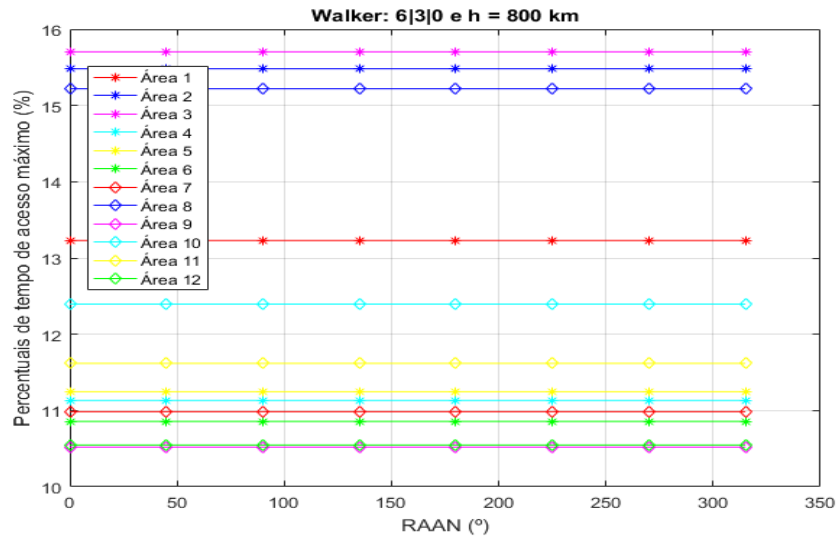
### 4.2.5 Variação da ascensão reta do nodo ascendente (RAAN)

Seguindo o mesmo procedimento adotado anteriormente, o próximo parâmetro estudado para entender sua interferência no comportamento dos percentuais de cobertura é a ascensão reta do nodo ascendente. Utiliza-se os dados apresentados na Tabela 4.16 como fixos nas simulações.

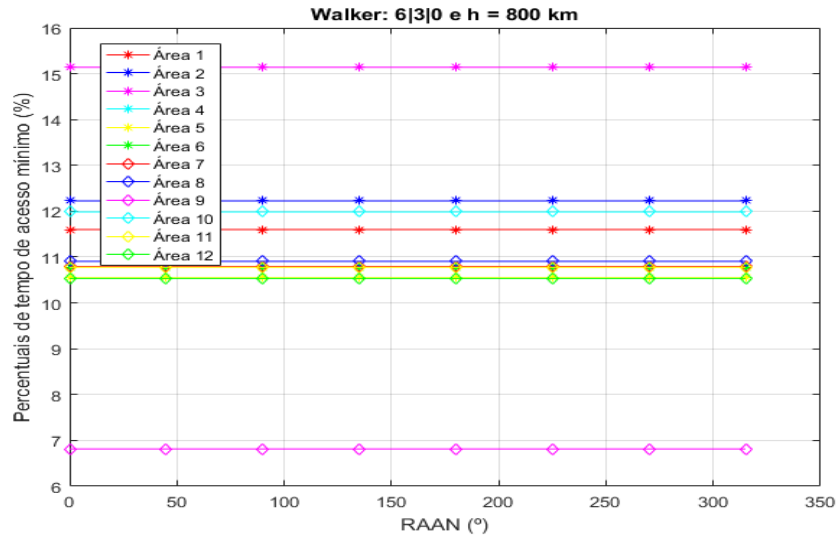
TABELA 4.16 – Dados da constelação *Walker* usada na análise da RAAN e sua influência no percentual de acesso.

Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	6
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Inclinação da órbita	$25^{\circ}$

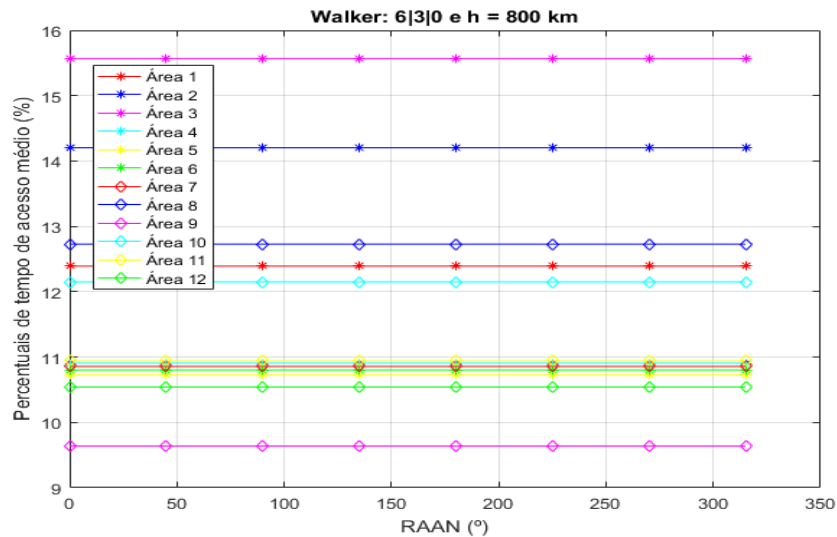
Foi obtida a Figura 4.25 com o percentual de tempo de acesso máximo, mínimo e médio. Os valores da RAAN foram alterados a partir de  $0^{\circ}$  até  $315^{\circ}$ , de  $45^{\circ}$  em  $45^{\circ}$ . Mais uma vez os resultados encontrados foram invariáveis com os valores de RAAN, ou seja, não temos mudanças significativas nos percentuais de cobertura. Logo, a escolha deste parâmetro é indiferente para o resultado final da simulação.



(a) Percentual de tempo em cobertura máximo por área



(b) Percentual de tempo em cobertura mínimo por área



(c) Percentual de tempo em cobertura médio por área

FIGURA 4.25 – Percentual de tempo em cobertura máximo, mínimo e médio com variação do RAAN.

### 4.2.6 Variação do espaçamento relativo ( $F$ )

Por fim, varia-se o espaçamento interno  $F$  com os dados fixados na Tabela 4.17 para a simulação, variando-se  $F$  de 0 a 5. Com os dados apresentados é gerada a Figura 4.26, mais uma vez com os valores de percentuais de tempo em cobertura máximo, mínimo e médio, respectivamente.

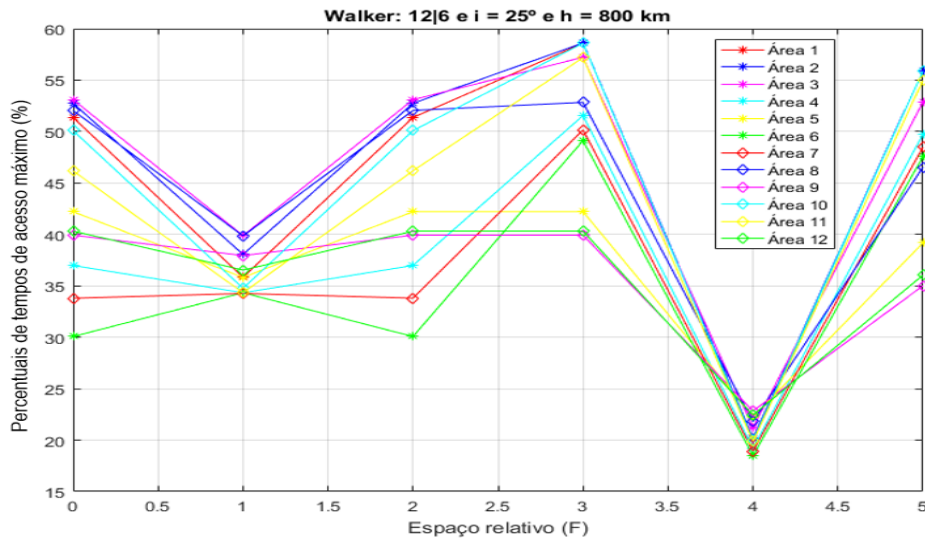
TABELA 4.17 – Dados da constelação *Walker* usada na análise do espaçamento relativo  $F$  dos percentuais de tempo de acesso.

Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	12
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	6
Altitude	800 km
Inclinação da órbita	$25^{\circ}$
Ascensão reta do nodo ascendente	$45^{\circ}$

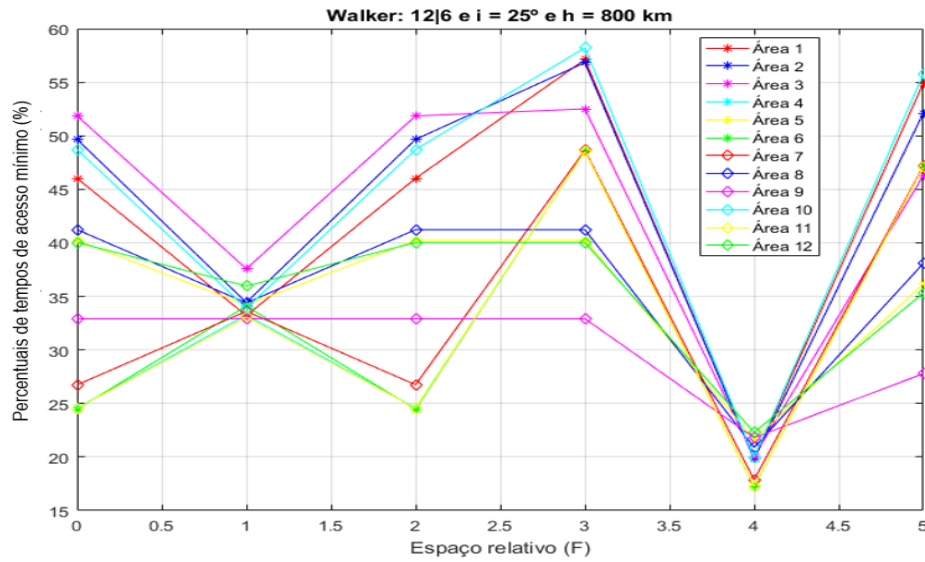
Não obstante, a fim de analisar as médias para as 12 áreas, é gerada a Figura 4.27, permitindo verificar que os menores valores médios de percentuais de acesso ocorrem para  $F = 4$ . Contudo, também pode ser inferido que não existe um padrão claro para a influência deste parâmetro no estudo em questão, já que existe apenas 1 ponto completamente destoante em média dos demais.

Nota-se ainda que a maior diferença encontrada entre os percentuais de acesso ocorrem para  $F = 3$  (com maiores valores médios) e  $F = 4$  (com menores valores médios). Sendo assim, é apresentada na Figura 4.28 uma visão gráfica de como estão distribuídos os percentuais de acesso por área.

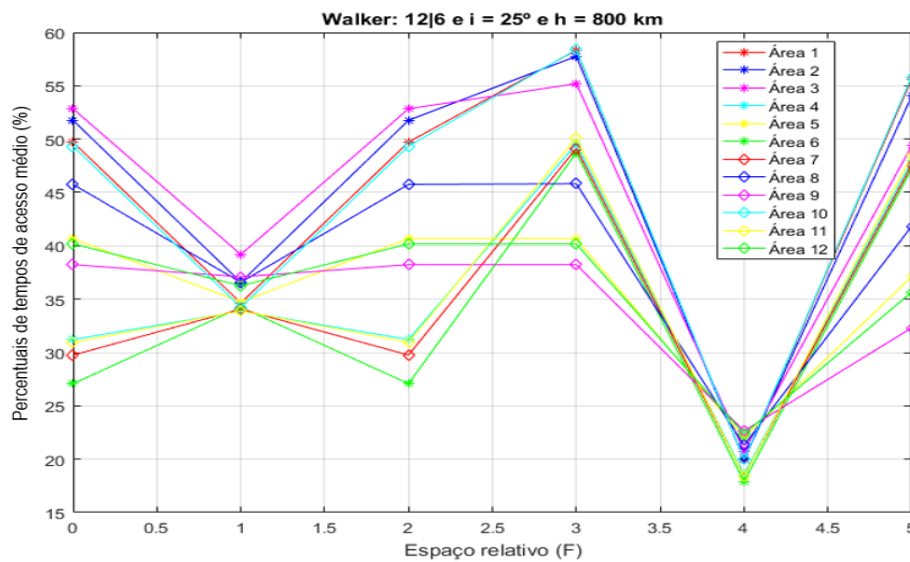
Esses resultados nos permitem identificar que, mais uma vez, a região com menores valores de percentuais de revisita são as mais próximas à linha do equador, justamente por ser essa uma característica da inclinação de  $25^{\circ}$  escolhida para a realização das simulações.



(a) Percentual de tempo de acesso máximo por área



(b) Percentual de tempo de acesso mínimo por área



(c) Percentual de tempo de acesso médio por área

FIGURA 4.26 – Percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação de  $F$ .

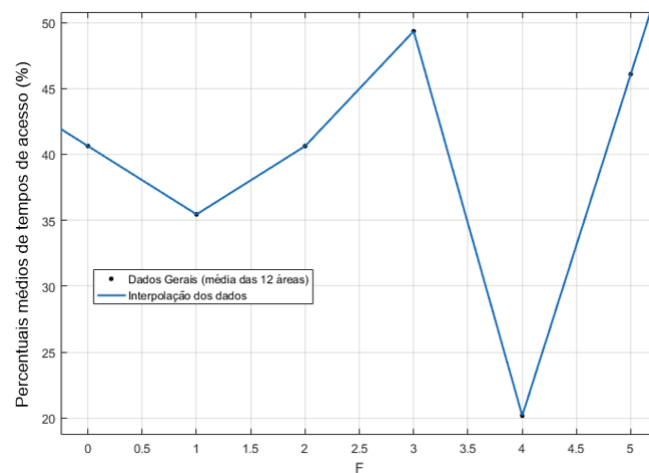
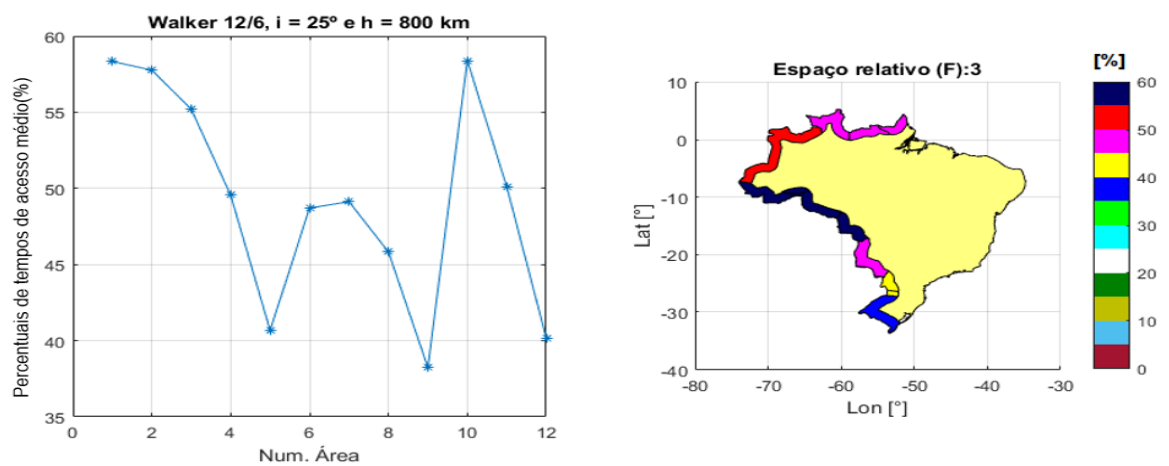
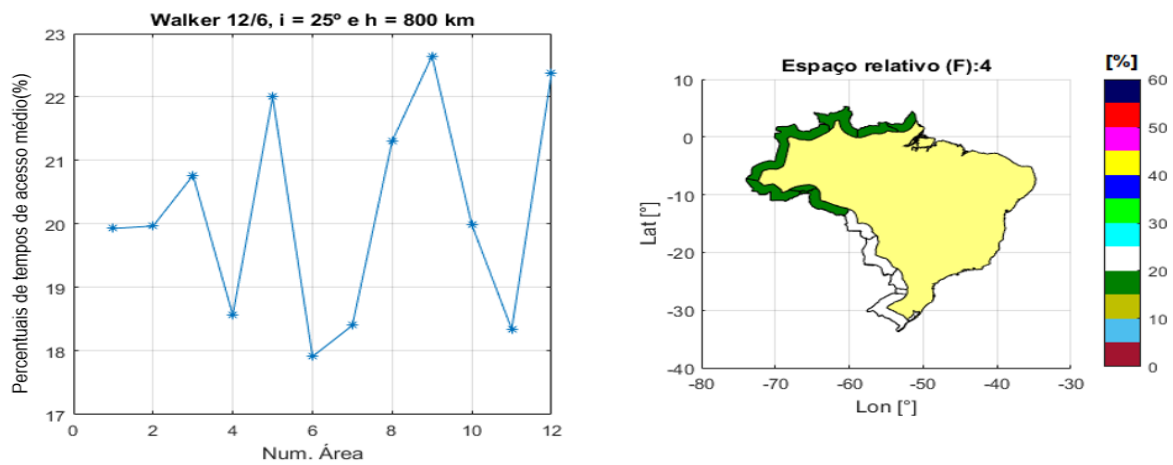


FIGURA 4.27 – Percentual de tempo de acesso médio das 12 áreas pelo espaçamento relativo.



(a) Percentual de acesso médio por área da fronteira para  $F = 3$ .



(b) Percentual de acesso médio por área da fronteira para  $F = 4$ .

FIGURA 4.28 – Percentuais de acessos médios em cores, com legenda de cores em %.

### 4.3 Discussões

Inicialmente, com base nos resultados apresentados a respeito dos tempos de revisita, pode-se entender que constelações com altitude de 800 km,  $25^\circ$  de inclinação e com RAAN indiferente (já que este parâmetro não apresenta influência nos resultados) são as mais interessantes no contexto da obtenção das melhores soluções-compromisso para o tempo de revisita da fronteira terrestre brasileira. A altitude de 800 km deriva do fato do tempo de revisita diminuir com o aumento da altitude, enquanto que a inclinação de  $25^\circ$  escolhida está diretamente relacionada com uma cobertura total de todas as regiões da fronteira, no menor tempo de revisita e com a maior uniformidade ao longo dos limites terrestres do país possível.

Deste modo, a fim de complementar a análise do total de satélites e número de planos que podem ser utilizados nessa missão, obtém-se um gráfico que resume essas informações, apresentando na Figura 4.29, que possuem as características ótimas pré-estabelecidas ( $h = 800$  km,  $i = 25^\circ$ , RAAN =  $0^\circ$  e com  $F = 0$ ). O valor do espaçamento relativo foi fixado já que sua influência nos tempos de revisita é menos significativa que a da variação do total de satélites e do número de planos.

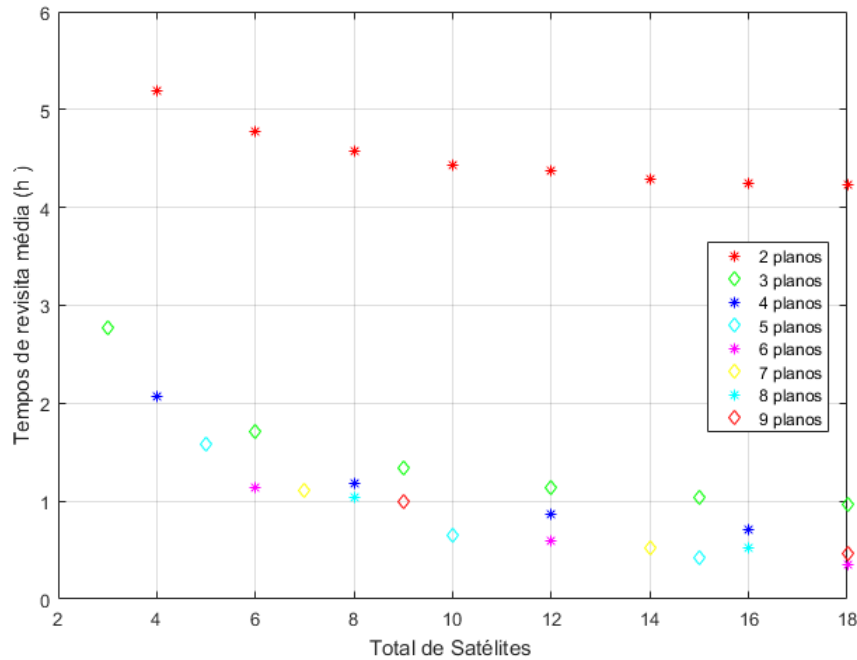


FIGURA 4.29 – Revisita média em horas para toda a fronteira pelo número de satélites para constelação *Walker*.

Sendo assim, observamos que o tempo de revisita inferior ou igual a 2 horas (conforme adotado nas hipóteses) é obtido a partir de 6 satélites, com um número sempre superior a 2 planos, ou seja, com 3 ou 6 planos.

Não obstante, para o percentual de acesso, os resultados encontrados também são mais interessantes para uma maior altitude (sendo adotada, mais uma vez, 800 km), além de uma inclinação de  $25^\circ$ , já que apresentam dados mais uniformes e com maior percentual de cobertura, estando de acordo com o resultado dos tempos de revisita, além da RAAN ser, mais uma vez, indiferente.

Deste modo, considerando  $h = 800$  km,  $i = 25^\circ$ , RAAN =  $0^\circ$  e com  $F = 0$ , é gerada a Figura 4.30 com a complementação da análise da influência do número de satélites e de planos na variação do percentual de tempo de acesso.

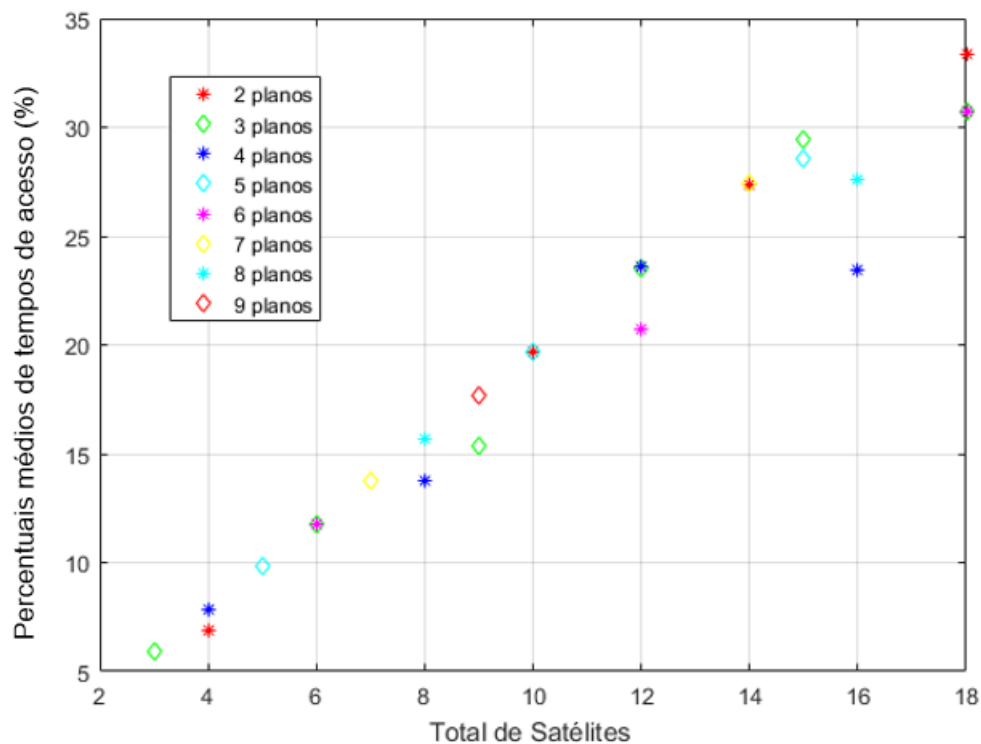


FIGURA 4.30 – Percentual de acesso médio (em %) para toda a fronteira pelo número de satélites para constelação *Walker*.

Observa-se que o valor adotado por hipótese de 5% do tempo de acesso é atingido em todos os casos, com o dobro desse valor numérico (ou seja, 10%) sendo atingido a partir do uso de 6 satélites com o uso de pelo menos 2 planos orbitais. Sendo assim, a combinação dos resultados encontrados permitem a formulação da Tabela 4.18 com os dados gerais com as possíveis soluções capazes de realizar a missão com as restrições consideradas nas hipóteses iniciais desse estudo.

TABELA 4.18 – Dados do conjunto solução geral para o tempo de revisita para a constelação de *Walker*.

Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	6 a 18
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	Acima de 2
Espaço relativo interno ( $F$ )	Qualquer valor
Altitude	800 km
Inclinação da órbita	$25^\circ$
Ascensão reta do nodo ascendente	$[0^\circ, 360^\circ)$

Contudo, a fim de se restringir ainda mais os resultados para a indicação de um conjunto de solução mais restrito, deve-se entender que a variável total de satélites interfere de forma significativa no preço de um lançamento, bem como o número de planos (WERTZ, 2001). Além disso, o número de possíveis soluções foram restringidas para apenas duas, obtendo finalmente a Tabela 4.19, com as soluções possíveis ao se considerar uma menor quantidade de satélites e de planos na constelação, limitando a apenas 6 e 8 satélites ao todo.

TABELA 4.19 – Dados do conjunto solução específico para o tempo de revisita para a constelação de *Walker*.

Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	6 / 8
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3 / 4
Espaçamento relativo ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Inclinação da órbita	$25^\circ$
Ascensão reta do nodo ascendente	$[0^\circ, 360^\circ)$

Por fim, os resultados médios encontrados nessas constelações de 6 e 8 satélites para um espaçamento relativo igual a 0 (lembrando que alterá-lo altera os resultados, mas com ele nulo já é suficiente para cumprir as hipóteses) são os apresentados na Tabela 4.20.

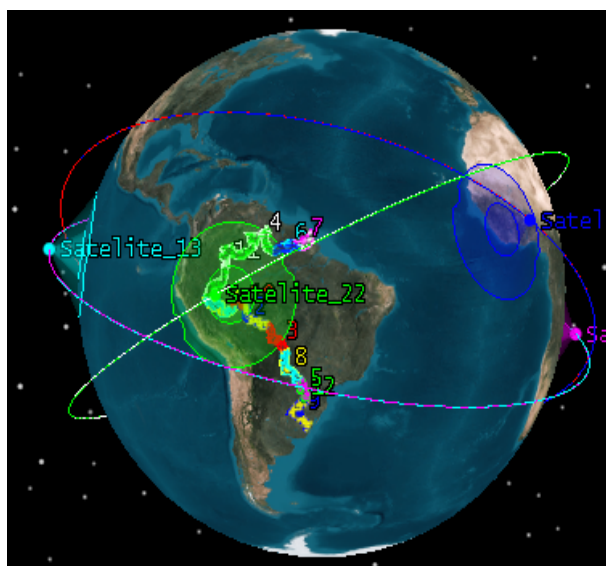
TABELA 4.20 – Valores das figuras de mérito (média para as 12 áreas) para o conjunto solução para as constelações *Walker*.

Fig. de Mérito	Tempo de revisita	Percentual de tempo de Acesso
<b><math>25^\circ:6 3 0</math></b>	1 hora 43 min e 5 seg	11,79% - 2,83 horas/dia
<b><math>25^\circ:8 4 0</math></b>	1 hora 11 min e 8 seg	13,79 % - 3,31 horas/dia

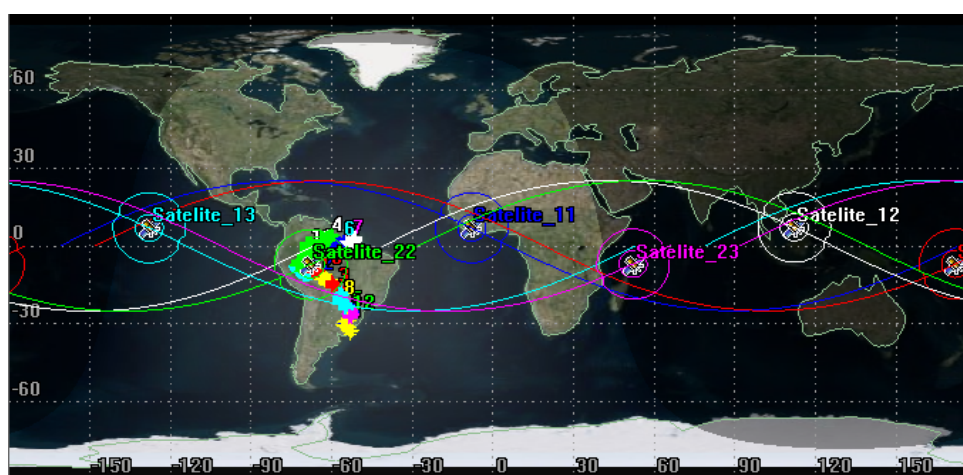
Finalmente, as representações das órbitas tridimensionais e do traçado na Terra (*ground*



*track*) para as constelações *Walker* do conjunto solução do problema de monitoramento da fronteira terrestre são apresentados nas Figuras 4.31 (a, b) e 4.32 (a, b).

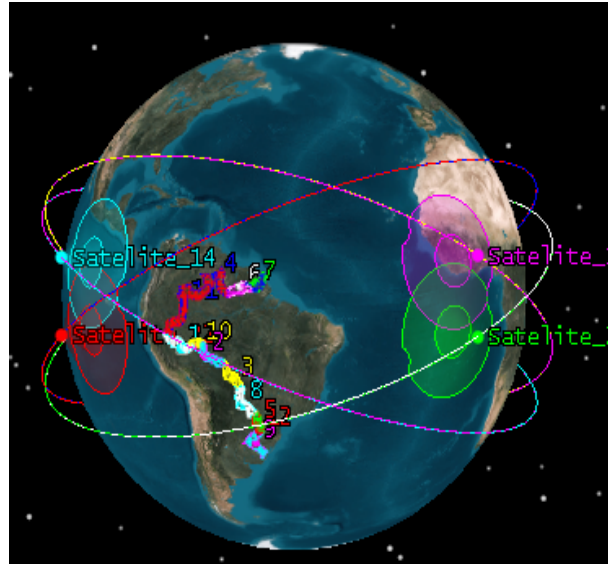


(a) Representação tridimensional

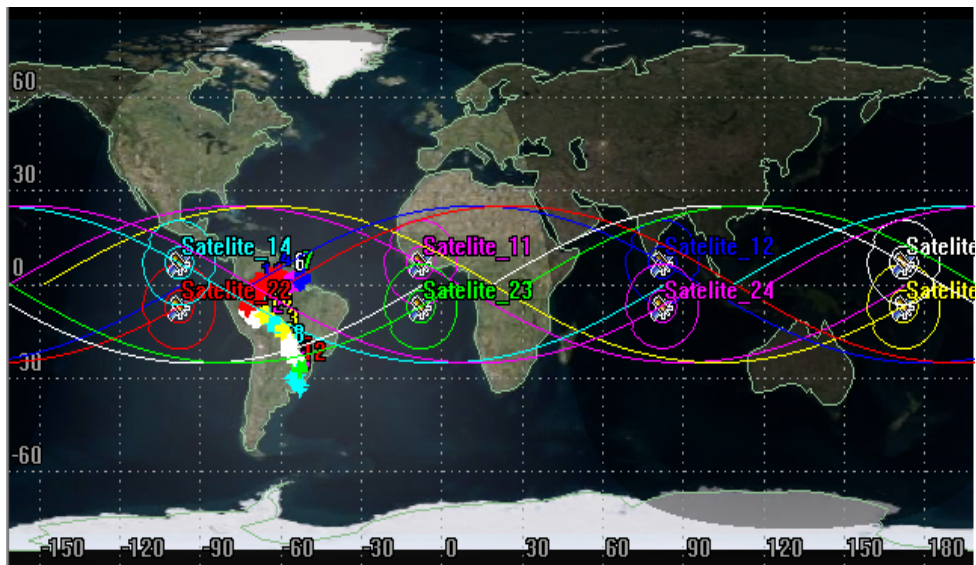


(b) *Ground Track* das órbitas

FIGURA 4.31 – Representações gráficas da constelação *Walker*  $25^{\circ}:6|3|0$ .



(a) Representação tridimensional

(b) *Ground Track* das órbitasFIGURA 4.32 – Representações gráficas da constelação *Walker* 25°:8|4|0.

# 5 Resultados Obtidos - Constelação Polar

Neste capítulo, são apresentados os resultados das simulações considerando a utilização de constelações Polares, com inclinação sendo considerada de  $90^{\circ}$ , além de uma discussão a respeito dos resultados encontrados.

## 5.1 Tempos de revisita

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações da figura de mérito de tempo de revisita para constelações do tipo Polar.

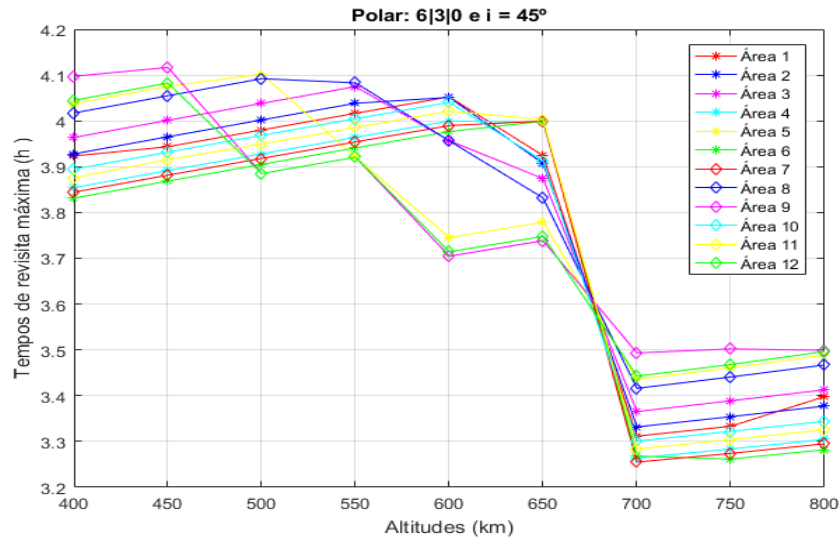
### 5.1.1 Variação da altitude

Inicialmente, busca-se entender o efeito da variação da altitude no tempo de revisita na região da fronteira terrestre do Brasil, com o uso de constelações Polar. Para isso, considera-se uma constelação com os dados fixados conforme apresentados na Tabela 5.1.

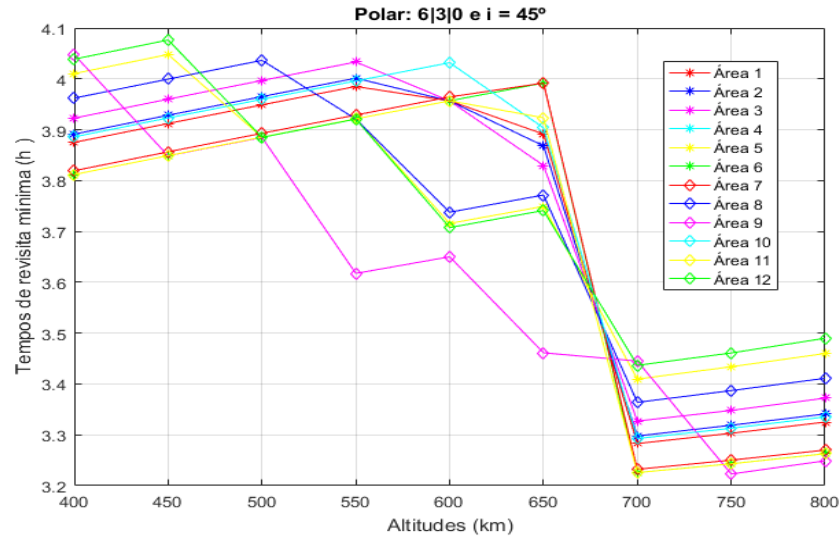
TABELA 5.1 – Dados da constelação Polar usada na análise da influência das altitudes no tempo de revisita.

Parâmetro	Valor
Total de Satélites ( $T$ )	6
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Ascensão reta do nodo ascendente	$45^{\circ}$

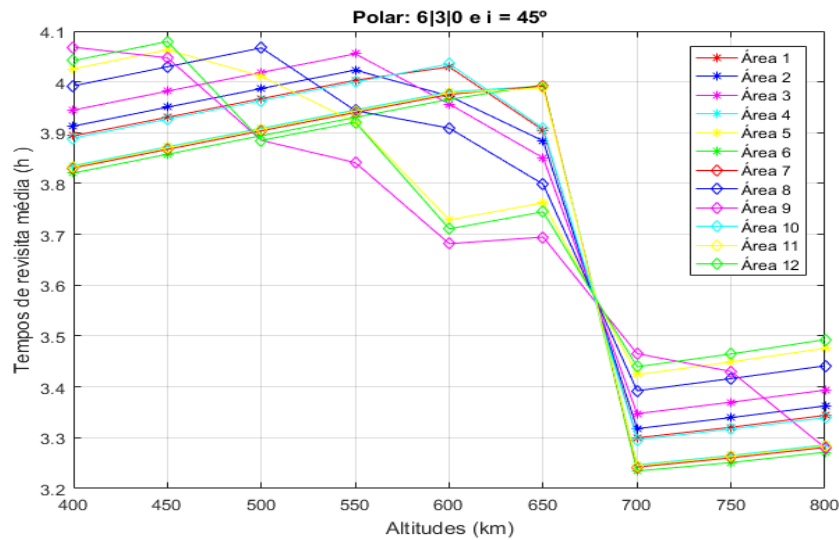
Mantendo-se a metodologia proposta, é possível obter a Figura 5.1 que apresenta os resultados dos tempos de revisita máximo, mínimo e médio. Mais uma vez, as altitudes foram variadas de 50 km em 50 km, começando com 400 km e indo até 800 km de altitude. Finalmente, a Figura 5.2 mostra a variação, graficamente, dos tempos de revisita por áreas da fronteira brasileira para os casos das altitudes de 400 km e 800 km.



(a) Tempo de revisita máximo por área

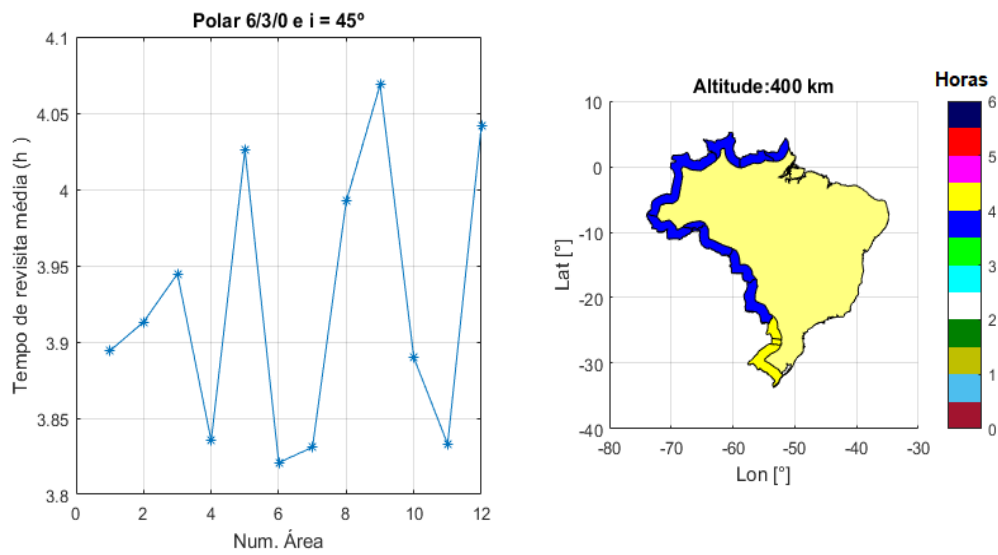


(b) Tempo de revisita mínimo por área

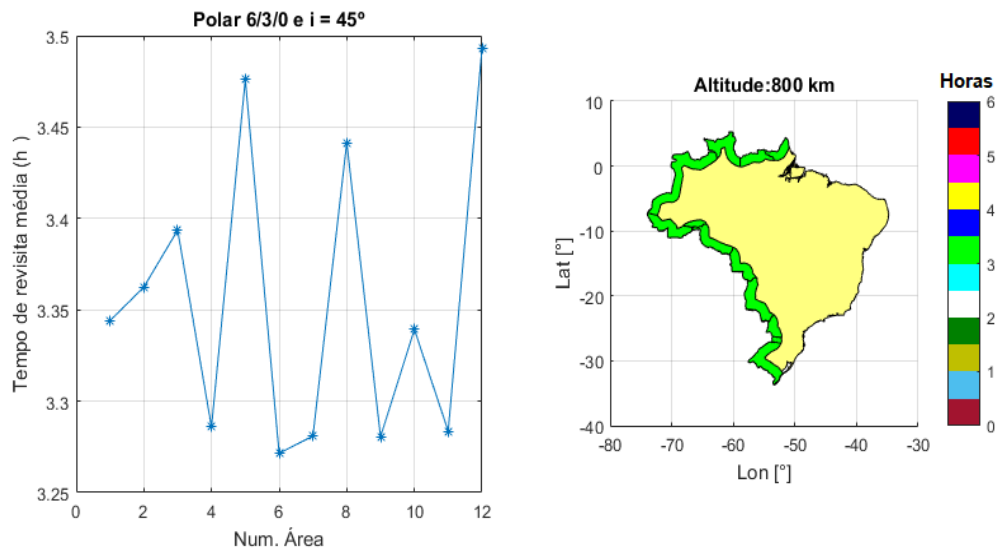


(c) Tempo de revisita médio por área

FIGURA 5.1 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação da altitude para constelação Polar.



(a) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 400 km de altitude



(b) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 800 km de altitude

FIGURA 5.2 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas.

Com base nos dados apresentados, percebemos uma tendência média de diminuição de tempos de revisita com o aumento das altitudes, o que também ocorreu para as constelações do tipo *Walker*. Esse resultado é esperado devido ao aumento do campo de visualização do satélite a partir do aumento da altitude. Contudo, é interessante perceber que para altitudes variando entre 450 e 650 km os tempos de revisita são muito próximos, fazendo com que a diferença de se utilizar uma altitude maior que 750 km seja ainda mais pronunciada.

A fim de se verificar essas informações, é construído um gráfico com o tempo de revisita médio das 12 áreas da fronteira terrestre, conforme apresentado na Figura 5.3,

onde a curva de interpolação em azul tem como intuito apenas apresentar a tendência de queda brusca do tempo de revisita, conforme previsto na literatura (WERTZ, 2001), ocorrendo de 650 km para 700 km.

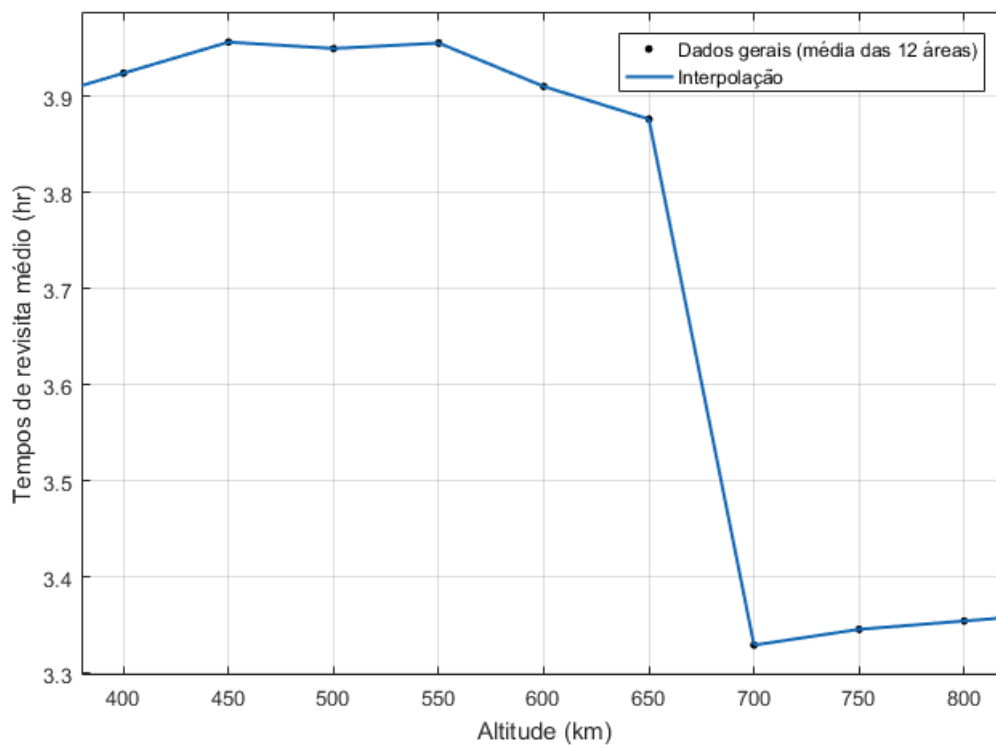


FIGURA 5.3 – Revisita média das 12 áreas pela altitude.

### 5.1.2 Variação do Total de Satélites

Após entender a influência da variação da altitude no tempo de revisita no contexto do uso das constelações Polares, busca-se verificar o comportamento dos tempos com mudanças no número de satélites. Para isso, fixam-se os dados apresentados na Tabela 5.2 para as simulações.

TABELA 5.2 – Dados da constelação Polar usada na análise da influência do total de satélites no tempo de revisita.

Parâmetro	Valor
Altitude ( $h$ )	800 km
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Ascensão reta do nodo ascendente	$45^\circ$

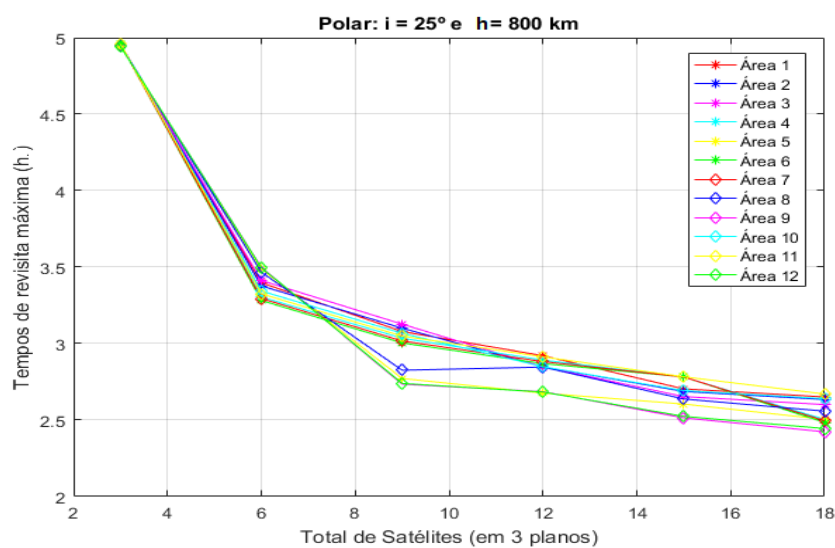
Neste sentido, é gerada a Figura 5.4 que apresenta os resultados dos tempos de revisita máximo, mínimo e médio. Ademais, é produzida a Figura 5.5 com o objetivo de visualizar graficamente a mudança dos tempos de revisita em todas as áreas da fronteira para 6 e 18 satélites.

Deste modo, percebe-se que a variação relativa dos tempos de revisita entre as áreas da fronteira é maior a partir de 9 satélites, sendo mínima com 3 satélites. Ademais, verifica-se uma tendência de queda que se assemelha a uma curva exponencial de queda dos tempos de revisita com o aumento do número de satélites. Em termos de tempos médios para as 12 áreas apresentadas, obtemos a Figura 5.6 que apresenta a tendência comportamental dos pontos, porém como soma de duas exponenciais, mostrando uma concordância com a hipótese anterior. Contudo, essa tendência é melhor avaliada ao considerarmos uma soma de curvas, obtendo os dados de regressão apresentados na Tabela 5.3.

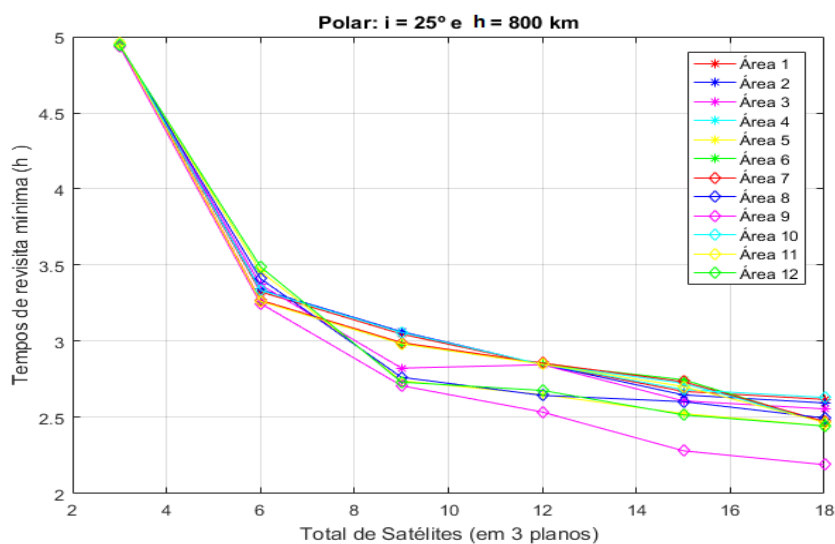
Sendo assim, verifica-se que o tempo de revisita para constelações Polares chega a cerca de 3 horas e 30 minutos para 6 satélites, o que apresenta um ganho relativo de 30% em relação a 3 satélites (cujo tempo é de cerca de 5 horas). Outrossim, esse valor para 6 satélites é apenas 14% maior que o valor para 9 satélites (de cerca de 3 horas).

TABELA 5.3 – Dados da regressão linear da análise da influência o total de satélites em constelações Polares.

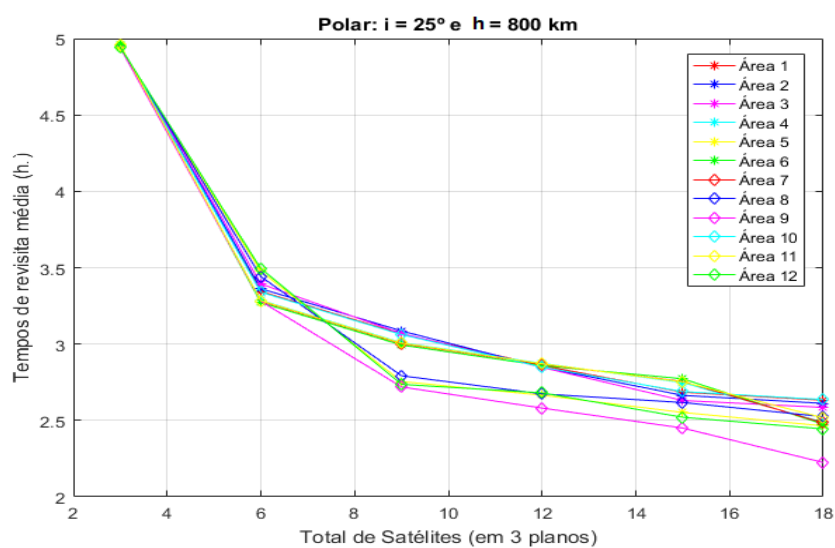
Parâmetro	Valor
$f(x)$	$f(x) = 10,16e^{-0,5853x} + 3,352e^{-0,0159x}$
$r^2$	0,9998



(a) Tempo de revisita máximo por área



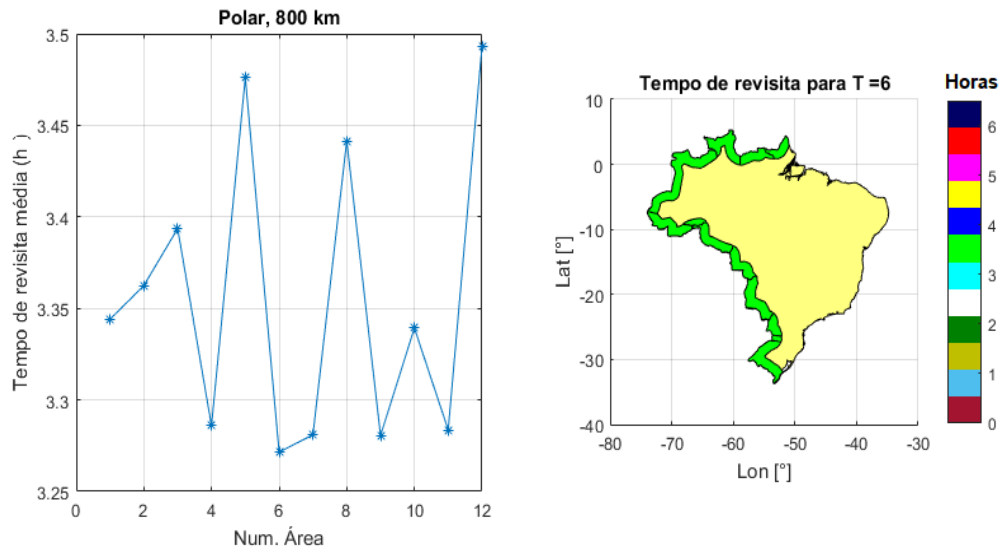
(b) Tempo de revisita mínimo por área



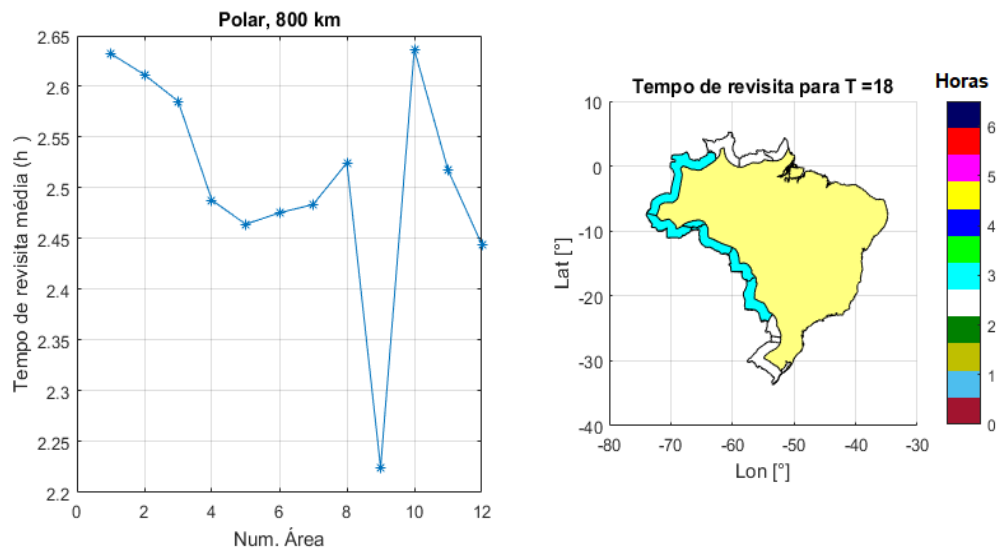
(c) Tempo de revisita médio por área

FIGURA 5.4 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação do total de satélites para constelação Polar.





(a) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 6 satélites

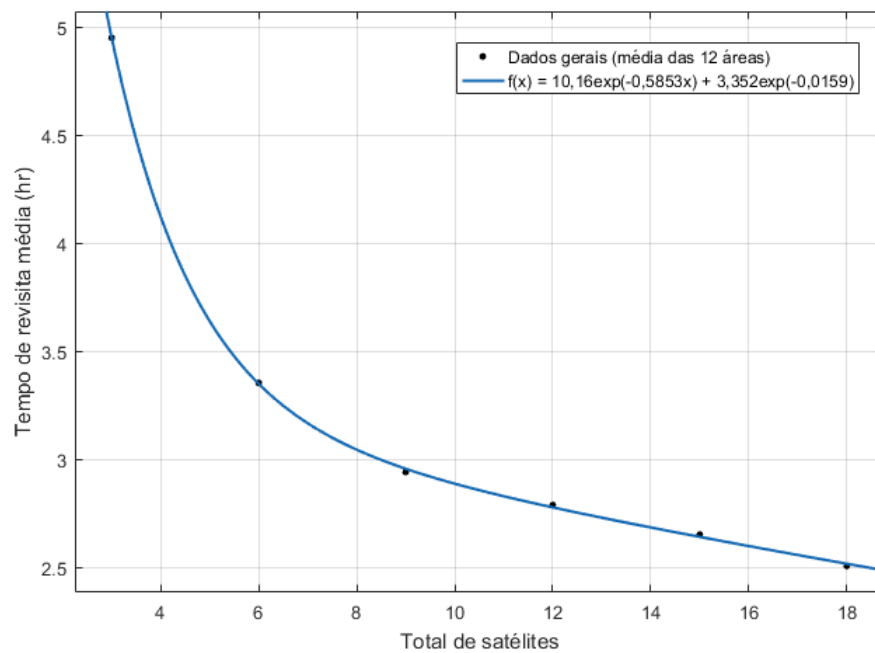


(b) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 18 satélites

FIGURA 5.5 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas.

### 5.1.3 Variação do número de planos

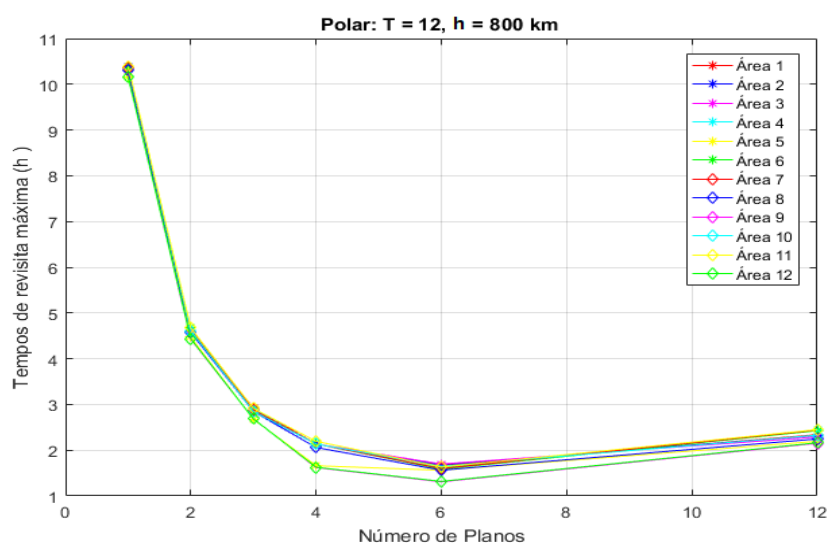
Para a realização do estudo da variação do número de planos, consideram-se os dados apresentados na Tabela 5.4, na qual observa-se um número de 12 satélites considerando os valores de 1, 2, 3, 4, 6 e 12 planos orbitais.

FIGURA 5.6 – Revisita média das 12 áreas pelo total de satélites.  $r^2 = 0,9998$ .TABELA 5.4 – Dados da constelação Polar usada na análise do número de planos ( $P$ )

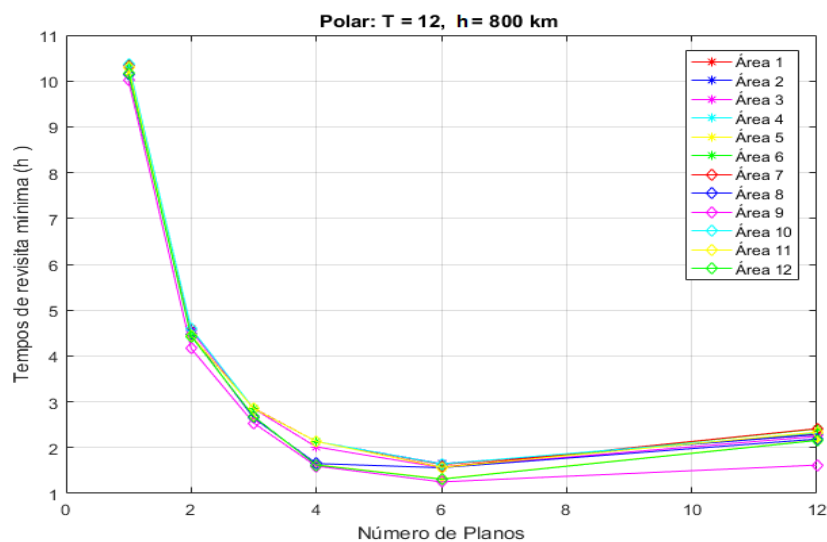
Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	12
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Ascensão reta do nodo ascendente	$45^\circ$

Deste modo, são geradas as Figuras 4.9 (a, b, c) com os tempos de revisita máximo, mínimo e médio, respectivamente. Ademais, consideramos as Figuras apresentadas em 4.10 (a e b) com a representação gráfica para 1 e 3 satélites, respectivamente.

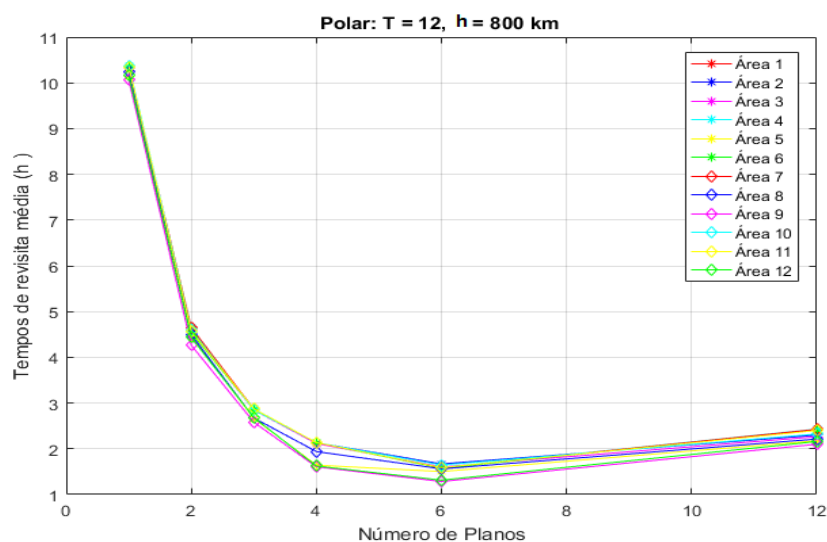
Observa-se que a distribuição dos satélites nos planos orbitais possui papel fundamental na diminuição dos tempos de revisita médios obtidos nesse estudo, apresentando uma diminuição dos tempos de revisita até 6 planos, aumentando novamente para 12 planos, o que pode estar diretamente relacionado com a diminuição do número de satélites por planos. Por fim, cabe destacar que a mudança do número de planos não apresenta uma diferença relativa dos tempos de revisita entre as áreas, ou seja, observa-se uma uniformidade maior entre as 12 áreas da fronteira terrestre do Brasil.



(a) Tempo de revisita máximo por área

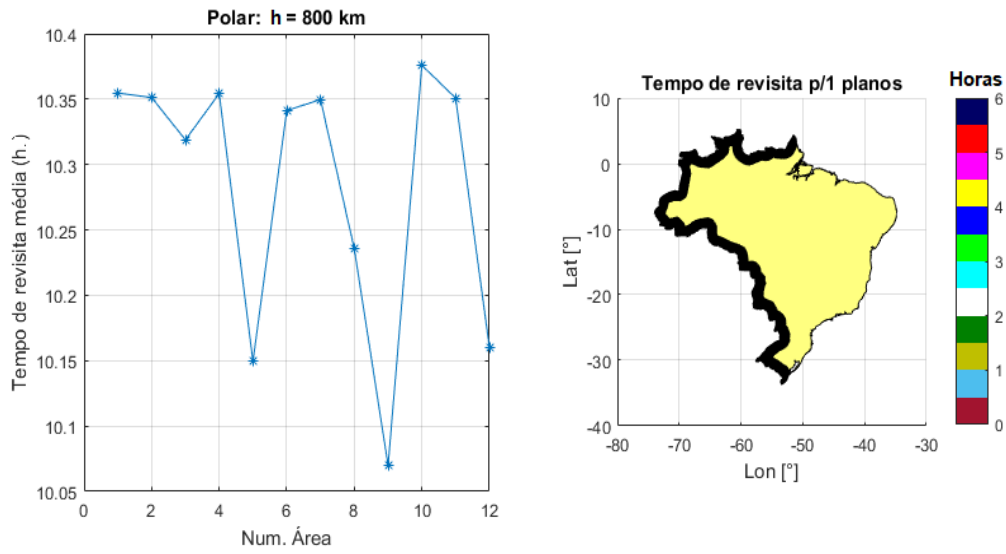


(b) Tempo de revisita mínimo por área

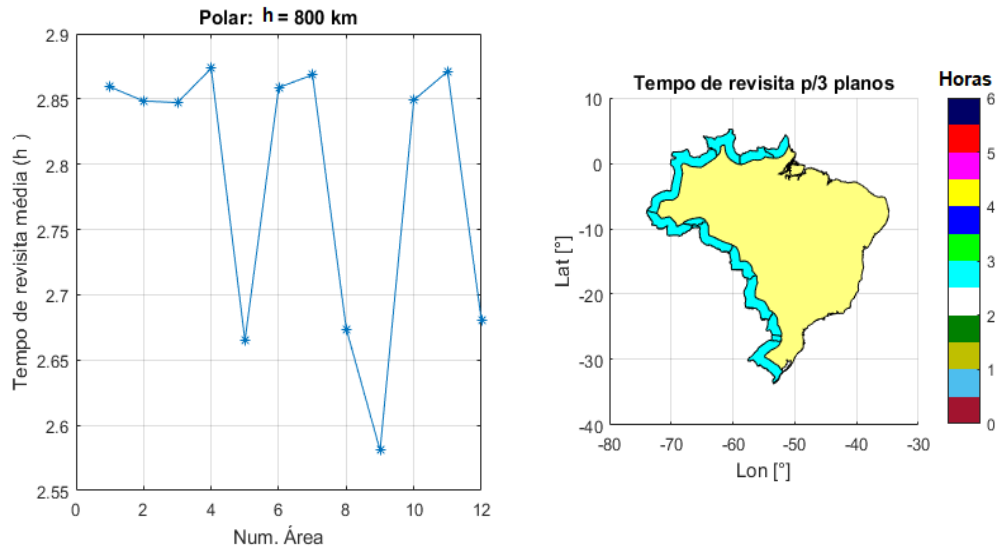


(c) Tempo de revisita médio por área

FIGURA 5.7 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação do número de planos para constelação Polar.



(a) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 1 plano orbital.



(b) Tempo de revisita médio por área da fronteira para 3 planos orbitais.

FIGURA 5.8 – Tempos de revisita médio em cores, representando tempo de revisita em horas para constelação Polar.

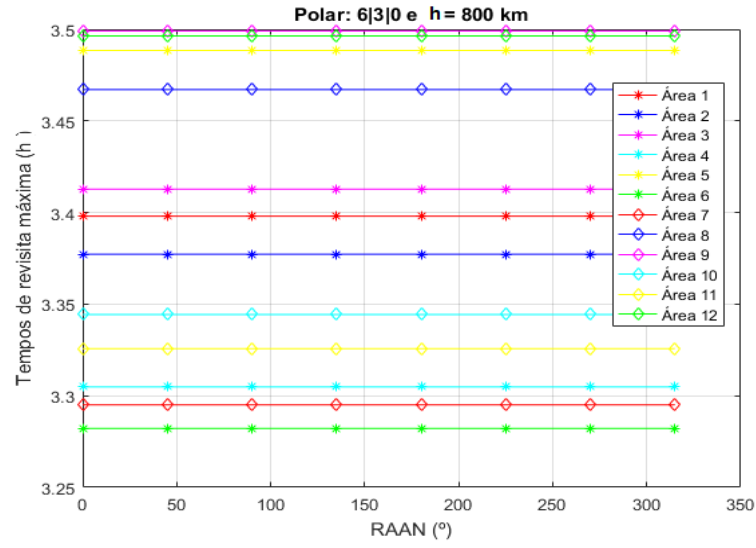
#### 5.1.4 Variação da ascensão reta do nodo ascendente (RAAN)

Ainda no contexto das constelações Polares, fixam-se os dados da Tabela 5.5 para o estudo da variação da ascensão reta do nodo ascendente. Neste sentido, utilizando-se a metodologia proposta com o uso dos softwares MATLAB<sup>®</sup> e STK<sup>®</sup> tem-se a Figura 5.9, com tempos de revisita máximo, mínimo e médio. Os valores de RAAN foram alterados a partir de 0° até 315°, de 45° em 45°.

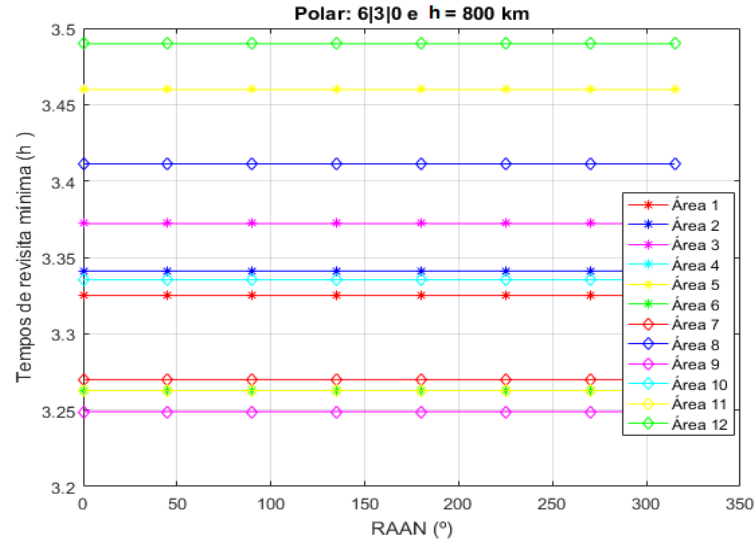
TABELA 5.5 – Dados da constelação Polar usada na análise do RAAN

Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	6
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km

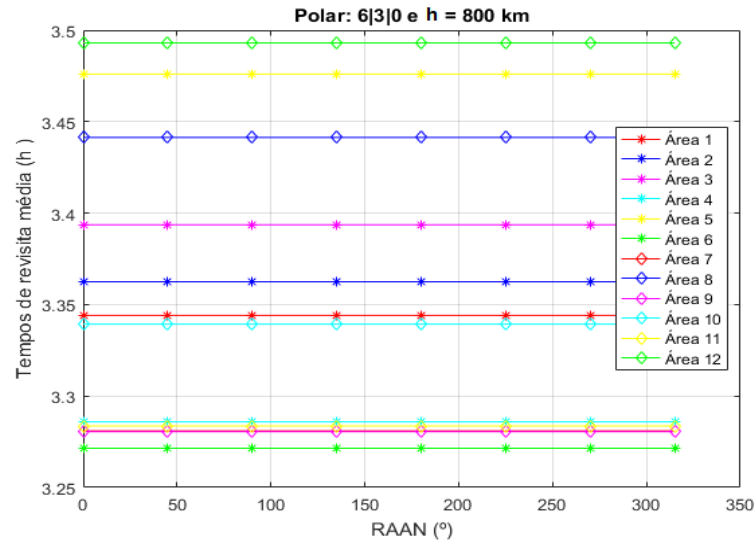
Observa-se que, mais uma vez, a escolha deste parâmetro é indiferente para o resultado final da simulação já que os valores de tempo de revisita de cada área não são alterados com a variação da RAAN.



(a) Tempo de revisita máximo por área



(b) Tempo de revisita mínimo por área



(c) Tempo de revisita médio por área

FIGURA 5.9 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação do RAAN para constelação Polar.

### 5.1.5 Variação do espaçamento relativo ( $F$ )

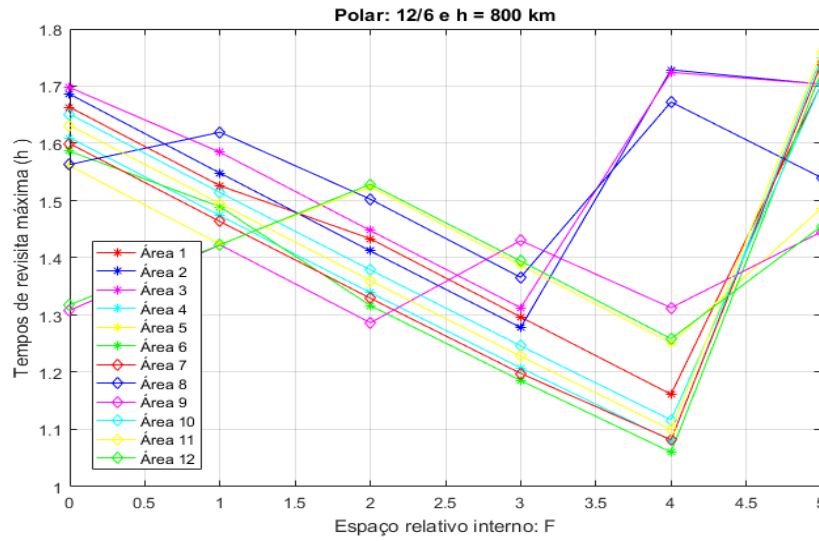
Finalmente, varia-se o espaçamento relativo de 0 a  $P - 1$  com valores inteiros e os dados escolhidos para se realizar a simulação são os apresentados na Tabela 5.6, onde  $P = 6$ . Com os dados apresentados é gerada a Figura 5.10, mais uma vez com os valores de tempo de revisita máximo, mínimo e médios.

TABELA 5.6 – Dados da constelação Polar usada na análise do espaçamento relativo  $F$ .

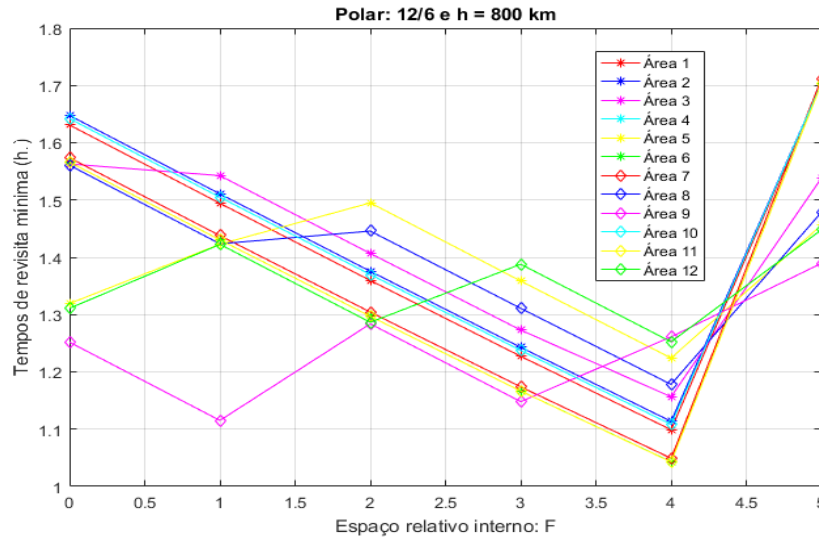
Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	12
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	6
Altitude	800 km
Ascensão reta do nodo ascendente	0º

Dessa forma, verifica-se que a variação do espaçamento relativo gera variações muito pequenas dos tempos de revisita média, quando  $F$  é variado de 0 até 3, com a maior diferença percentual (numericamente igual a 24%) encontrada ao conduzirmos uma alteração de  $F = 0$  para 3 na região 2 (Rondônia). Nesse intervalo observamos também uma maior uniformidade dos tempos de revisita para todas as regiões da fronteira terrestre.

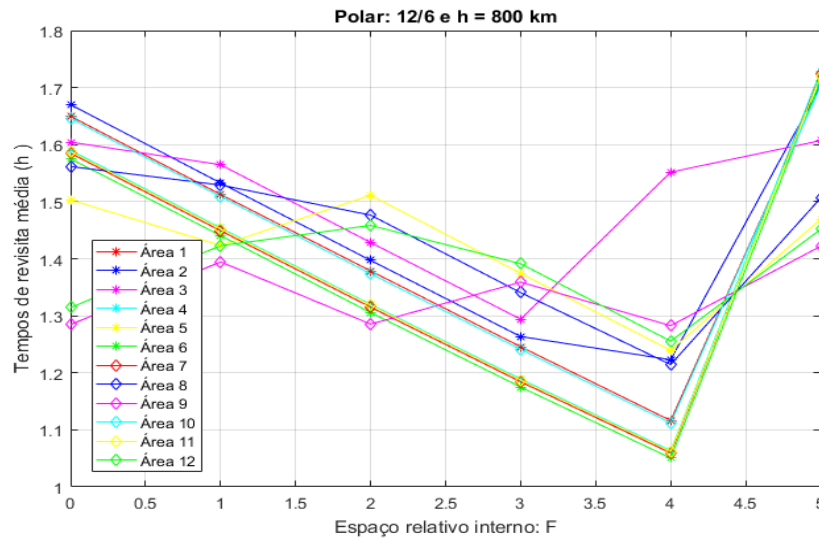
Contudo, para  $F = 4$  ou 5 já tem-se uma menor uniformidade e uma variação média dos tempos de revisita maior, com a maior variação relativa entre as 12 áreas chegando aos 32%, que considerando o tempo de revisita em questão, representa cerca de 20 minutos. Deste modo, é mais importante para constelações Polares alterar parâmetros como número de planos e total de satélites do que alterar o espaçamento relativo, embora este último seja capaz de apresentar modificações importantes, interferindo nas necessidades finais da missão proposta.



(a) Tempo de revisita máximo por área



(b) Tempo de revisita mínimo por área



(c) Tempo de revisita médio por área

FIGURA 5.10 – Tempos de revisita máximo, mínimo e médio com variação de  $F$  para constelação Polar.



## 5.2 Percentuais de tempo de Acesso

Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações da figura de mérito de percentuais de acesso para constelações do tipo Polar.

### 5.2.1 Variação da altitude

Para o estudo da figura de mérito dos percentuais de tempo em cobertura, inicia-se com a variação da altitude da constelação Polar, fixando os dados apresentados na Tabela 5.7. Deste modo, é obtida a Figura 5.11 com gráficos dos resultados dos percentuais de cobertura máximo, mínimo e médio.

TABELA 5.7 – Dados da constelação Polar usada na análise da influência das altitudes nos percentuais de acesso.

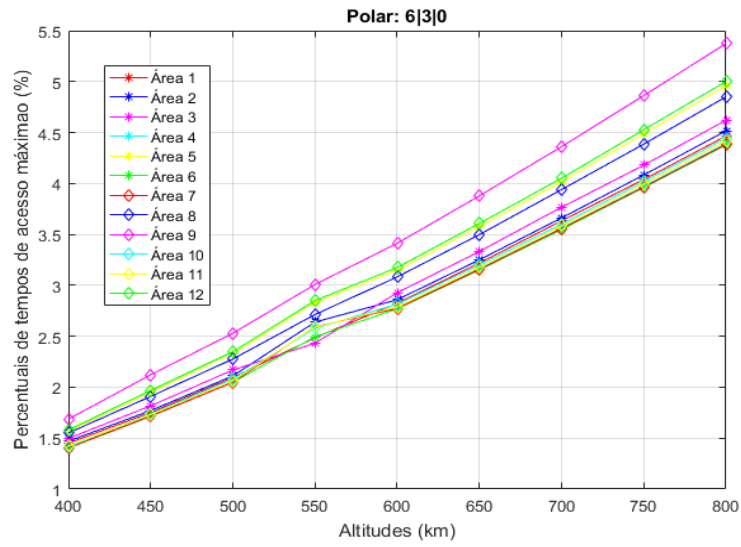
Parâmetro	Valor
Total de Satélites ( $T$ )	6
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Ascensão reta do nodo ascendente	45°

Ademais, a Figura 5.12 mostra a variação dos percentuais de acesso por áreas da fronteira brasileira, com altitudes de 400 km e 800 km, a fim de apresentar graficamente as diferenças encontradas com a variação da altitude.

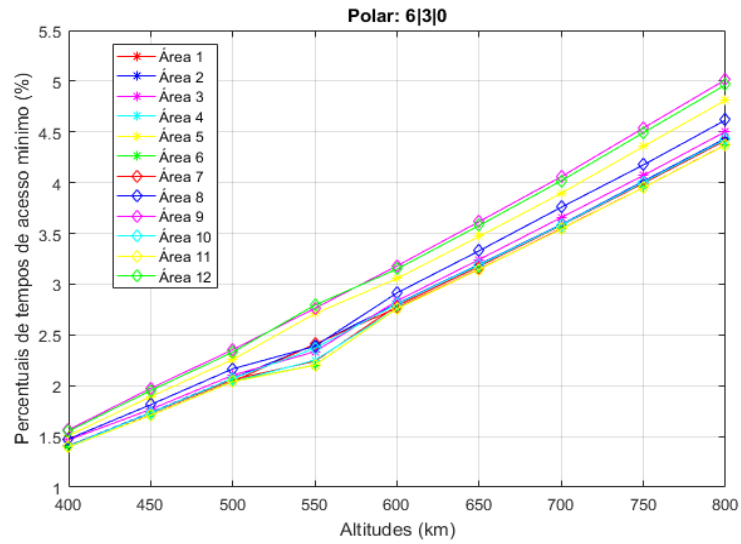
Verifica-se um comportamento linear médio para as 12 áreas da fronteira, o que é comprovado pelo uso da função *Curve Fitting Tool* do software MATLAB®. O resultado obtido é o apresentado na Figura 5.13, com os dados obtidos da regressão linear apresentados na Tabela 5.8. Deste modo, quanto maior a altitude escolhida, maiores serão os percentuais de acesso da região.

TABELA 5.8 – Dados da regressão linear da análise da influência das altitudes nos percentuais de tempo de acesso médio.

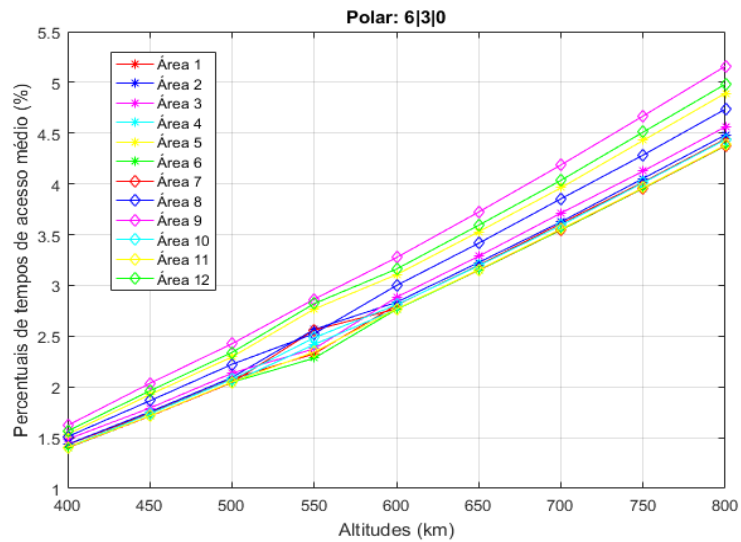
Parâmetro	Valor
$f(x)$	0,007849x - 1,746
$r^2$	0,9981



(a) Percentual de tempo de acesso máximo por área



(b) Percentual de tempo de acesso mínimo por área



(c) Percentual de tempo de acesso médio por área

FIGURA 5.11 – Percentual de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação da altitude para constelação Polar.

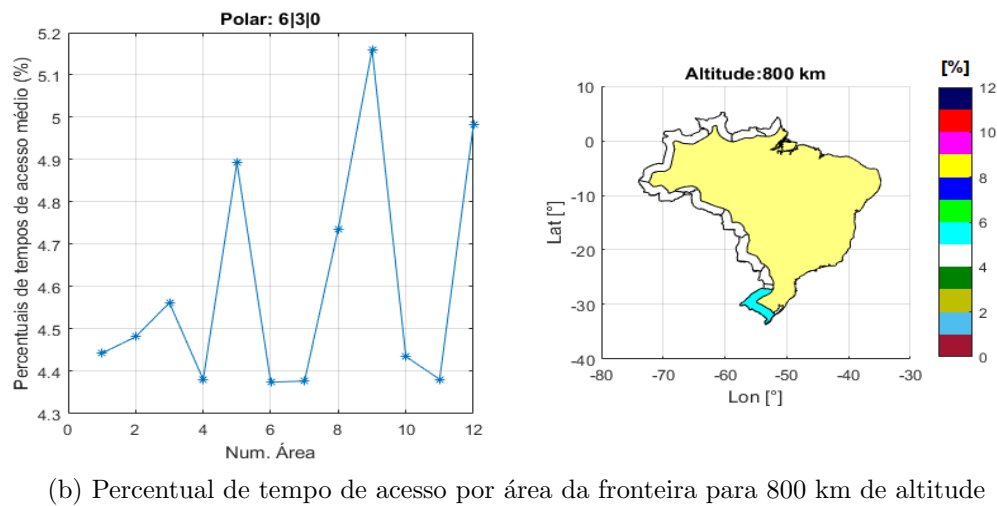
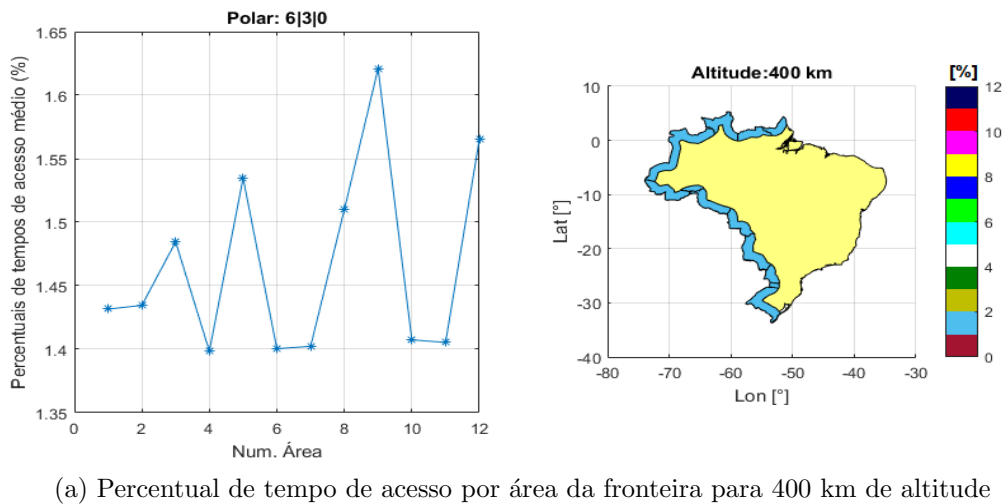


FIGURA 5.12 – Percentuais de tempo de acesso médios em cores, com legenda de cores em % para constelação Polar.

### 5.2.2 Variação do total de satélites

Seguindo a sequência de estudo dos parâmetros relevantes a constelação Polar, varia-se o total de satélites sempre aumentando de 3 em 3, considerando uma divisão em 3 planos orbitais. Para isso, são fixados conforme apresentados na Tabela 5.9, obtendo as Figuras 5.14 (a, b, c) com os percentuais de acesso máximo, mínimo e médio, respectivamente.

Não obstante, as Figuras 5.15 (a, b) mostram representações gráficas da fronteira terrestre brasileira, com 6 e 18 satélites (respectivamente). A representação gráfica nos permite verificar um aumento significativo do percentual de acesso com o aumento do número total de satélites, além de verificar que esse aumento atinge todas as regiões da fronteira. Ademais, pode-se verificar ainda que o aumento do número de satélites também gera uma maior diferença relativa entre o maior e o menor percentual de acesso das 12 áreas da fronteira, saindo de menos de 10% para 3 satélites, para cerca de 20% para 18 satélites.

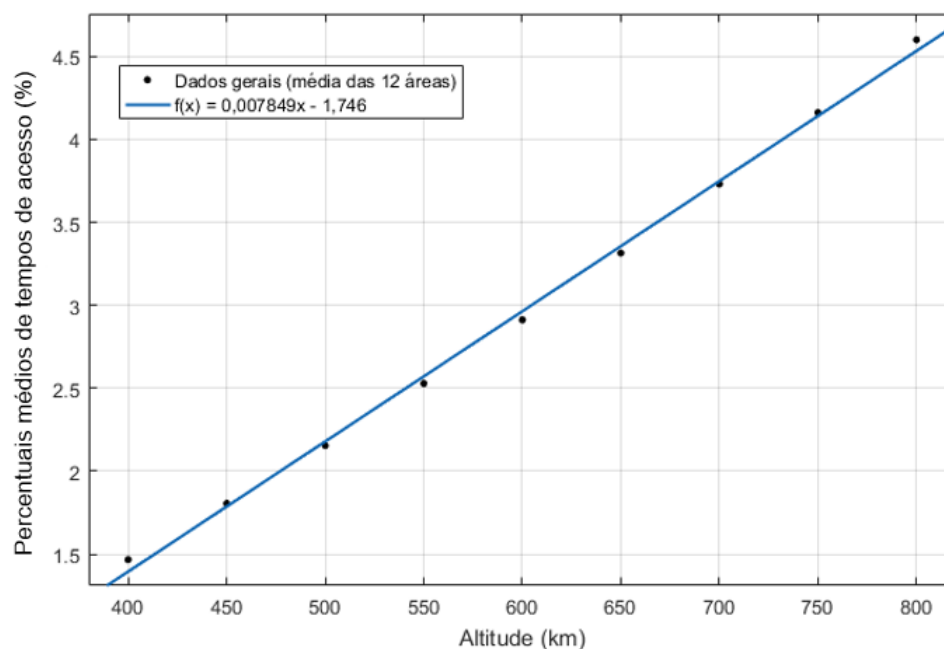


FIGURA 5.13 – Percentuais de tempo de acesso médio das 12 áreas pela altitude.  $r^2 = 0,9981$ .

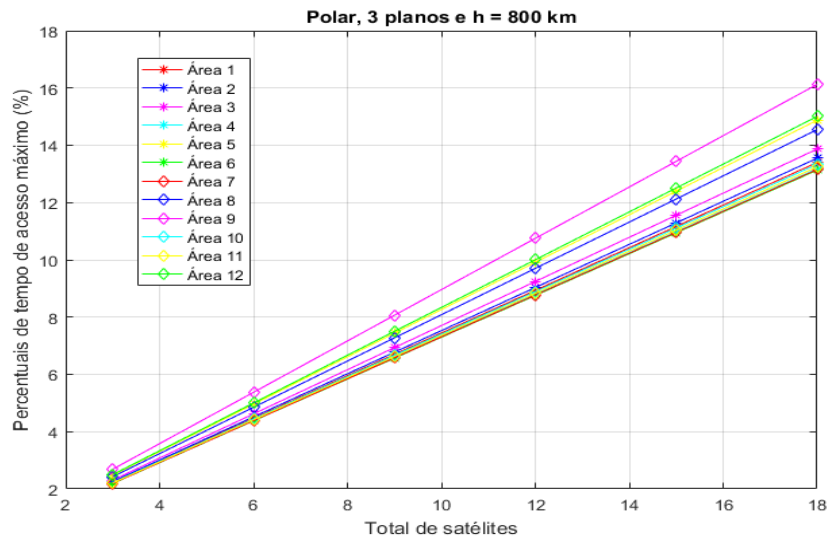
TABELA 5.9 – Dados da constelação Polar usada na análise do total de satélites.

Parâmetro	Valor
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Ascensão reta do nodo ascendente	$0^\circ$

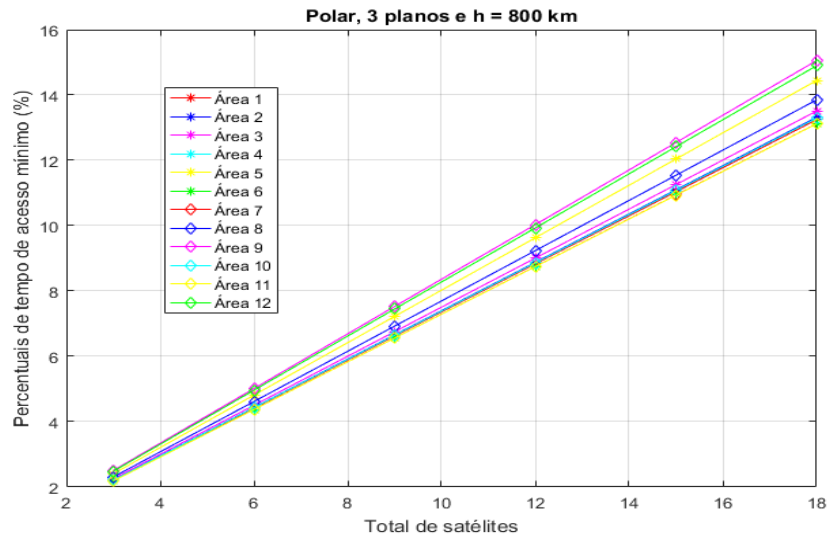
A Figura 5.16 apresenta os valores médios do acesso percentual das 12 áreas da fronteira em função do número total de satélites e os dados obtidos da regressão linear são apresentados na Tabela 5.10. Deste modo, podemos confirmar a tendência linear, na qual pode-se destacar o valor de cerca de 5% de percentual de acesso para 6 satélites, enquanto que esse valor chega a 14% para 18 satélites na constelação.

TABELA 5.10 – Dados da regressão linear da análise da influência do total de satélites em constelação Polar

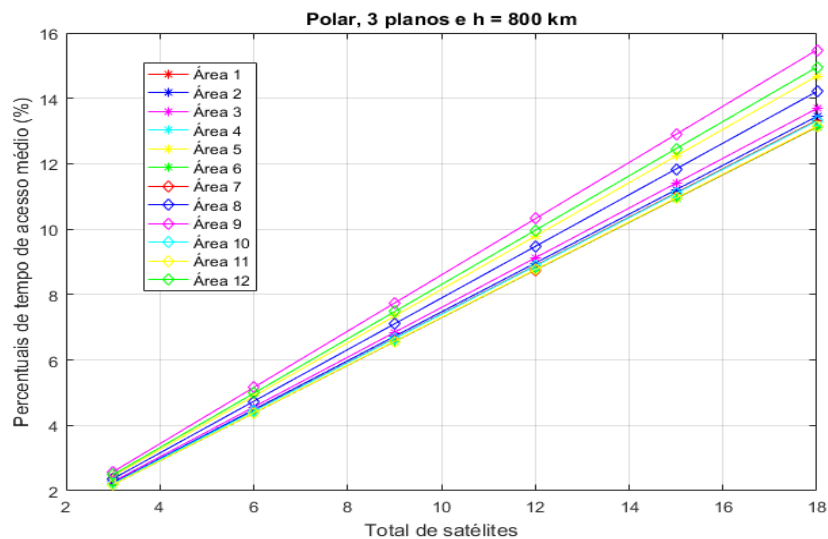
Parâmetro	Valor
$f(x)$	$0,7669x + 0,001018$
$r^2$	0,9999



(a) Percentuais de tempo de acesso máximo por área

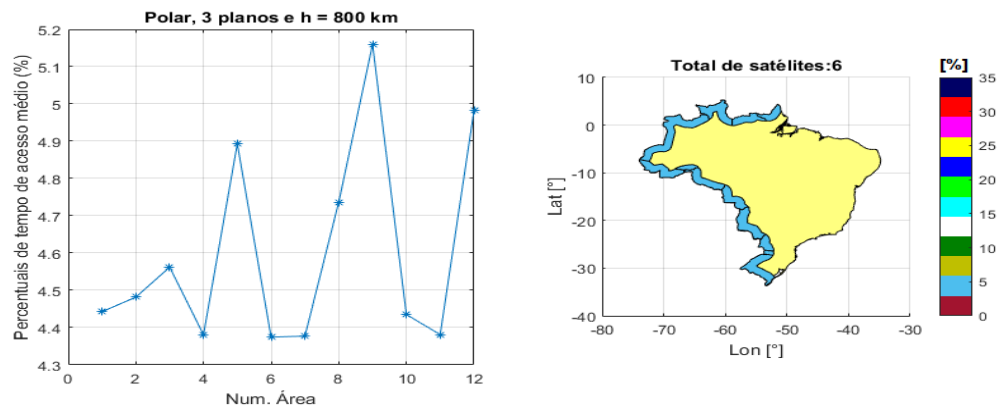


(b) Percentuais de tempo de acesso mínimo por área

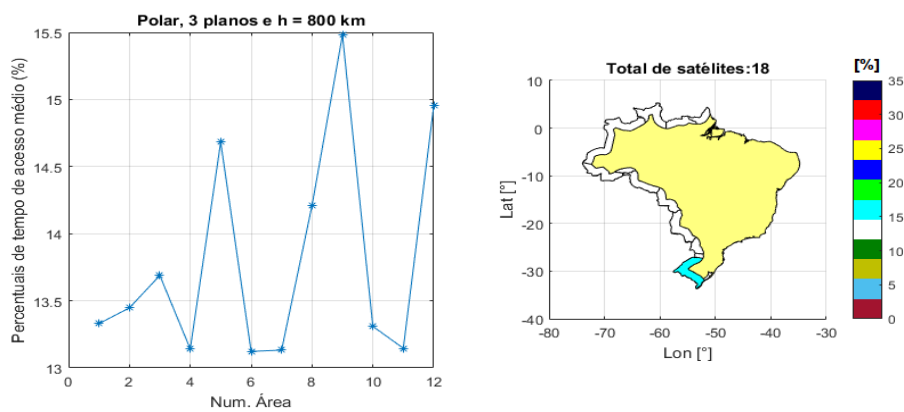


(c) Percentuais de tempo de acesso médio por área

FIGURA 5.14 – Percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação do total de satélites para constelação Polar.

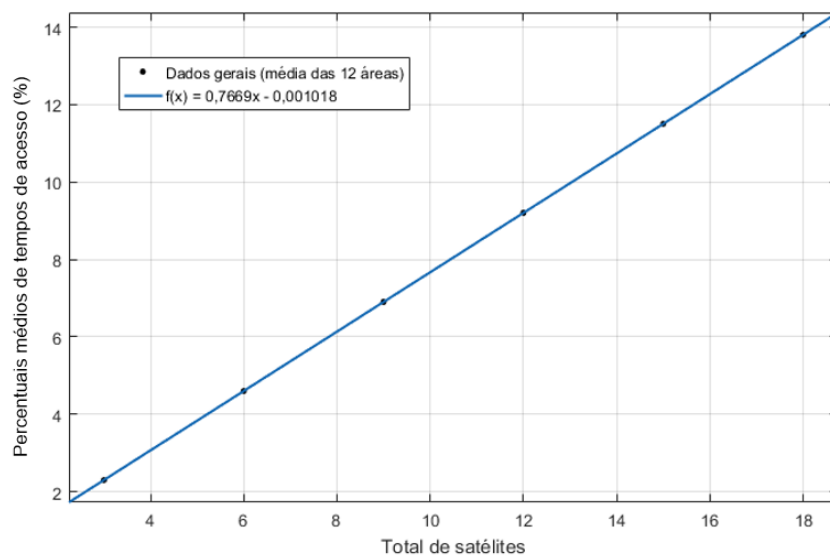


(a) Percentuais de tempo de acesso por área da fronteira para 6 satélites.



(b) Percentuais de tempo de acesso por área da fronteira para 18 satélites.

FIGURA 5.15 – Percentuais de tempo de acesso médios em cores, com legenda de cores em %.

FIGURA 5.16 – Percentuais de tempo de acesso médio das 12 áreas pelo total de satélites.  $r^2 = 0,9999$ .

### 5.2.3 Variação do número de planos

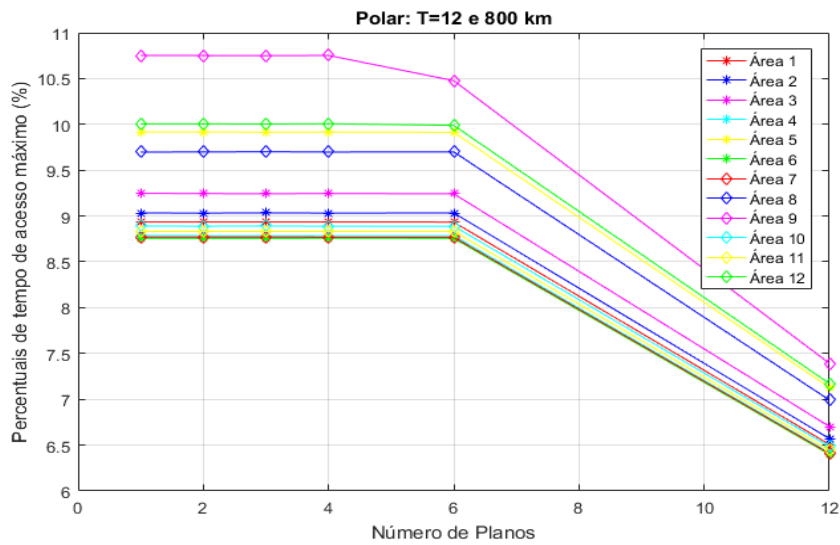
Para a verificação da importância do número de planos no estudo dos percentuais de acesso, consideram-se os dados apresentados na Tabela 5.11 como fixos. Mais uma vez, com o uso de 12 satélites, foram considerados valores de 1, 2, 3, 4, 6 e 12 planos orbitais.

TABELA 5.11 – Dados da constelação Polar usada na análise do número de planos ( $P$ ) para o percentual de acesso

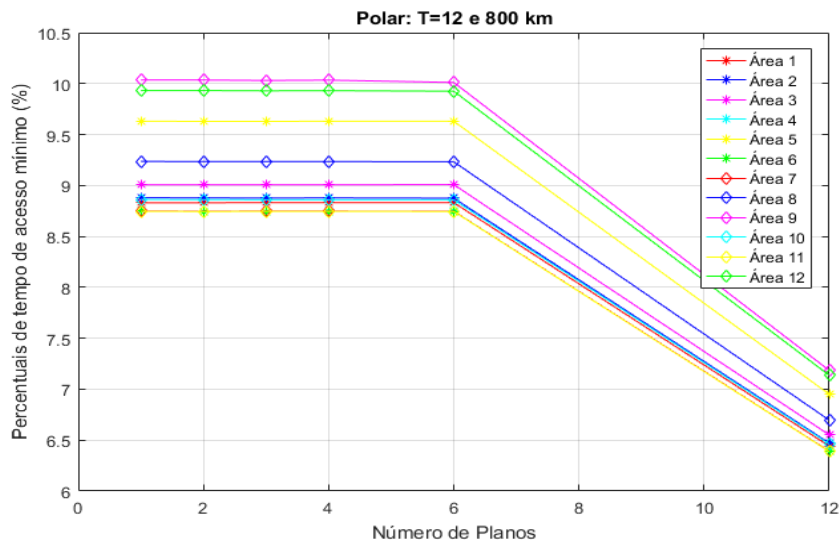
Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	12
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Ascensão reta do nodo ascendente	45°

Deste modo, obtém-se as Figuras 5.17 (a, b, c) com os percentuais de acesso máximo, mínimo e médio, respectivamente, com a Figura 5.18 representando a média das 12 áreas para cada número de plano orbital. Em azul está a tendência de variação dos percentuais, permitindo verificar que os valores médios não mudam muito para 1 a 6 planos orbitais, muito embora o uso de 6 e 12 planos faça diminuir o percentual de tempo de acesso. Tal resultado pode estar diretamente relacionado com a diminuição do número de satélites por plano, diminuindo o tempo de cobertura total, o que é mais afetado com a quantidade de 12 satélites, já que, nesse caso, o valor do número de satélites para 12 planos é de apenas 1 veículo por plano.

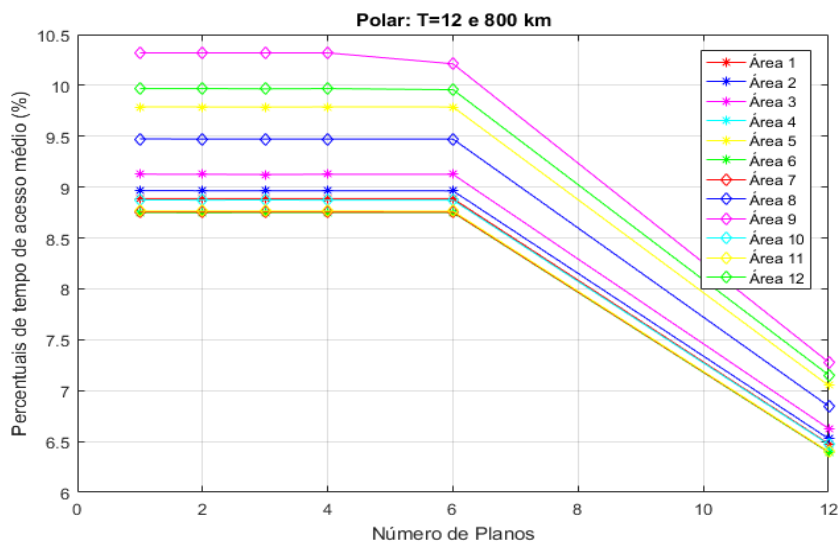
Deste modo, para se verificar graficamente os resultados encontrados, são geradas as Figuras 5.19 (a e b) com a representação gráfica para 3 e 6 satélites, respectivamente. Observa-se que a distribuição dos satélites nos planos orbitais ocasionam uma mudança muito baixa nos resultados, indicando que a variação do número de planos pode ser útil para um eventual ajuste fino dos percentuais de acesso da região, o que deve ser um requisito dos *stakeholders*.



(a) Percentuais de tempo de acesso máximo por área



(b) Percentuais de tempo de acesso mínimo por área



(c) Percentuais de tempo de acesso médio por área

FIGURA 5.17 – Percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação do número de planos para constelação Polar.



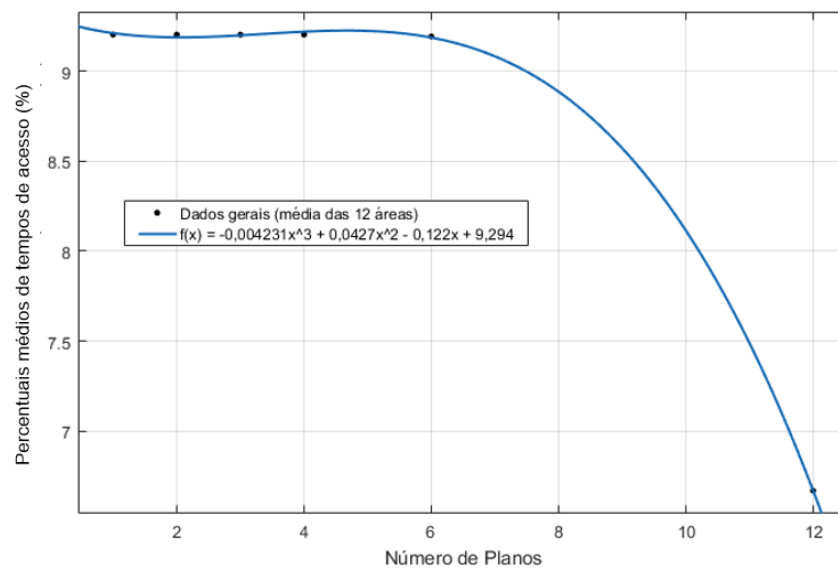
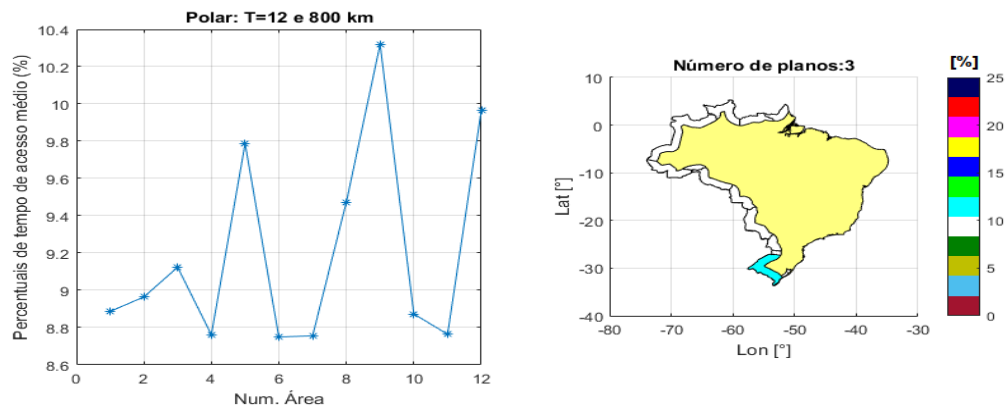
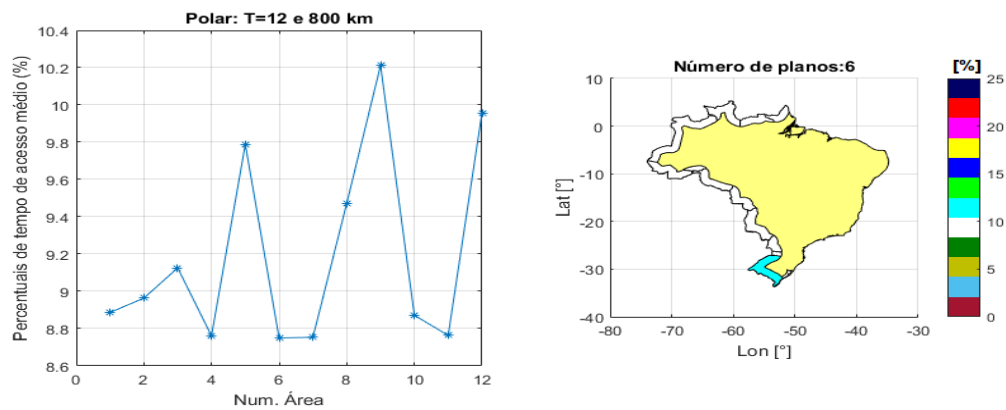


FIGURA 5.18 – Percentuais de tempo de acesso médio das 12 áreas pelo número de planos.



(a) Percentuais de tempo de acesso médio por área da fronteira para 3 planos orbitais.



(b) Percentuais de tempo de acesso médio por área da fronteira para 6 planos orbitais.

FIGURA 5.19 – Percentuais de tempo de acesso médios em cores, com legenda de cores em %.

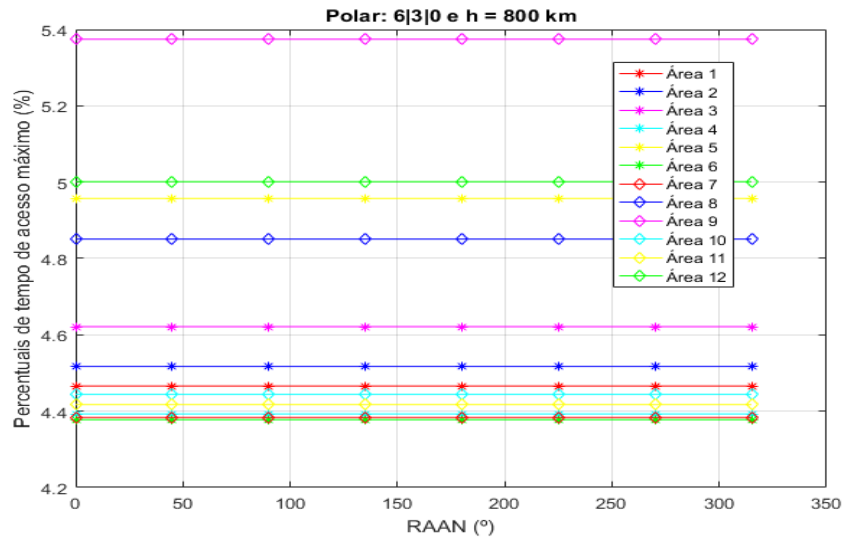
### 5.2.4 Variação da ascensão reta do nodo ascendente (RAAN)

Ademais, para o estudo da influência da ascensão reta do nodo ascendente no percentual de acesso, fixam-se os dados da Tabela 5.12. Sendo assim, alterando os valores de RAAN a partir de  $0^\circ$  até  $360^\circ$ , de  $45^\circ$  em  $45^\circ$ , dando origem à Figura 5.20, com tempos de revisita máximo, mínimo e médio. Observa-se que o percentual de cobertura não foi alterado com a variação da RAAN.

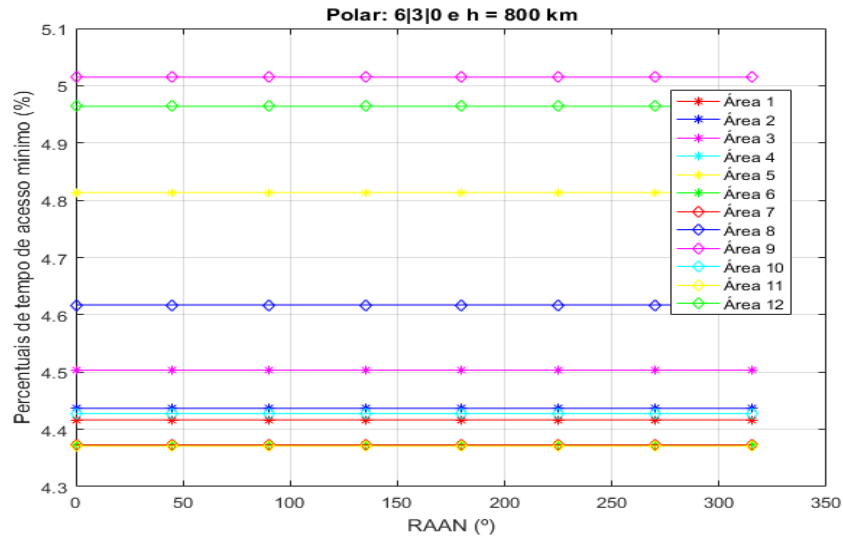
TABELA 5.12 – Dados da constelação Polar usada na análise da influência da RAAN nos percentuais de acesso

Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	6
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	3
Espaço relativo interno ( $F$ )	0
Altitude	800 km

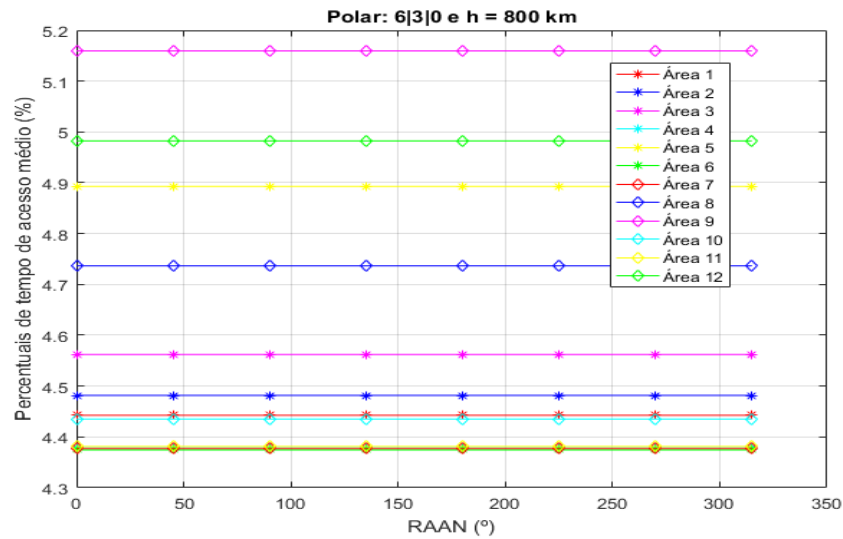
Em última análise, verifica-se que a ascensão reta do nodo ascendente não apresenta influência significativa no estudo das constelações Polares, assim como não apresentou para as de *Walker*, tanto para os tempos de revisita como para os percentuais de acesso.



(a) Percentual de tempo de acesso máximo por área



(b) Percentual de tempo de acesso mínimo por área



(c) Percentual de tempo de acesso médio por área

FIGURA 5.20 – Percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação do RAAN para constelação Polar.

### 5.2.5 Variação do espaçamento relativo ( $F$ )

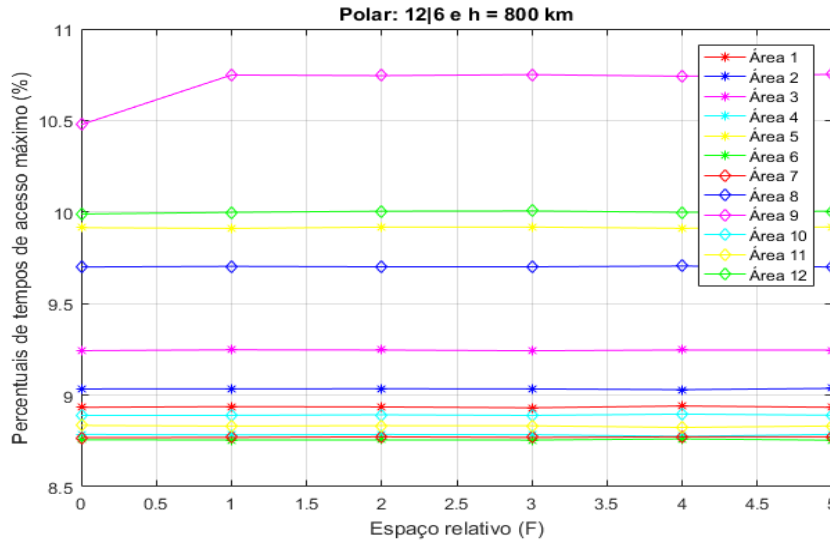
Por fim, varia-se o espaçamento interno  $F$  com os dados fixados na Tabela 5.13 para a simulação, variando-se  $F$  de 0 a 5. Com os dados apresentados é gerada a Figura 5.21, mais uma vez com os valores de percentuais de acesso máximo, mínimo e médios.

TABELA 5.13 – Dados da constelação Polar usada na análise do espaçamento relativo  $F$  dos percentuais de acesso.

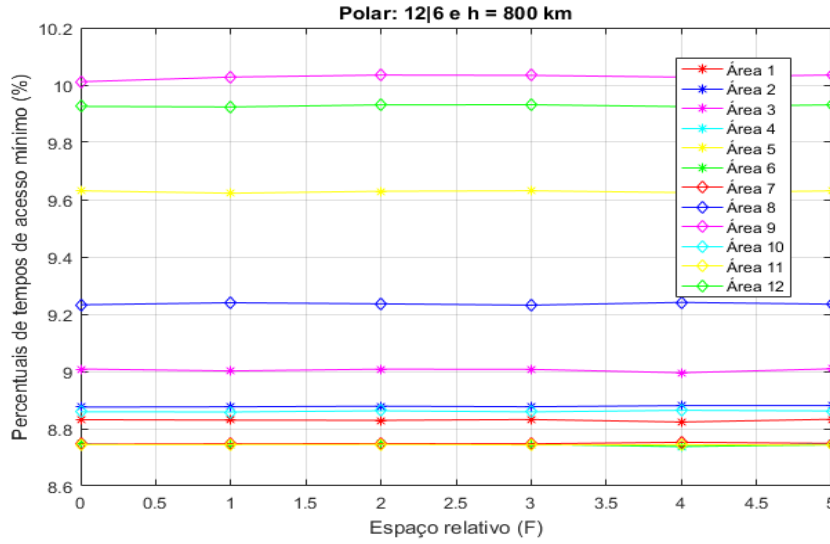
Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	12
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	6
Altitude	800 km
Ascensão reta do nodo ascendente	0º

Verifica-se que os percentuais de acesso não são muito afetados com a variação do espaçamento relativo  $F$  das constelações Polares. Essa análise pode ser feita a partir da verificação de que os valores encontrados para  $F = 1$  até 5 são muito semelhantes, com variação percentual máxima entre cada uma das 12 regiões de cerca de 2%. Contudo, a maior variação é encontrada ao sair de 0 e ir a 1, no qual se observa uma variação máxima relativa (entre as áreas) de aproximadamente 20%, com o máximo para a área 9 (Rio Grande do Sul).

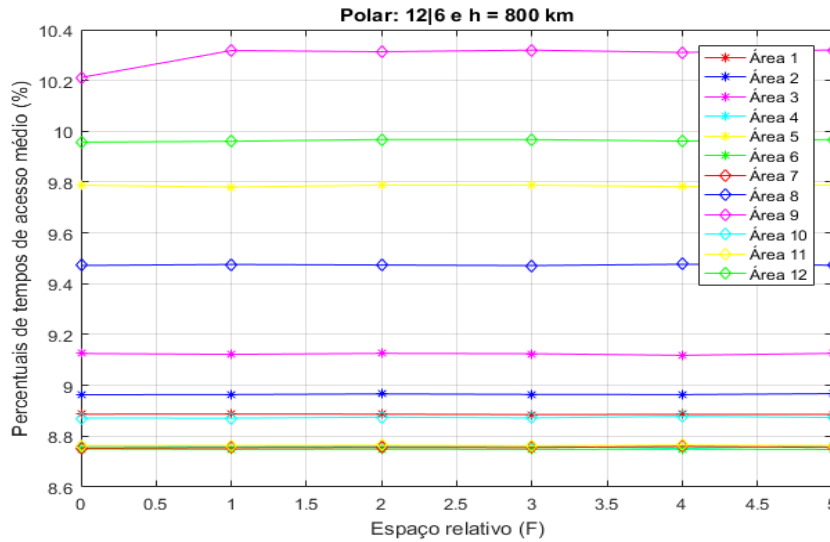
Sendo assim, pode-se concluir que alterações nos valores de espaçamento interno são menos importantes para a variação de percentuais de acesso que outros parâmetros como altitude e total de satélites, fazendo dessa uma variável mais interessante quando deseja-se fazer ajustes mais finos nos percentuais desejados, ou seja, quando já estamos perto do valor desejado e queremos apenas alterá-lo em poucos pontos percentuais.



(a) Percentuais de tempo de acesso máximo por área



(b) Percentuais de tempo de acesso mínimo por área



(c) Percentuais de tempo de acesso médio por área

FIGURA 5.21 – Percentuais de tempo de acesso máximo, mínimo e médio com variação de  $F$ .

### 5.3 Discussões

Assim como para as constelação *Walker*, as polares também apresentam menores tempos de revisita para maiores alturas, o que nos leva a um valor de 800 km para a altitude escolhida para as constelações. Também semelhante às constelações *Walker*, a RAAN é indiferente para os resultados.

Neste contexto, mais uma vez deve-se complementar a análise da variação do número de planos e de total de satélites, já que esses dois parâmetros são mais importantes que o espaçamento relativo, obtendo-se a Figura 5.22, onde  $F = 0$  em todos os casos. Nela, mais uma vez é percebida a tendência de queda exponencial do tempo de revisita médio ao longo de toda a fronteira pelo número total de satélites da constelação.

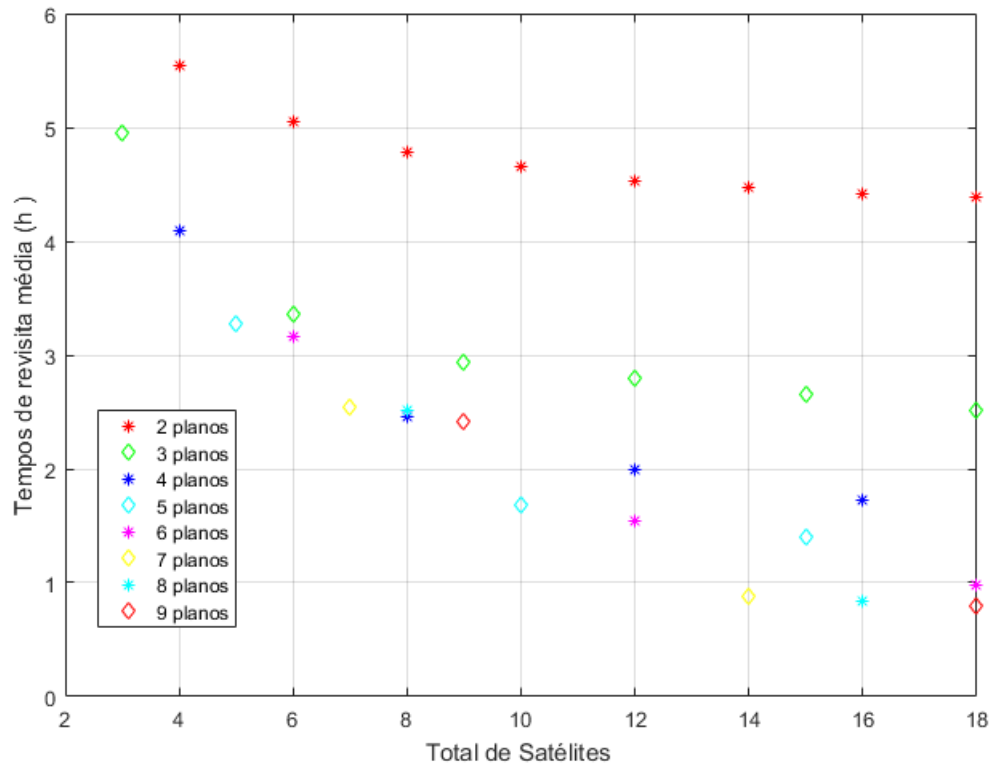


FIGURA 5.22 – Revisita média em horas para toda a fronteira pelo número de satélites para constelação Polar.

Sendo assim, observamos que o tempo de revisita inferior ou igual a 2 horas (conforme adotado nas hipóteses) é obtido para 10 satélites (com 5 planos), valendo também para 12 (com 4 e 6 planos), 14 (em 7 planos), 15 (em 5 planos), 16 (em 4 e 8 planos) e 18 (com 6 e 9 planos).

Outrossim, um raciocínio semelhante é empregado no estudo dos percentuais de acesso, no qual a altitude também é fixada em 800 km e o espaçamento relativo  $F = 0$ , além da RAAN ser indiferente na análise. Os resultados são os encontrados na Figura 5.23, onde

temos uma visão geral da influência da variação do número total de satélites e da variação do número de planos orbitais.

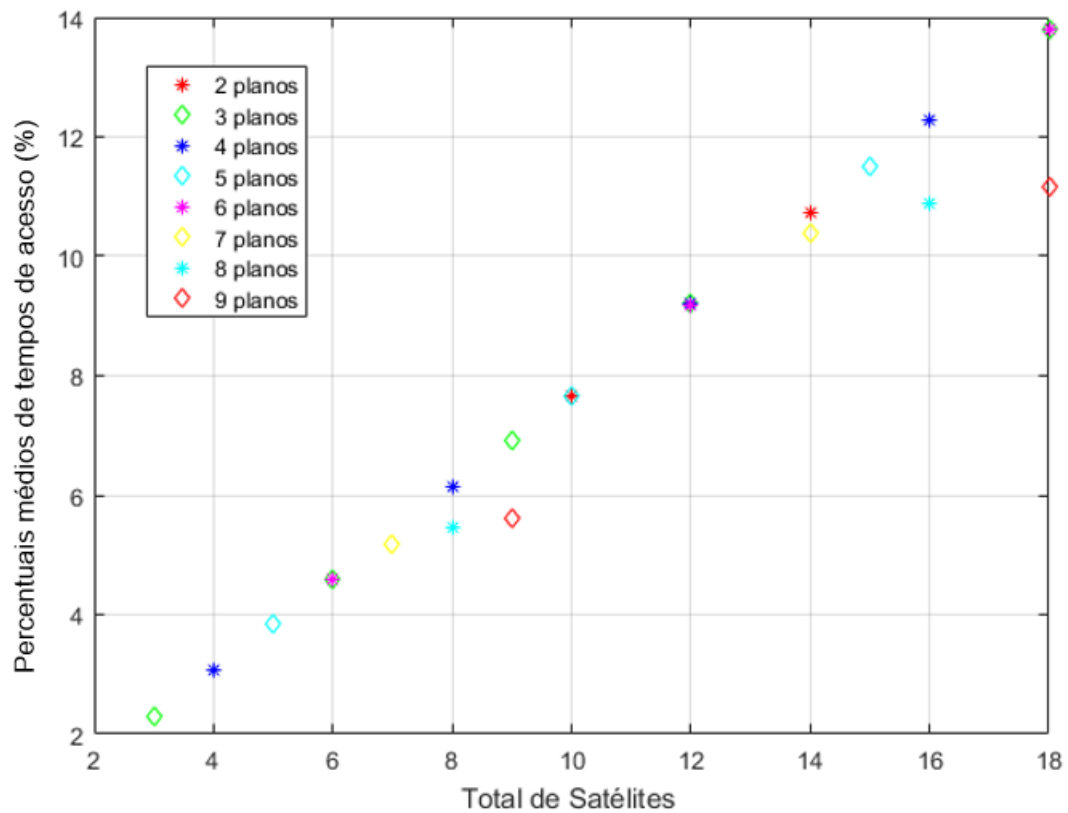


FIGURA 5.23 – Percentual de tempo de acesso médio (em %) para toda a fronteira pelo número de satélites para constelação Polar.

Observa-se que o valor adotado por hipótese de no mínimo 5% de tempo de acesso é encontrado a partir de 6 satélites, para qualquer combinação do número de planos, fazendo com que o tempo de revisita seja um *driver* mais importante para as melhores escolhas das configurações de constelações Polares

Deste modo, considerando os resultados que confirmam a hipótese inicial escolhida e reduzindo as opções desconsiderando valores de  $T$  maiores que 14 e  $P$  maiores que 6, tanto para o tempo de revisita quanto para o percentual de acesso, obtemos como conjunto solução para as constelações Polares na Tabela 5.14, desconsiderando eventuais variações provocadas pela alteração do espaçamento relativo entre planos adjacentes.

TABELA 5.14 – Dados do conjunto solução específico para o uso de constelações Polares.

Parâmetro	Valor
Total de satélites ( $T$ )	10 / 12
Número de Planos Orbitais ( $P$ )	5 / 4
Espaçamento relativo ( $F$ )	0
Altitude	800 km
Ascensão reta do nodo ascendente	$[0^{\circ}, 360^{\circ})$

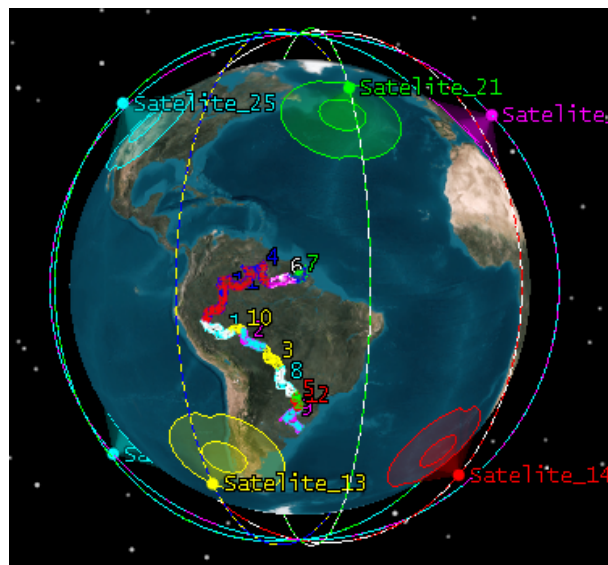
Por fim, são obtidos os resultados da Tabela 5.15 para os valores numéricos das figuras de mérito em estudo para as configurações da constelação Polar que representam a melhor solução compromisso para a missão.

TABELA 5.15 – Dados das figuras de mérito (médio para as 12 áreas) para o conjunto solução para as constelações Polar.

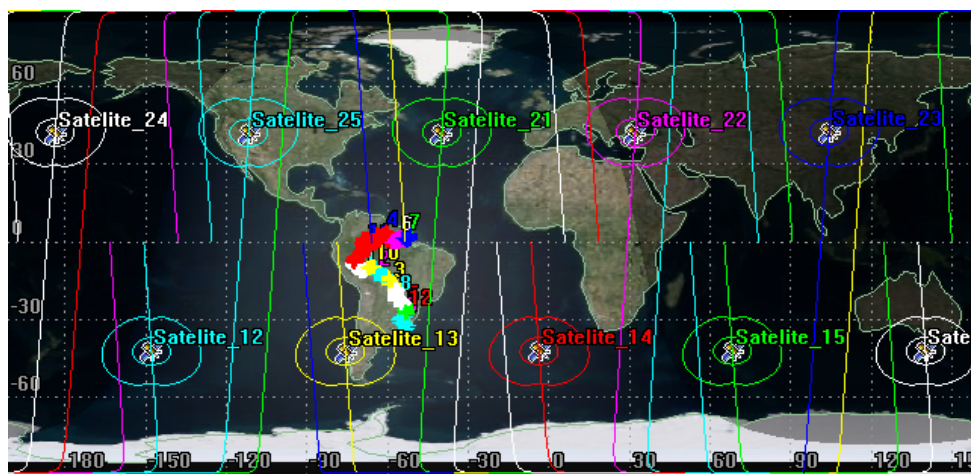
Fig. de Mérito	Tempo de revisita	Percentual de tempo de Acesso
<b>10 5 0</b>	1 hora 41 min e 13 s	7,56% - 1,81 hora/dia
<b>12 4 0</b>	1 hora 59 min e 20 s	9,20% - 2,21 horas/dia

Assim como para as constelações *Walker*, as representações das órbitas tridimensionais e do traçado na Terra (*ground track*) para as constelações do tipo Polar do conjunto solução do problema de monitoramento da fronteira terrestre são apresentados nas Figuras 5.24 (a, b) e 5.25 (a, b).



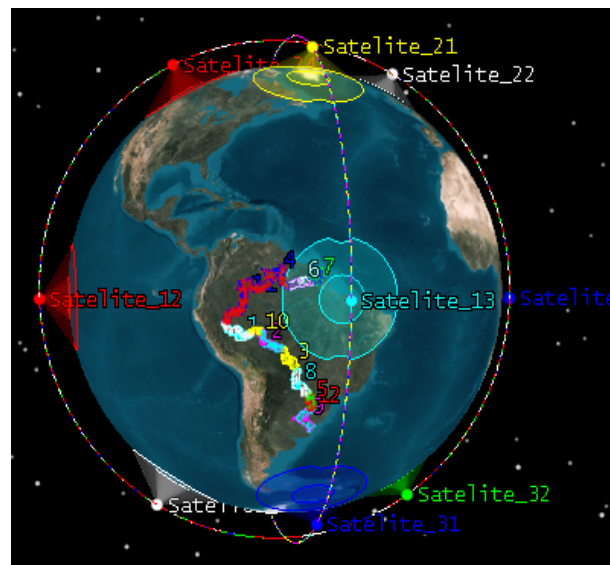


(a) Representação tridimensional

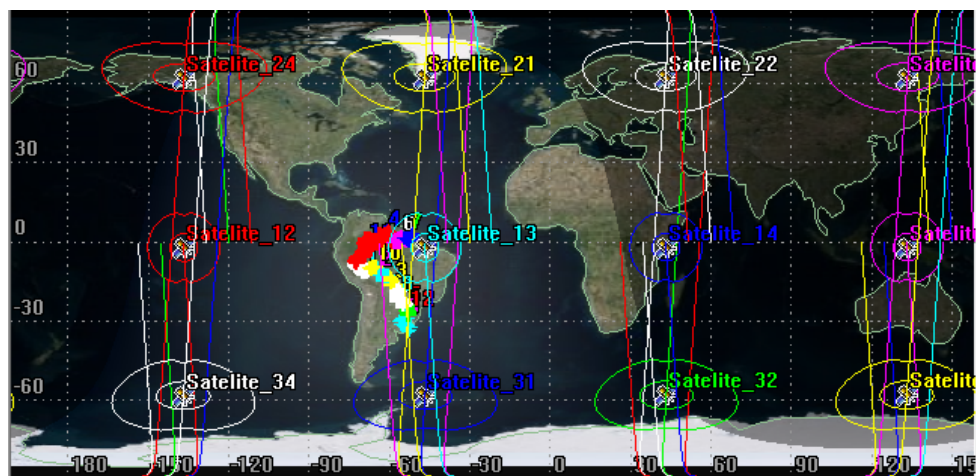


(b) Ground Track das órbitas

FIGURA 5.24 – Representações gráficas da constelação Polar 8|4|0.



(a) Representação tridimensional



(b) Ground Track das órbitas

FIGURA 5.25 – Representações gráficas da constelação Polar 12|4|0.

## 6 Conclusões

No contexto da utilização de constelações de satélites para o monitoramento da fronteira terrestre brasileira, pode-se concluir que é possível realizar a cobertura de todas as regiões da fronteira, tanto para constelações do tipo *Walker*, quanto do tipo Polar. Ademais, deve-se destacar ainda a obtenção de cobertura total para toda a área de interesse, permitindo assim que as soluções propostas sejam viáveis para toda a extensão da fronteira.

Para o uso das constelações *Walker*, verifica-se que a altitude apresenta influência direta no tempo de revisita e no percentual de acesso, linearmente decrescente no primeiro caso e linearmente crescente no segundo. Deste modo, torna-se mais interessante uma escolha de maiores altitudes para aumentar a cobertura, embora ocasionem uma menor resolução espacial dos sensores utilizados. Ademais, foi observado que a inclinação mais indicada para este problema de constelações *Walker* é de  $25^\circ$ , promovendo uma maior uniformidade na cobertura de toda a região da fronteira, com cobertura total em todas as áreas em estudo. Por fim, nota-se ainda que existe uma queda aproximadamente exponencial nos tempos de revisita com o aumento do número de satélites, também sendo importante a variação do número de planos para a mudança desses tempos. Já o percentual de tempo de acesso é atingido de forma a aumentar o seu valor numérico com o aumento do número de satélites, embora a variação do número de planos seja menos importante. Por fim, foi verificado que mudanças no argumento do nodo ascendente não ocasionam mudanças em nenhuma das figuras de mérito estudadas, resultado diferente do espaçamento relativo, embora as taxas de variação dos espaçamentos relativos sejam menos importantes que as de outros fatores, como por exemplo total de satélites na constelação e altitude.

Sendo assim, foram selecionadas duas configurações para constelação de *Walker* interessantes para o conjunto solução do problema de monitoramento, sendo elas:  $25^\circ:6|3|0$  e  $25^\circ:8|4|0$ . Os tempos de revisita encontrados foram de cerca de 1 hora e 43 minutos para 6 satélites e de cerca de 1 hora e 11 minutos para 8 satélites, enquanto que os percentuais de cobertura são de cerca de 11,8% (para  $T = 6$ ) e de 13,8% (para  $T = 8$ ). Cabe ressaltar que essas constelações foram escolhidas considerando como parâmetros mais relevantes um tempo de revisita inferior a 2 horas, percentual de cobertura superior a 5% e o menor

número de satélites e de planos orbitais possíveis, barateando os custos de uma eventual missão de lançamento dessa configuração.

Os resultados obtidos no estudo da utilização de constelações *Walker* para o monitoramento da fronteira terrestre brasileira foram satisfatórios, ou seja, foi possível obter um conjunto de melhores soluções com um tempo de revisita e um percentual de acesso condizentes com as hipóteses pré-estabelecidas.

Conclusões semelhantes em termos de altitude, total de satélites, número de planos, espaçamento relativo e argumento do nodo ascendente são encontrados no problema do tempo de revisita e do percentual de tempo de acesso no monitoramento da fronteira terrestre brasileira com o uso de constelações Polares.

Neste contexto, o conjunto solução do problema de monitoramento para constelações Polares é composto por: 10|5|0 e 12|4|0. Os tempos de revisita encontrados foram de cerca de 1 hora e 41 minutos para 10 satélites e de 1 hora e 59 minutos para 12 satélites, enquanto que os percentuais de cobertura são de cerca de 7,5% (para  $T = 10$ ) e de 9,2% (para  $T = 12$ ). Verifica-se que esses valores apresentam um número maior de planos e satélites, fazendo com que essa escolha de constelação seja potencialmente menos interessante que a de *Walker* em termos financeiros, o que poderia ser esperado, devido à perda de um grau de liberdade na análise da constelação Polar e pelo fato da região em estudo possuir muitas regiões equatoriais, enquanto que a constelação Polar tem por característica uma menor cobertura na linha do plano do equador e uma maior cobertura nos polos do planeta.

Ademais, convém ressaltar que os resultados obtidos considerando a utilização de constelações do tipo Polar também foram satisfatórios. Sendo assim, mais uma vez foi possível obter um conjunto de soluções com um tempo de revisita e um percentual de acesso condizentes com as hipóteses pré-estabelecidas.

Por último, o estudo das melhores soluções compromisso para o monitoramento da fronteira terrestre do Brasil pode ser atualizado com a realização de simulações considerando outros tipos de constelações, como a *Ellipso* e a *Flower*, verificando a existência de possíveis configurações com menos satélites capazes de realizar a missão desejada. Ademais, o estudo presente pode ser complementado com a análise da importância da variação de outros parâmetros, como a propagação do argumento do nodo ascendente (aqui desconsiderado), que pode ser importante na análise final de todos os resultados encontrados. Além disso, o uso de uma altitude de 800 km pode interferir na resolução da imagem capturada pelo sensor, então esse parâmetro também deve ser levado em conta ao se considerar o uso das soluções propostas nesse trabalho em uma eventual missão espacial. Convém ressaltar que esse estudo pode ser utilizado como o início do desenvolvimento de uma pesquisa voltada para projetos de monitoramento de regiões em específico do país, cumprindo eventuais necessidades do governo do Brasil.

# Referências

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A.; ROMER, R. H. **Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables**. [S.l.]: American Association of Physics Teachers, 1988.

ADAMS, W.; RIDER, L. Circular polar constellations providing continuous single or multiple coverage above a specified latitude. **Journal of the Astronautical Sciences.**, n. 35, p. 155 – 192, 1987.

AGI. **STK Coverage**. [S.l.], 2018. Acesso em 31 de maio de 2020. Disponível em: <[https://lsas-tec.co.jp/wp-content/themes/lsas-tec/pdf/7\\_CoverageProductSpecsheet.pdf](https://lsas-tec.co.jp/wp-content/themes/lsas-tec/pdf/7_CoverageProductSpecsheet.pdf)>.

ANDRADE, I. O.; CORTINHAS, J. S.; SOARES, M. A.; GU, L. Sistema integrado de monitoramento. IPEA, Rio de Janeiro, 2019.

ARAUJO, T. **Fronteiras brasileiras - Os limites do nosso território**. 17 de julho de 2018. Acesso em 10 de maio de 2020. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/de-onde-vem-as-drogas-as-rotas-do-traffic-no-mundo/>>.

BALLARD, A. H. Rosette constellations of earth satellites. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, p. 656 – 673, 1980.

BRASIL, A. **Quem são e de onde vêm os 11 mil refugiados que estão no Brasil**. 25 de julho de 2019. Acesso em 12 de abril de 2020. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/brasil/quem-sao-e-de-onde-vem-os-11-mil-refugiados-que-estao-no-brasil/>>.

CASTIEL, D.; DRAIM, J.; MANNING, K. F. Ellipitical satellite system which emulates the characteristics of geosynchronous satellites. 1999.

CHEN, X.; DAI, G.; REINELT, G.; WANG, M. A semi-analytical method for periodic earth coverage satellites optimization. **IEEE Communications Letters**, n. 22, p. 534–537, 2018.

CHOBOTOV, V. A. **Orbital mechanics**. [S.l.]: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.

CURTIS, H. **Orbital Mechanics for Engineering Students**. Waltham, USA: Elsevier Ltd, 2010.

- DAI, G.; CHEN, X.; FERNANDEZ, E.; REINELT, G.; WANG, M.; NGUYEN, T. N. Analysis of satellite constellations for the continuous coverage of ground regions. **Journal of Spacecraft and Rockets**, n. 54, p. 1294–1303, 2017.
- DECICINO, R. **SISFRON e seus subsistemas**. Janeiro de 2013. Acesso em 07 de setembro de 2020. Disponível em: <<https://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia-fronteiras-brasileiras-os-limites-do-nosso-territorio.htm>>.
- EASTON, R.; BRESCIA, R. Continuously visible satellite constellations. 1969.
- ELY, T.; CROSSLEY, W.; WILLIAMS, E. Satellite constellation design for zonal coverage using genetic algorithms. **Journal of the Astronautical Sciences**, n. 47, p. 207–228, 1999.
- ESA. **ESA Operational Missions – Sentinel-1**. 2014. Acesso em 07 de agosto de 2020. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/sentinel-1>>.
- FRANCESCHETTI, G.; PERNA, S. M. Sar sensor trajectory deviations: Fourier domain formulation and extended scene simulation of raw signal. **IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING**, n. 44, 2006.
- FRAYSSINHES, E. Investigating new satellite constellation geometries with genetic algorithms. In: ASTRODYNAMICS CONFERENCE. [S.l.], 1996.
- GALATI, G.; PERROTA, G.; GIROLAMO, S. D.; DELLAGO, R.; GENTILE, S.; LANARI, F. Study of an integrated communication, navigation and surveillance satellite system for air traffic management. In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL RADAR CONFERENCE. [S.l.], 1996. p. 238–241.
- GOBETZ, F. W. Satellite networks for global coverage. **Advances in astronautical sciences**, p. 134 – 156, 1963.
- HANSON, J.; EVANS, M.; TURNER, R. Designing good partial coverage satellite constellations. n. 2901, 1990.
- HOUGH, M. Orbits near critical inclination, including lunisolar perturbations. **The Analytic Sciences Corporation**, 1980.
- KECHICHIAN, J. A. Orbit plane control strategies for inclined geosynchronous satellite constellation. **Journal of spacecraft and rockets**, n. 35, p. 46–54, 1998.
- KLUEVER, C. A.; TANCK, G. S. A feedback control law for stationkeeping with on-off thrusters. **Astrodynamics** 1997, p. 387–399, 1997.
- KONIGSMANN, H. J.; COLLINS, J. T.; DAWSON, S.; WERTZ, J. R. Autonomous orbit maintenance system. **Acta Astronautica**, n. 39, p. 977–985, 1996.
- KUGA, H. K.; CARRARA, V.; RAO, K. R. 2011.
- LAMY, A.; PASCAL, S. Station keeping strategies for constellations of satellites. **NASA STI/Recon Technical Report A**, n. 95, p. 819–833, 1993.

- LANDIM, H. Sisfron: Ferramenta de ampliação da diplomacia militar brasileira e fortalecimento do cds. **Política Hoje**, 2013.
- LANG, T. J. Symmetric circular orbit satellite constellations for continuous global coverage. **ASDY.**, p. 1111–1132, 1988.
- LEE, H. W.; JAKOB, P.; SHIMIZU, K. H. abd S.; YOSHIKAWA, S. Optimization of satellite constellation deployment strategy considering uncertain areas of interest. **Acta Astronautica**, n. 153, p. 213–228, 2018.
- LEE, H. W.; SHIMIZU, S.; SHIMIZU, S.; HO, K. Satellite constellation pattern optimization for complex regional coverage. feb 2020.
- MA, D.-M.; HSU, W.-C. Exact design of partial coverage satellite constellations over oblate earth. **Journal of Spacecraft and Rockets**, n. 34, p. 29–35, 1997.
- MA, J.; MENG, Y.; ZHU, X.; HE, S.; GAO, Y. Optimal design of low-earth-orbit satellite constellation for regional fast revisit. **SCIENTIA SINICA Technologica**, Science China Press., Co. Ltd., v. 48, n. 2, p. 170–184, jan 2018.
- MORTARI, D.; PARK, K.; WILKINS, M. Uniformly distributed flower constellation design study for global navigation system. In: THE 14TH AAS/AIAA SPACE FLIGHT MECHANICS MEETING. [S.l.], 2004.
- MOZHAEV, G. The problem of the continuous earth coverage and the kinematically regular satellite networks. **Cosmic Research**, n. 11, 1973.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica: Mecânica (vol. 1)**. [S.l.]: Editora Blucher, 2013.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de física básica: Eletromagnetismo (vol. 3)**. [S.l.]: Editora Blucher, 2015.
- PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMMA, F. F.; SANTOS, A. R.; SILVA, G. G. Radares imageadores (sar) orbitais: tendências em sistemas e aplicações. In: . [S.l.: s.n.], 2015. p. 2506 – 2513.
- PETTY, C.; BREAKWELL jay. Satellite orbits about a planet with rotacional symmetry. **Journal of The Franklin Institute**, 1960.
- RADARSAT. 2020. Acesso em 22 de outubro de 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/radarsat>>.
- ROCCO, E. M. **Manutenção orbital de constelações simétricas de satélites utilizando manobras impulsivas ótimas com vínculo de tempo**. Tese (Doutorado) — INPE, 2002.
- ROCHA, C. **Base normativa e proposições legislativas sobre fronteiras no Brasi**. [S.l.], 2016. Disponível em: <[https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/estudos-e-notas-tecnicas/publicacoes-da-consultoria-legislativa/areas-da-conle/tema21-/2016\\_19322\\_legislacao-sobre-fronteiras-no-brasil\\_claudionor-rocha](https://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/estudos-e-notas-tecnicas/publicacoes-da-consultoria-legislativa/areas-da-conle/tema21-/2016_19322_legislacao-sobre-fronteiras-no-brasil_claudionor-rocha)>. Acesso em: 17 de julho de 2020.

- SANTOS, W.; LOURES, L. E. V.; GONALVES, L. D.; CASALE, D. E.; SILVA, F. de C.; SILVA, M. de C.; CABRAL, P. L. P. A study about the possible constellations of cubesats for brasilian needs. **IV IAA Latin American CubeSat Workshop**, Agosto 2020.
- SARNO, S.; GRAZIANO, M. D.; D'ERRICO, M. Polar constellations design for discontinuous coverage. **Acta Astronautica**, n. 127, p. 367–374, 2016.
- SHTARK, T.; GURFIL, P. Low earth orbit satellite constellation for regional positioning with prolonged coverage durations. **Advances in Space Research**, Elsevier BV, v. 63, n. 8, p. 2469–2494, abr. 2019.
- SILVA, M. de C.; SANTOS, W.; GONALVES, L. D. Estudo da variação do total de satélites em constelações walker para monitoramento da fronteira terrestre brasileira. **XXII Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa**, p. 106–110, Setembro 2020.
- SINGH, L. A.; WHITTECAR, W. R.; DIPRINZIO, M. D.; HERMAN, J. D.; FERRINGER, M. P.; REED, P. M. Low cost satellite constellations for nearly continuous global coverage. **Nature Communications**, Springer Science and Business Media LLC, v. 11, n. 1, jan 2020.
- SOUZA, F. S.; SANTANA, B. S.; BORGES, M. C.; PORFÍRIO Ée S.; BRISOLA, H.; MENEGHETI, B. C. **Sistema integrado de monitoramento de fronteiras (SISFRON): a defesa nacional em rede**. Agosto de 2018. Acesso em 16 de maio de 2020. Disponível em: <<https://jus.com.br/artigos/68330/sistema-integrado-de-monitoramento-de-fronteiras-sisfron-a-defesa-nacional-em-rede>>.
- WALKER, J. Circular orbit patterns providing continuous whole earth coverage. **Circular Orbit Patterns Providing Continuous Whole Earth Coverage.**, n. 70211, 1970.
- WALKER, J. Continuous whole-earth coverage by circular-orbit satellite patterns. **Royal Aircraft Establishment Farnborough (United Kingdom).**, 1977.
- WALKER, J.; CHRISTY, J.; HARRINGTON, R. Positions of planets and natural satellites. **The Astronomical Journal.**, 1978.
- WERTZ, J. **Orbit Constellation; Design Management**. New York: Springer, 2001.



## FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 25 de novembro de 2020	3. DOCUMENTO Nº DCTA/ITA/TC-064/2020	4. Nº DE PÁGINAS 124
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: CONSTELAÇÕES DE PEQUENOS SATÉLITES PARA MONITORAMENTO DA FRONTEIRA TERRESTRE BRASILEIRA			
6. AUTOR(ES): Mateus de Castro Silva			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Fronteira Terrestre do Brasil; Monitoramento; Constelações de satélites; Walker; Polar (Street of coverage)			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Microssatélites; Monitoramento; Constelações; Satélites; Fronteiras; Engenharia aeroespacial			
10. APRESENTAÇÃO: (X) Nacional ( ) Internacional ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial. Orientador: Dr. Willer Gomes dos Santos; coorientadora: Dr <sup>a</sup> Liana Dias Gonçalves. Publicado em 2020.			
11. RESUMO: Este trabalho apresenta a aplicação da metodologia do uso de constelações de satélites para o problema do monitoramento da fronteira terrestre brasileira, buscando entender como as figuras de mérito de tempo de revisita e de percentual de tempo de acesso são alterados com as variações dos parâmetros desse tipo de sistema. Para isso, foram utilizados dois <i>softwares</i> de forma a realizar simulações convenientes e otimizá-las, sendo eles o MATLAB® e o STK®, permitindo que fosse possível a obtenção dos valores numéricos de interesse nesse estudo. Buscou-se, portanto, a obtenção das melhores soluções compromisso para o estudo do monitoramento da fronteira terrestre brasileira. Neste contexto, foram considerados o uso de dois tipo principais de padrões de constelações dentre os mais abordados pela literatura, sendo eles o <i>Walker</i> e o Polar (ou <i>Street of Coverage</i> ). Foram identificadas duas principais soluções para cada caso, sendo elas as configurações 25º:6/3/0 e 25º:8/4/0 para o uso de <i>Walker</i> e 10/5/0 e 12/4/0 para a Polar, onde a altitude encontrada é de 800 km e o argumento do nodo ascendente é arbitrário. Os tempos de revisita encontrados foram todos inferiores a 2 horas, enquanto que o percentual de tempo de acesso foram todos superiores a 5%, mas inferiores a 15% do tempo de simulação.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO ( ) RESERVADO ( ) SECRETO			