



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.27.19.32-TDI

UM ESTUDO SOBRE A FORMAÇÃO DE GELO EM AERONAVES NO BRASIL A PARTIR DE ANÁLISE MULTIESPECTRAL DE IMAGENS DE SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS

Fernando Gonçalves Brandão

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Meteorolo-
gia, orientada pelo Dr. Carlos Fre-
derico de Angelis, aprovada em 28
de março de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DQDGRE>>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.27.19.32-TDI

UM ESTUDO SOBRE A FORMAÇÃO DE GELO EM AERONAVES NO BRASIL A PARTIR DE ANÁLISE MULTIESPECTRAL DE IMAGENS DE SATÉLITES GEOESTACIONÁRIOS

Fernando Gonçalves Brandão

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Meteorolo-
gia, orientada pelo Dr. Carlos Fre-
derico de Angelis, aprovada em 28
de março de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3DQDGRE>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Brandão, Fernando Gonçalves.
B733e Um estudo sobre a formação de gelo em aeronaves no Brasil a partir de análise multiespectral de imagens de satélites geoestacionários / Fernando Gonçalves Brandão. – São José dos Campos : INPE, 2013.

xxvi + 90 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.27.19.32-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientador : Dr. Carlos Frederico de Angelis.

1. formação de gelo em aeronaves. 2. análise multiespectral.
3. Brasil. I.Título.

CDU 551.501.8

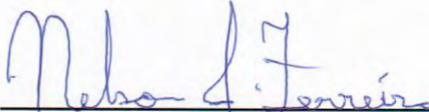


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

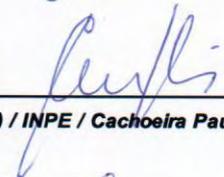
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Meteorologia

Dr. Nelson Jesus Ferreira



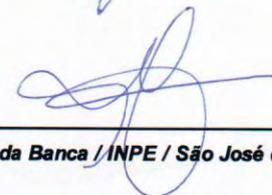
Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Carlos Frederico de Angelis



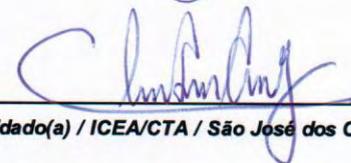
Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Dra. Simone Marilene Sievert da Costa
Coelho



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Cleber Souza Corrêa



Convidado(a) / ICEA/CTA / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Fernando Gonçalves Brandão**

São José dos Campos, 28 de Março de 2013

“O Homem é do tamanho do seu sonho”.

Fernando Pessoa

**A meus queridos filhos Lucas e Pedro,
pelos valiosos momentos que deixamos de desfrutar juntos,
para que este trabalho pudesse ser realizado.**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me dado condições de prosseguir no caminho da vida.

A meus pais e familiares, que sempre me apoiaram em todos os momentos da vida; em especial à minha querida mãe, professora Rosa, por ter sempre apoiado e possibilitado os meus estudos.

Ao meu orientador, Dr. Carlos Frederico de Angelis, pela cordialidade, orientação e incentivo ao tema escolhido para estudo.

Aos companheiros da Divisão de Satélites e Sistemas Espaciais (DSA), em especial ao Dr. Wagner Flauber Araujo Lima, pelos momentos compartilhados e pela atenção dispensada.

Ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), por ter possibilitado o acesso ao Mestrado em Meteorologia, do tão renomado Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Ao INPE, pela oportunidade do conhecimento.

Ao Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA), em especial às pessoas do Tenente-Coronel Esp Met Cléber Souza Corrêa e Major Esp Met José Avanir Machado Nogueira Filho, pelo apoio durante o período do Programa de Mestrado.

Ao Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA), em especial à pessoa do Maj Esp Met Robson Ressurreição, pelo pronto apoio quando necessário.

A todos os companheiros de turma, aos professores e funcionários do INPE, pela cordial e respeitosa convivência, durante todo o período de curso.

A todos aqueles que não foram citados, mas que, de qualquer forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

As aeronaves que circulam no espaço aéreo brasileiro estão constantemente sujeitas a condições meteorológicas que causam impacto na economia, eficiência e segurança das operações. Eventos formação de gelo em aeronaves – acreação de gelo na superfície aerodinâmica – são exemplos dessas ocorrências impactantes. Nas Regiões de Informação de Voo de Curitiba e Brasília, onde estão localizados os setores de tráfego com maior movimentação aérea, a frequência de sistemas meteorológicos tais como frentes frias, frentes quentes, linhas de instabilidade e sistemas convectivos organizados favorecem a presença das condições meteorológicas necessárias para a ocorrência dos eventos de formação de gelo em aeronaves. Nesse trabalho, inicialmente foi realizada uma investigação detalhada sobre as características de 82 eventos registrados. Os eventos ocorreram durante todos os meses do ano e parte significativa dos eventos foi de intensidade moderada ou severa. Apenas 28% dos reportes ocorreram em cenário estratiforme, mas foram responsáveis pela maioria dos casos severos. A avaliação da temperatura média do topo das nuvens mostrou que 80% dos pixels associados aos casos de formação de gelo em aeronaves tinham temperatura entre -2°C e -20°C . A distribuição espacial dos casos mostrou que houve uma tendência de concentração nas rotas que unem os aeroportos de maior movimentação de voos. A maior fração dos eventos ocorreu acima de 4000 metros. Foi aplicada a análise multiespectral de imagens obtidas a partir de 4 dos 5 canais do satélite GOES-12, para a obtenção de limiares empíricos, para serem usados como ferramenta objetiva de detecção e monitoramento. Resultados de verificação indicam que a técnica e os limiares empregados tiveram sucesso em detectar e monitorar nuvens com potencial de provocar a formação de gelo em aeronaves.

A STUDY ON AIRCRAFT ICING OVER BRAZIL FROM ANALYSIS OF GEOSTATIONARY SATELLITES MULTISPECTRAL IMAGES

ABSTRACT

Aircraft that flight over Brazilian airspace are constantly subject to weather conditions that impact the economy, efficiency and safety of operations. Aircraft icing- the formation of ice on the aerodynamic surface - are striking examples of such occurrences. In Flight Information Regions of Curitiba and Brasilia, where there are the sectors with greater air traffic movement, the frequency of weather systems such as cold fronts, warm fronts, squall lines and organized convective systems favor the presence of the meteorological conditions necessary for the occurrence of icing events. This work initially performed a detailed investigation on the characteristics of 82 events recorded. The events occurred during every month of the year and a significant fraction of the events was of moderate or severe intensity. Only 28% of the reports occurred in stratiform scenario, but were responsible for the most severe cases. The evaluation of the average temperature of the cloud tops showed that 80% of the pixels associated with cases of aircraft icing have temperature between -2°C and -20°C . The spatial distribution of cases showed that there was a tendency to concentrate on routes linking the busiest airports handling flights. The largest fraction of events occurred above 4000 meters. Multispectral analysis was applied using four channels from Geostationay Operational Environmental Satellite imager to determine empirical thresholds, to be used as an objective tool for detection and monitoring. Verification results indicate that the technique and the thresholds employed were successful in detecting aircraft icing clouds.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1: Distribuição de frequências dos acidentes ou incidentes no período de 1982 a 2000.....	6
Figura 2.2: Balanço de forças sobre uma aeronave.....	9
Figura 2.3: Formação de gelo em aeronave.....	9
Figura 2.4: Porcentagem de nuvens sem a presença de gelo (curvas 1 e 2) e porcentagem de nuvens com a presença de gelo (curvas 3 a 6).....	14
Figura 2.5: Normalização entre o número de eventos de FGA e os dados de precipitação.....	21
Figura 2.6: Diagrama de dispersão mostrando os valores de temperatura e de UR associados a cada AIREP de FGA, ocorrido em nuvem ou precipitação.....	23
Figura 2.7: Esquema ilustrando o espectro eletromagnético.....	25
Figura 2.8: Índice imaginário de refração para a água e o gelo de 3 a 13 μ m.....	30
Figura 2.9: Albedo de espalhamento simples para nuvem de água líquida e nuvem de gelo para R_e de 5, 20 e 100 μ m Figura 2.10: Índice imaginário de refração para a água e o gelo de 3 a 13 μ m.....	31
Figura 3.1: Representação da área geográfica coberta pela FIR-BS. Figura 2.12: Índice imaginário de refração para a água e o gelo de 3 a 13 μ m.....	37
Figura 3.2: Representação da área geográfica coberta pela FIR-CW Figura 2.12: Índice imaginário de refração para a água e o gelo de 3 a 13 μ m.....	38
Figura 4.1: Distribuição espacial dos AIREPs de FGA na FIR-BS, considerando a intensidade e o período de avaliação.....	46
Figura 4.2: Distribuição espacial dos AIREPs de FGA na FIR-BS, considerando a intensidade e o período de avaliação.....	47
Figura 4.3: Representação da área geográfica coberta pela FIR-CW Figura 2.12: Índice imaginário de refração para a água e o gelo de 3 a 13 μ m.....	48
Figura 4.4: Distribuição de frequências relativas do grau de severidade dos AIREPs de FGA.....	49

Figura 4.5: Distribuição de frequências relativas do nível de voo (altitude) dos AIREPs de FGA para todos os casos analisados.....	50
Figura 4.6: Distribuição de frequências relativas do nível de voo (altitude) dos AIREPs de FGA para os casos em cenário estratiforme.....	50
Figura 4.7: Distribuição de frequências relativas por mês do ano para os 82 casos analisados.....	51
Figura 4.8: Distribuição de frequências relativas dos pixels estratiformes associados aos 22 eventos de FGA em cenário estratiforme.....	52
Figura 4.9: Diagrama de dispersão mostrando a relação entre a intensidade reportada, a TTN média e seu respectivo desvio padrão como parâmetro de textura.....	54
Figura 4.10: Análise de diagrama de caixa da diferença de temperatura de brilho entre os canais 2 e 4 do GOES-12, para os 6 alvos em estudo.....	56
Figura 4.11: Análise de diagrama de caixa da diferença de temperatura de brilho entre os canais 2 e 4 do GOES-12, para os 4 alvos que tiveram temperatura de topo no intervalo de FGA.....	58
Figura 4.12: Diagrama de dispersão mostrando as diferenças de temperatura de brilho entre os canais 4 e 6 plotadas versus a temperatura de do topo das nuvens (canal 4). A curva empírica permite discriminar falsas assinaturas de nuvens Cirros Finos sobre Estratos (CFS) e de nuvens Cirros Finos sobre Continente de nuvens com potencial de FGA.....	62
Figura 4.13: Diagrama de dispersão apresentando a diferença entre os canais 2 e 4 do GOES-12 versus a reflectância normalizada (canal 1). As linhas verticais e horizontais identificam os limiares.....	64
Figura 5.1: Análise de superfície para 12UTC (a) e 18UTC (b) do dia 02 de agosto de 2011. As isóbaras são as linhas amarelas, as isotermas são as linhas tracejadas em azul, as isoípsas são as linhas tracejadas em vermelho. A frente fria e o ciclone extratropical são indicadas.....	72
Figura 5.2: Campos de escoamento e velocidade meridional em 850 hPa, gerados a partir de dados de reanálise do NCEP, sendo (a) 12 UTC e (b) 18 UTC. O ponto em preto indica a localização do evento de FGA.....	73
Figura 5.3: Imagem de satélite do canal IR das 1430UTC (a) e imagem MAXCAPPI 400km das 1445UTC (b). O polígono em vermelho indica a região do evento de FGA.....	74
Figura 5.4 Diagrama Skew <i>T</i> -logp mostrando os perfis de temperatura (°C), ponto de orvalho (°C) e de direção e velocidade do vento (kt), obtidos pela estação de radiossondagem de Porto Alegre, no dia 02 de agosto de 2011 às 1200 UTC. A isoterma de 0°C está evidenciada pela linha diagonal em preto.....	75

- Figura 5.5: Diagramas Skew T -logp mostrando os perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$) e de direção e velocidade do vento (kt), obtidos pelas estações de radiossondagem de Santa Maria (a) e Uruguaiana (b), no dia 02 de agosto de 2011 às 1200 UTC. Em ambos os diagramas, a isoterma de 0°C está evidenciada pela linha diagonal em preto.....76
- Figura 5.6: Fotos do gelo formado no trem de pouso (a), na parte inferior da asa (b), no parabrisa (c) e na parte frontal da asa (d).....77
- Figura 5.7: Imagem gerada a partir da análise multiespectral baseada nos dados do imageador do satélite GOES-12 para o dia 02 de agosto de 2011 às 1430 UTC. As áreas realçadas em azul indicam a presença de nuvens com potencial de FGA. O ponto em negrito mostra a região onde foi reportada FGA pela aeronave.....79
- Figura 5.8: Sequência temporal, a cada 15 minutos, de imagens geradas a partir da análise multiespectral. As áreas realçadas em azul representam nuvens com potencial de FGA.....80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Canais espectrais do imageador do satélite GOES-12.....	27
Tabela 2.2: Intervalos de temperatura associados à FGA para os diferentes tipos de nuvens disponíveis no algoritmo de classificação de nuvens do satélite <i>CloudSat</i>	35
Tabela 4.1: Estatísticas da diferença de temperatura de brilho entre os canais 2 e 4 do satélite GOES-12, para os 6 alvos – Formação de Gelo em Aeronaves (FGA), Nuvem Quente (NQ), Cirros Espessos (CE), Cirros Finos sobre o Continente (CFC), Cirros Finos sobre Estratos (CFS) e Cirros sobre Céu Claro (CCC) - para o período noturno. N representa o número de observações.....	55
Tabela 4.2: Estatísticas da diferença de temperatura de brilho entre os canais 2 e 4 do satélite GOES-12, para os 4 alvos que na amostragem, apresentaram TB no canal 4 no intervalo de FGA – Formação de Gelo em Aeronaves (FGA), Cirros Finos sobre o Continente (CFC), Cirros Finos sobre Estratos (CFS) e Cirros sobre Céu Claro (CCC) - para o período noturno. N representa o número de observações.....	57
Tabela 4.3: Quadro resumo genérico dos cálculos estatísticos realizados numa ANOVA.....	59
Tabela 4.4: Quadro resumo dos cálculos estatísticos realizados na ANOVA para comparação de significância estatística entre as médias dos 4 alvos amostrados que tiveram temperatura de topo no intervalo de FGA.....	60
Tabela 4.5: Resultados dos cálculos estatísticos realizados no teste Tukey para comparação de significância estatística entre as médias, duas a duas, dos 4 alvos amostrados que tiveram temperatura de topo no intervalo de FGA....	61
Tabela 4.6: Essa Tabela apresenta a data e horário dos casos que foram selecionados na FIR-CW e o respectivo mecanismo forçante relacionado.....	65
Tabela 4.7: Tabela de contingência para a avaliação da detecção dicotômica (e.g. Sim/Não). Os elementos nas células representam a contagem dos pares de detecção/observação.....	66
Tabela 4.8: Parâmetros estatísticos utilizados no processo de verificação.....	67
Tabela 4.9: Tabela mostrando os valores obtidos na verificação para os pares de detecção/observação, para 1230 UTC.....	68
Tabela 4.10: Tabela mostrando os valores obtidos na verificação para os pares de detecção/observação, para 2330 UTC.....	68
Tabela 4.11: Resultados do processo de verificação para 1230 UTC e 2330 UTC.....	69

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC	<i>Alto cumululus</i>
AIREP	<i>Informação Meteorológicas de Aeronaves</i>
AIRMET	<i>Aviso de Tempo Significativo para voos em níveis altos</i>
ALS	<i>Água Líquida Superresfriada</i>
AOPA	<i>Aircraft Owners and Pilots Association</i>
AS	<i>Altostratos</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
CAL	<i>Conteúdo de Água Líquida</i>
CB	<i>Cumulonimbos</i>
CH	<i>Canal</i>
CI	<i>Cirros</i>
CIP	<i>Current Icing Potencial</i>
CLIP	<i>CloudSat Icing Potential</i>
CMV	<i>Centro Meteorológico de Vigilância</i>
DECEA	<i>Departamento de Controle do Espaço Aéreo</i>
DEPV	<i>Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Voo</i>
DMSF	<i>Defense Meteorological Satellite Program</i>
DTB CH2-CH4	<i>Diferença de Temperatura de Brilho entre os canais 2 e 4 do GOES-12</i>
DTB CH4-CH6	<i>Diferença de Temperatura de Brilho entre os canais 4 e 6 do GOES-12</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
FAB	<i>Força Aérea Brasileira</i>
FGA	<i>Formação de Gelo em Aeronaves</i>
FIR-BS	<i>Região de Informação de Voo de Brasília</i>
FIR-CW	<i>Região de Informação de Voo de Curitiba</i>
FL	<i>Nível de Voo</i>
GAMET	<i>Previsão de Área para Voos em Níveis Baixos</i>
GGG	<i>Gotículas Grandes Superresfriadas</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
HIRS2-MSU	<i>High-Resolution Infrared Sounder 2 – Microwave Sounding Unit</i>
ICECAP	<i>Icing Enhanced Cloud-top Altitude</i>
IR	<i>Infravermelho</i>
LEV	<i>Leve</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MCA	<i>Manual do Comando da Aeronáutica</i>
METAR	<i>Observação Meteorológica Regular de Aeródromo</i>
MOD	<i>Moderada</i>
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MVD	<i>Diâmetro-Volume Mediano</i>
NC	<i>Nível de Congelamento</i>
NS	<i>Nimbostratos</i>
OACI	<i>Organização da Aviação Civil Internacional</i>
ONU	<i>Organização das Nações Unidas</i>

REDEMET	<i>Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica</i>
SEV	<i>Severa</i>
SIGMET	<i>Aviso de Tempo Significativo para voos em níveis altos</i>
SIGWX	<i>Carta de Tempo Signicativo</i>
SISCEAB	<i>Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro</i>
SMMR	<i>Scanning Multichannel Microwave Radiometer</i>
SSM/I	<i>Special Sensor Microwave Imager</i>
TB	<i>Temperatura de Brilho</i>
TTN	<i>Temperatura do Topo da Nuvem</i>
UR	<i>Umidade Relativa</i>
VANT	<i>Veículo Aéreo Não Tripulado</i>
VIS	<i>Canal Visível do GOES-12</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	<i>Graus Celsius</i>
dB	<i>Decibel</i>
FT	<i>Pés</i>
g	<i>Gramma</i>
hPa	<i>HectoPascal</i>
km	<i>Quilômetro</i>
KT	<i>Nós</i>
L	<i>Litro</i>
m	<i>Metro</i>
min	<i>Minuto</i>
T _B	<i>Temperatura de Brilho</i>
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i>
Z	<i>Refletividade</i>
µm	<i>Micrômetro</i>

SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 Motivação.....	1
1.3 Objetivos.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Impactos nas atividades aéreas.....	8
2.3 Informações de aeronaves.....	10
2.4 Aspectos microfísicos.....	12
2.5 Gotículas grandes superresfriadas.....	16
2.6 Graus de severidade.....	18
2.7 Relação da FGA com sistemas meteorológicos em escala sinótica.....	19
2.8 A FGA e a observação de superfície e por radiossondagem.....	20
2.9 O espectro da radiação.....	24
2.10 A interação das nuvens com a radiação visível e infravermelha.....	26
2.11 O canal IR (10.7 μm).....	27
2.12 O canal visível (0.6 μm).....	28
2.13 Diferença de temperatura de brilho entre os canais 2 e 4 (3.9 μm - 10.7 μm).....	29
2.14 Diferença entre os canais 4 e 6 (10.7 μm - 13.3 μm).....	32
2.15 A aplicação de satélites meteorológicos na detecção de nuvens com potencial de formação de gelo em aeronaves.....	33
3 DADOS E METODOLOGIA.....	37
3.1 Áreas de estudo.....	37

3.2 Dados de Reporte de Aeronave (AIREP).....	38
3.3 Dados de satélite.....	38
3.4 Dados de superfície.....	39
3.5 Dados de radiossondagem.....	39
3.6 Dados de Reanálise do NCEP/NCAR.....	39
3.7 METODOLOGIA.....	39
3.7.1 Análise das características dos AIREPs de FGA.....	39
3.7.2 Classificação dos AIREPs por cenário meteorológico.....	40
3.7.3 Análise de TTN dos AIREPs de FGA em cenário estratiforme.....	41
3.7.4 Análise multiespectral discriminante.....	41
3.7.5 Verificação da técnica e dos limiares.....	43
3.7.6 Análise de caso.....	43
4 RESULTADOS.....	45
4.1 Classificação dos AIREPs por cenário meteorológico.....	45
4.2 Características dos AIREPs de FGA.....	45
4.3 Análise Multiespectral Discriminante – Período noturno.....	54
4.4 Análise Multiespectral Discriminante – Cirros.....	61
4.5 Análise Multiespectral Discriminante – Período Diurno.....	62
4.6 Verificação.....	64
5 ANÁLISE DE CASO.....	71
5.1 Cenário sinótico.....	71
5.1.1 Análise sinótica de superfície.....	71
5.1.2 Análise sinótica de altitude.....	72
5.2 Análise de dados de satélite e radar.....	73
5.3 Análise do perfil atmosférico.....	74
5.4 Análise de fotos do gelo formado na aeronave.....	76
5.5 Cenário meteorológico atuante.....	78
5.6 Exemplo de aplicação da análise multiespectral.....	78
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	83
6.1 Conclusões do trabalho.....	83
6.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

Nas atividades de aviação civil, gerenciamento de tráfego aéreo e prontidão aérea militar e policial, dentre as significativas condições meteorológicas impactantes para as aeronaves, aquelas que oferecem potencial para a formação (acreação) de gelo na superfície aerodinâmica da aeronave são objeto de grande preocupação, por causa do impacto na economia, eficiência e, principalmente, na segurança das operações aéreas. Com o aumento da demanda das operações aéreas, civis e militares, as informações meteorológicas aeronáuticas têm sido cada vez mais solicitadas e exigidas, em relação ao cumprimento dos requisitos operacionais dos usuários, sendo elementos críticos no planejamento de voos.

Os eventos de formação de gelo em aeronaves, ocasionados pela presença de nuvem de água líquida ou precipitação super-resfriada, por oferecerem grande risco à atividade aérea, vêm sendo amplamente pesquisados. Essas pesquisas, a partir de aeronaves instrumentadas e de técnicas de sensoriamento remoto, podem ser utilizadas para apoiar nos voos técnicos do processo de certificação de aeronaves, pelas indústrias aeronáuticas, e a implantação e operacionalização de sistemas de detecção das condições meteorológicas que favorecem a ocorrência do fenômeno.

No Brasil, a presente Dissertação, de forma pioneira, traz um estudo detalhado sobre os reportes de formação de gelo em aeronaves ocorridos num período de 7 anos, feitos por aeronaves voando as duas Regiões de Informação de Voo de maior movimento e ainda propõe, após ajustes empíricos, a aplicação da análise multiespectral baseada em dados de canais do satélite GOES-12, como ferramenta de monitoramento.

1.2 Motivação

Em âmbito mundial, o fenômeno meteorológico formação de gelo em aeronaves foi responsável pelo maior número de acidentes aeronáuticos (GARCÍA; AGUINALIU, 2003). No Brasil, foram registrados, nos últimos anos, um elevado número de reportes de formação de gelo em aeronaves, com intensidade moderada e/ou severa.

Os dados de satélite podem ser combinados para detectar e monitorar as nuvens com potencial de provocar a formação de gelo em aeronaves (ELLROD; BAILLEY, 2006), servindo como excelente ferramenta objetiva operacional, para uso dos previsores do SISCEAB, no monitoramento ou previsão de curto prazo dessas condições, favorecendo a segurança e gerenciamento de voo em regiões de grande volume de tráfego aéreo no país.

Outra aplicação importante é a utilização dos dados de satélite para a validação de previsões de nuvens de formação de gelo em aeronaves geradas por modelos numéricos do tempo (THOMPSON et al., 1997).

1.3 Objetivos

O objetivo principal dessa pesquisa é avaliar a técnica multicanal de satélite geostacionário para detectar nuvens estratiformes que têm o potencial de ativar a formação de gelo em aeronaves.

Para o alcance do objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Analisar parâmetros característicos associados à formação de gelo em aeronaves, registrados em reportes de voo num período de 7 anos, sobre as Regiões de Informação de Voo de Brasília e Curitiba;
- Testar o uso de multicanais do satélite GOES-12, como ferramenta diagnóstica das condições atmosféricas associadas aos eventos reportados, e ajustar empiricamente limiares adequados;
- Verificar a habilidade de detecção da técnica aplicada e os limiares adotados;
- Realizar estudo de caso para mostrar a aplicabilidade da técnica de análise multiespectral, no monitoramento das condições meteorológicas associadas à formação de gelo em aeronaves.

A descrição resumida do conteúdo de cada capítulo desta Dissertação de Mestrado em Meteorologia é dada a seguir:

No Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica, na qual é feita uma discussão sobre os elementos teóricos envolvidos no trabalho - como a definição de eventos de formação de gelo em aeronaves, seus impactos, aspectos microfísicos e sistemas de detecção -, sobre estudos anteriores - sobre a aplicação de dados de satélite - que servem de embasamento teórico para a metodologia a ser utilizada e para a discussão dos resultados. .

No Capítulo 3, apresentam-se a região de estudo, os tipos de dados a serem utilizados e a metodologia empregada.

No Capítulo 4, apresentam-se os resultados encontrados no desenvolvimento desse trabalho.

No Capítulo 5, desenvolve-se um estudo de caso de formação de gelo em aeronaves com intensidade moderada a severa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

A formação de gelo em aeronaves (FGA) representa um perigo meteorológico em todas as regiões do mundo, para qualquer tipo de aeronave (tripulada ou não) e helicóptero (POLITOVICH, 1989, FUCHS; SCHICKEL 1995).

O aumento das operações aéreas, civis e militares, no Brasil, têm elevado a demanda por informações sobre condições atmosféricas, observadas ou previstas, favoráveis à FGA, a qual oferece mais risco às aeronaves de baixo e médio desempenho, que frequentemente voam dentro de nuvens, em condições meteorológicas para operação por instrumentos. Essas aeronaves geralmente operam em baixas e médias altitudes, onde a presença de água líquida super-resfriada (ALS), na forma de nuvens ou precipitação, é mais frequente.

A FGA pode ocasionar acidentes ou incidentes aeronáuticos com fatalidades. De acordo com um estudo estatístico realizado por Petty e Floyd (2004), a FGA provocou mais de 50 acidentes ou incidentes nos Estados Unidos, no período de 1982 a 2000, os quais resultaram na perda de mais de 800 vidas. Os autores identificaram que a aviação geral, que é composta por aeronaves de pequeno e médio porte, esteve envolvida em grande parte dos eventos. Os acidentes ou incidentes ocorreram ao longo de todo o ano, com pico máximo para o mês de janeiro (inverno no Hemisfério Norte); grande parte ocorreu em regiões montanhosas e próximas a grandes corpos d'água, como, por exemplo, a região dos Grandes Lagos, nos Estados Unidos. A Figura 2.1 esboça a distribuição mensal de frequências dos acidentes ou incidentes.

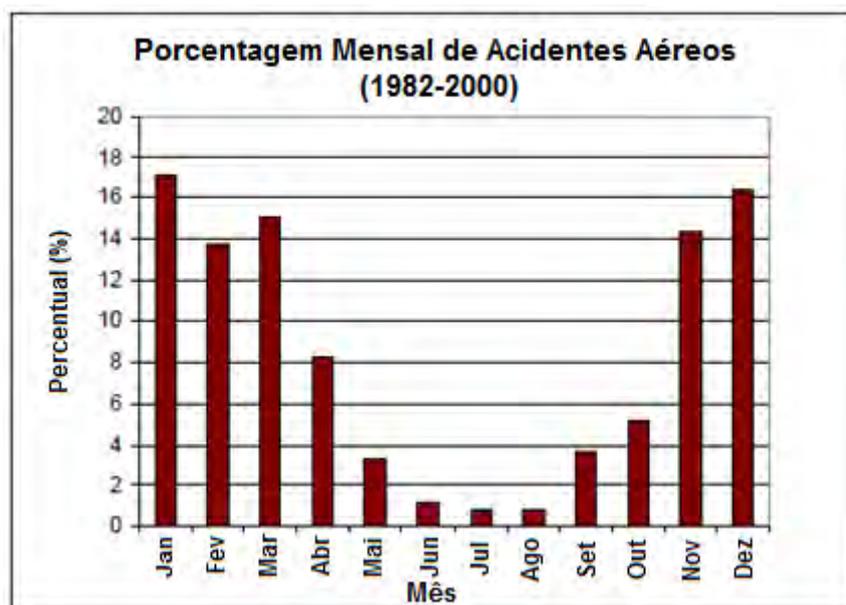


Figura 2.1: Distribuição de frequências dos acidentes ou incidentes no período de 1982 a 2000.

Fonte: Adaptada de Petty e Floyd (2004).

A FGA é a ocorrência de congelamento de gotículas e/ou gotas de ALS sobre partes da estrutura aerodinâmica ou nos sistemas de ar e/ou combustível de uma aeronave em voo ou no solo (*Civil Aviation Authority, 2000*). Da mesma forma que o cumulonimbus (CB) e a turbulência em ar claro, a FGA pode representar um sério perigo à atividade aérea, em todas as fases do voo - subida, cruzeiro e descida. Muitas aeronaves civis e militares voam acima dos limiares de temperatura para a presença de FGA. Todavia, as condições potenciais podem ser encontradas durante todas as fases do voo - de subida, descida, ou em situações de espera em voo, muitas vezes determinada por órgão de controle de tráfego aéreo, em virtude de excesso de tráfego nos aeroportos.

Conforme preconizado pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), organismo da Organização das Nações Unidas (ONU), os provedores de informações meteorológicas com fins aeronáuticos devem diagnosticar e prognosticar áreas com potencial para FGA, de modo que seja garantida a economia, eficiência e, principalmente, a segurança das operações aéreas (*International Civil Aviation Organization, 2010*).

No Brasil, o Sistema de Controle do Espaço Aéreo (SISCEAB), do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), por intermédio de seus centros meteorológicos aeronáuticos, tem a missão de prover informações, observadas ou previstas, sobre regiões do espaço aéreo com potencial de FGA, dentro de sua área de responsabilidade, para apoiar o planejamento de voo, as aeronaves em voo e os profissionais que controlam ou gerenciam a malha aérea. Para cumprir essa tarefa o SISCEAB disponibiliza informações sobre FGA nos seguintes produtos: SIGMET, AIRMET, carta de tempo significativo (carta SIGWX), AIREP e GAMET (DECEA, 2010).

Os SIGMETs fornecem informação de FGA não-convectiva, de intensidade severa, observada ou prevista, e são confeccionados pelos Centros Meteorológicos de Vigilância (CMVs). Poucos AIRMETs, que proveem informação de FGA moderada não convectiva, observada ou prevista, são emitidos, pois a área de cobertura do AIRMET abrange somente o espaço aéreo compreendido entre a superfície e o FL 100 (FL , nível de voo em centenas de pés; nesse caso, 10000FT); geralmente, as condições meteorológicas favoráveis à FGA estão acima daquele limite superior.

As cartas SIGWX podem conter informações de FGA não-convectiva, de intensidade moderada e/ou severa. Nessa carta, a previsão de FGA associada a nuvens convectivas não é explicitamente fornecida. Uma caixa na legenda nesse produto traz uma mensagem a qual alerta os usuários de que as nuvens CB podem implicar em trovoadas, granizo, FGA e turbulência; esses dois últimos fenômenos são reportados na carta somente se a previsão de intensidade for moderada e/ou severa.

Os AIREPs são informações observadas, divulgadas pelos pilotos aos centros de meteorologia aeronáutica e/ou aos órgãos de tráfego aéreo.

A previsão de área GAMET é um prognóstico de FGA moderada não convectiva, para atender principalmente aos voos feitos por aeronaves de baixo desempenho (pequeno porte), que voam até o FL 100 ou FL 150 em regiões montanhosas.

Para confeccionar esses produtos de FGA, os previsores de meteorologia aeronáutica primeiramente avaliam a situação sinótica geral (usando cartas sinóticas padrões de superfície e altitude) - necessária para o entendimento das causas físicas da FGA - observações de superfície para fins aeronáuticos (METAR), campos de AIREPs, perfis atmosféricos (a partir de radiossondagens) e ainda interpretam imagens de satélite

geoestacionário (canais visível e infravermelho termal), com a finalidade de determinar a presença das condições favoráveis. Em seguida interpretam variáveis importantes para o prognóstico da FGA – temperatura, umidade relativa, conteúdo de água líquida e estabilidade atmosférica – usando campos e perfis de modelos meteorológicos de mesoescala.

Já os pilotos, principais usuários dos produtos, são treinados para interpretar e utilizar os produtos meteorológicos aeronáuticos, com o objetivo de mitigar e/ou evitar os fenômenos meteorológicos adversos aos voos.

2.2 Impactos nas atividades aéreas

A FGA oferece efeitos desfavoráveis sobre os voos. Quando a FGA ocorre com intensidade severa, os pilotos em comando geralmente são obrigados a mudar de rota e/ou de nível de voo, com o escopo de minimizar os impactos causados na aerodinâmica da aeronave (SAND et al., 1984).

O gelo quando formado na estrutura da aeronave pode destruir o suave fluxo do ar e, conseqüentemente, aumentar (diminuir) o arrasto (a sustentação) do voo, podendo também causar problemas de controle da aeronave. Sob condições de FGA, moderada a severa, principalmente em uma aeronave de pequeno porte, a continuidade do voo pode se tornar impossível (AOPA, 2002). As Figuras, 2.2 e 2.3, mostram, respectivamente, o balanço de forças e o gelo formado em uma aeronave.



Figura 2.2: Esquema mostrando o balanço de forças que atuam sobre uma aeronave em voo.

Fonte: NASA (2010).



Formação de gelo no bordo de ataque da aeronaves.
Fonte: Nasa

Figura 2.3: Imagem mostrando a formação de gelo em voo no bordo de ataque de uma aeronave.

Fonte: AOPA (2008).

Qualquer aeronave, que cruze ou voe um determinado setor do espaço aéreo, que contenha ALS estará sujeita à FGA. Dependendo da severidade da FGA, o piloto deverá mudar seu nível de cruzeiro, com o objetivo de mitigar o processo de formação do gelo na estrutura da aeronave, sob pena de perder o controle da mesma e vir a sofrer um acidente ou incidente aeronáutico. Essa mudança de nível de cruzeiro, dependendo da demanda de tráfego aéreo, poderá provocar impacto nos órgão de controle e gerenciamento de tráfego aéreo.

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) são ferramentas táticas necessárias para uso policial e militar. O Governo Federal, recentemente, adquiriu aeronaves desse tipo, para aplicação em operações de inteligência da Polícia Federal e da FAB, ao longo das fronteiras nacionais. Segundo Koenig e Kmiec (2002), nas operações aéreas militares estadunidenses na República do Kosovo, os VANTs não alçaram voo quando a FGA fora prevista. Essa doutrina conservadora foi adotada em face da grande vulnerabilidade dos VANTs aos impactos da FGA.

2.3 Informações de aeronaves

As informações meteorológicas de aeronaves (AIREP) são aquelas que devem ser emitidas por qualquer aeronave voando em rotas aéreas, nacionais e/ou internacionais, ou em procedimentos de subida ou descida, bem como as informações fornecidas pelos pilotos, logo após o voo, aos profissionais de meteorologia aeronáutica, verbalmente ou em formulários apropriados (DEPV, 1990).

Os AIREPs são de grande valor para qualquer serviço meteorológico aeronáutico, como complemento de outros conjuntos de dados atmosféricos; operacionalmente, são a única fonte de informações sobre turbulência, em ar claro ou dentro de nuvens, e de ocorrência de FGA. Essas relevantes informações em altitude são utilizadas na confecção e no processo de verificação de previsões (KELSCH; WHARTON, 1996; BROWN et al., 1997).

Esses reportes de aeronaves são classificados como regulares ou especiais; os regulares são de caráter compulsório, independentemente das condições meteorológicas enfrentadas pela aeronave, que, ao sobrevoar determinados fixos estabelecidos em

cartas aeronáuticas, deverão imediatamente confeccioná-lo e divulgá-lo aos Centros Meteorológicos de Vigilância (CMVs) ou aos órgãos de tráfego aéreo da área de jurisdição, por meio de comunicação em radiofrequência. O AIREP especial é confeccionado pelo piloto ao encontrar condições de tempo significativo (e.g. FGA, turbulência, granizo, ondas orográficas e CB) ou por solicitação dos CMVs. Entretanto, há alguns casos em que as aeronaves ficam dispensadas de emitir um AIREP: quando tiverem voo com duração menor do que 2 horas, estiverem a menos de uma hora do ponto de pouso, voando em altitudes menores que 1500 m ou em setores do espaço aéreo com grande demanda de tráfego (DEPV, 1990).

Embora esse tipo de informação seja de grande importância, por ser a única forma direta de confirmação de ocorrência de FGA, ela possui cobertura espacial e temporal intermitente, sendo uma informação de caráter não sistemático. Schultz e Politovich (1992) analisaram um conjunto de dados AIREP de FGA, originados nos Estados Unidos, e verificaram significativa variabilidade nas distribuições espacial, diária, semanal e anual. Nesse estudo ficou evidenciado que a emissão de AIREP segue os padrões (demanda) de tráfego aéreo. Outro ponto citado por esses autores foi a escassez de reportes negativos de condições de FGA. Uma vez divulgada uma informação de FGA, observada ou prevista, atingindo um determinado setor de tráfego aéreo, seria importante que as aeronaves, ao voar esses setores, reportassem se ocorreu a FGA ou não, para que a informação de não ocorrência também seja considerada no processo de verificação dos produtos de detecção ou previsão. Entretanto, há uma tendência geral dos pilotos em relatar somente os casos positivos (SCHULTZ; POLITOVICH, 1992).

O grau de severidade reportada depende de uma avaliação subjetiva, da taxa de acumulação e do conseqüente impacto no voo. Além disso, a análise da frequência de ocorrência de AIREPs de FGA revela que o uso quantitativo dessas informações é limitado, em face das distribuições, espacial e temporal, significativamente não uniformes (SCHULTZ; POLITOVICH, 1992).

As regras aeronáuticas vigentes estabelecem que a localização do AIREP seja feita em relação a fixos aeronáuticos ou em relação a segmentos de rota, contidos nas cartas de voo (DEPV, 1990). Schwartz (1996) asseverou que essa forma de referenciar a localização pode induzir a erros. Como exemplo, citou uma situação localizada com

base em segmento de rota, na qual não é explicitado se o fenômeno de FGA ocorreu ou não ao longo de todo o segmento.

Embora existam importantes limitações em relação ao uso dos AIREPs, no presente estudo, essas informações serão usadas para caracterizar os eventos de FGA ocorridos nas Regiões de Informação de Voo de Brasília e de Curitiba.

2.4 Aspectos microfísicos

As nuvens são elementos-chave na ocorrência ou não de FGA. A compreensão do processo de formação e desenvolvimento de nuvens é de grande importância no processo de estimativa ou previsão das condições meteorológicas favoráveis à FGA.

As nuvens são formadas quando o ar se torna supersaturado em relação à água líquida ou gelo. Esse processo de supersaturação normalmente ocorre devido à ascensão de parcelas de ar; o que resulta em expansão do ar e, por consequência, no resfriamento adiabático. Sob essas condições, o vapor d'água se condensa sobre pequenas partículas sólidas e/ou líquidas presentes no ar, chamadas de núcleos de condensação, formando uma nuvem de pequenas gotículas (WALLACE; HOBBS, 2006); são classificadas em quentes ou frias. Aquelas cujo topo está completamente abaixo da isoterma de 0°C são caracterizadas como quentes. Somente gotículas de água líquida estão presentes nas nuvens quentes. A estrutura microfísica desse tipo de nuvens pode ser descrita pelos seguintes parâmetros: conteúdo de água líquida (CAL), concentração de gotículas e espectro de gotículas. O CAL é a razão entre a quantidade de água líquida por unidade de volume de ar, sendo geralmente expresso em gramas por centímetro cúbico. A concentração de gotículas representa o número total de gotículas de água por unidade de volume de ar e é geralmente expressa por um número por centímetro cúbico. Já o espectro de gotículas é a distribuição por tamanho das gotículas de nuvens, sendo geralmente esboçado como um histograma do número de gotículas por centímetro cúbico em vários intervalos de tamanho de gotículas. Essas nuvens quentes são originadas devido à condensação do vapor d'água em ambiente supersaturado sobre a superfície dos núcleos de condensação - processo conhecido como nucleação homogênea; as gotículas podem crescer pela condensação em um ambiente

supersaturado e pela colisão-coalescência com outras gotículas (WALLACE; HOBBS, 2006).

Quando o topo da nuvem ultrapassa a isoterma de 0°C, ela é classificada como nuvem fria. Mesmo sob temperaturas abaixo de 0°C, gotículas de água líquida ainda podem existir nas nuvens; nesse caso, são conhecidas como gotículas superresfriadas. As nuvens frias podem também conter partículas de gelo. Se uma nuvem fria contiver partículas de gelo e gotículas superresfriadas, ela passa a ser classificada como nuvem de fase mista. A formação do cristal de gelo ocorre por meio do processo de nucleação homogênea ou heterogênea. A partir de um limiar de temperatura abaixo da isoterma de 0°C, e em condições de supersaturação, as gotículas superresfriadas se congelam, formando cristal de gelo pelo processo de nucleação homogênea, sem a presença de núcleos de condensação. O caso de formação pela nucleação heterogênea se dá pela deposição das gotículas superresfriadas sobre os núcleos de condensação (WALLACE; HOBBS, 2006).

A temperatura da nuvem é um parâmetro relevante para a formação de gelo em aeronaves, já que significativa formação ocorre somente em nuvem ou precipitação compostas de gotículas superresfriadas. A partir da análise de AIREPs reportando FGA, ocorridos em regiões de acentuada orografia, de observações em superfície e de dados de radiossondagem, Hill (1982) mostrou que nuvens com topo mais quentes (mais frios) do que determinado limiar de temperatura são, primariamente, constituídas de água líquida super-resfriada (partículas de gelo). Segundo o mesmo autor, os limiares identificados variaram entre -20°C e -26°C, em função da intensidade do vento.

Sand et al. (1984), a partir de dados coletados por aeronave instrumentada, investigaram eventos de FGA ocorridos em nuvens estratiformes e cumuliformes, ocorridos entre 0°C e -30°C. Segundo esses pesquisadores, o conteúdo de ALS nas nuvens localizadas acima da isoterma de -20°C foi insignificante para a acreação de gelo na aeronave, e as nuvens estavam compostas primariamente por cristais de gelo.

Schultz e Politovich (1992), a partir da análise estatística de AIREPs, reportaram que apenas 10% de eventos de FGA ocorreram sob temperaturas menores do que -20°C.

Numa abordagem mais conservadora, a faixa de temperatura entre -2°C e -36°C foi considerada como a de probabilidade de formação de gelo em aeronaves por Curry e

Liu (1992), em um estudo climatológico com base em dados múltiplos, cuja área de interesse foi o oceano Atlântico Norte.

Um estudo de comparação entre pesquisas sobre a existência de ALS acima de determinado limiar de temperatura, descrito em Pruppacher (1995), mostrou que a maioria das nuvens acima da isoterma de -20°C era predominantemente composta de partículas de gelo (Figura 2.4).

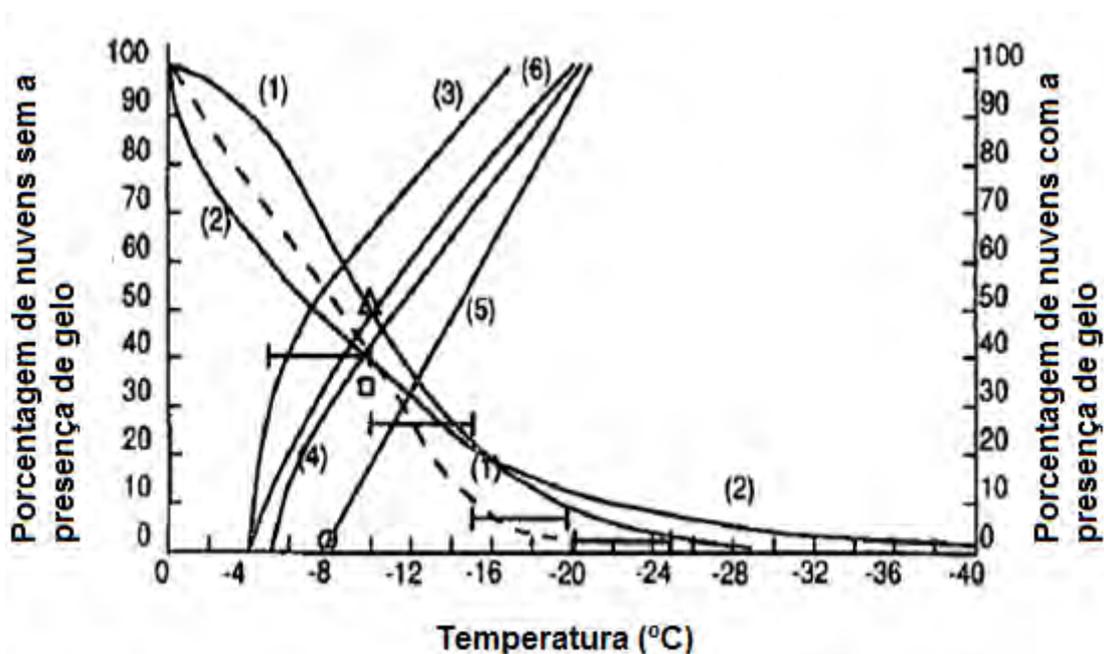


Figura 2.4: Porcentagem de nuvens sem a presença de gelo (curvas 1 e 2) e porcentagem de nuvens com a presença de gelo (curvas 3 a 6).

Fonte: Adaptado de Pruppacher (1995).

Usando medidas de LIDAR, Young et al. (2000) revelaram os seguintes resultados: a presença de ALS foi detectada em 92% do tempo de medição; nos intervalos de temperatura entre 0°C e -05°C ; entre -05°C e -20°C , as porcentagens variaram de 56% a 33%, caindo para 21% entre -20°C e -25°C ; sob temperaturas menores do que -25°C , não foi encontrada a presença de ALS.

Com base nos estudos apresentados, pode-se verificar que as condições favoráveis à FGA são, normalmente, encontradas em nuvens com temperatura entre 0°C e -20°C. Logo, no campo operacional, geralmente os serviços de meteorologia aeronáutica assumem que as nuvens presentes entre as isotermas de 0°C e -20°C apresentam potencial para FGA.

Outra variável a ser considerada é a temperatura da superfície da aeronave. Para que haja a formação de significativa quantidade de gelo em aeronaves, além da presença de ALS, a superfície da aeronave deve estar mais fria que 0°C (*CIVIL AVIATION AUTHORITY*, 2000; CURRY e LIU, 1992).

A quantidade do gelo acreado na superfície da aeronave depende do tempo de exposição, da densidade de ALS presente e da eficiência de coleta. Um aumento nessa eficiência de coleta está relacionado diretamente ao aumento da velocidade da aeronave e ao tamanho das gotículas de ALS (*CIVIL AVIATION AUTHORITY*, 2000).

A FGA pode ocorrer nas seguintes formas: gelo claro (tipo transparente), escarcha (tipo opaco) ou gelo misto. O gelo claro é o tipo mais perigoso e geralmente ocorre associado a nuvens cumuliformes, que apresentam gotículas grandes, ou à precipitação congelante; essa devido à presença de nimbostratus (NS). O tipo escarcha geralmente ocorre associado a nuvens estratiformes, que, ao contrário das cumuliformes, apresentam gotículas menores, sendo seu impacto na aerodinâmica da aeronave menos significativo. Já o gelo misto surge em face da variação do tamanho das gotículas de nuvens, sendo uma mistura entre o tipo claro e o opaco. Em geral, o gelo misto está relacionado às nuvens médias, altostratus (AS) e altocumulos (AC), oferecendo impacto moderado (*CIVIL AVIATION AUTHORITY*, 2000).

O tipo e intensidade de FGA estão diretamente relacionados com a natureza termodinâmica das nuvens e ao tipo de precipitação. As de natureza cumuliforme, consistem, predominantemente, de gotículas de água líquida até a isoterma de -20°C. A presença dessas nuvens entre as isotermas de 0°C e -20°C configura risco de FGA. Aqui as correntes convectivas ascendentes são capazes de transportar gotículas de água até níveis atmosféricos mais elevados, nos quais a temperatura se encontra próxima a 40°C negativos. Entretanto, para temperaturas inferiores a -40°C, a ocorrência de FGA é improvável, pela forte predominância de cristais de gelo (*CIVIL AVIATION AUTHORITY*, 2000).

Entre as isotermas de 0 e -15°C , na presença de nuvens estratiformes, o risco de ocorrência de FGA é considerável. Quando associadas a sistemas frontais ativos ou a forçantes orográficos, a camada com potencial para FGA pode alcançar níveis atmosféricos com temperatura inferior a -15°C , devido à presença de movimentos verticais ascendentes (*CIVIL AVIATION AUTHORITY*, 2000).

Já as nuvens de natureza cirriforme não apresentam risco de FGA, por serem formadas por cristais de gelo (*CIVIL AVIATION AUTHORITY*, 2000). É importante frisar que quanto maior o CAL, maior a taxa de acreação de gelo. Elevados valores de CAL são frequentemente encontrados em nuvens originadas por levantamento frontal e/ou orográfico (*CIVIL AVIATION AUTHORITY*, 2000).

2.5 Gotículas grandes superresfriadas

A FGA causada por gotículas grandes superresfriadas (GGS) pode apresentar um sério risco à aviação, pois as aeronaves não são certificadas para voar sob tais condições meteorológicas.

Dados microfísicos de nuvens obtidos *in loco* por voos de observação meteorológica e informações AIREP tem sido analisados com o objetivo de caracterizar as condições atmosféricas associadas à GGS (SAND et al., 1984; COBER et al., 1996; POLITOVICH, 1989; POBANZ et al., 1994; BERNSTEIN et al., 1997, 1998, 1999 e 2000a ; CORTINAS JR. et al., 2004).

Sand et al. (1984) estudaram dois casos em que a aeronave de pesquisa teve que sair de uma região de FGA, pois a aeronave sofreu fortes reduções na velocidade de cruzeiro; esse impacto foi ocasionado pela presença de GGS com até $300\mu\text{m}$ de diâmetro.

A FGA causada por GGS é provocada por gotículas com diâmetro geralmente entre 30 e $400\mu\text{m}$, alterando significativamente a aerodinâmica do voo (POLITOVICH, 1989). Essas gotículas grandes, antes de se congelar, podem voar ao longo do aerofólio e acrear em superfícies não protegidas pelos equipamentos de degelo e antigelo.

No trabalho de Fuchs e Schickel (1995), voos visuais de helicópteros enfrentaram FGA de intensidade severa, ao voarem dentro de regiões com precipitação de chuvisco congelante, abaixo de nuvens estratiformes.

Em outro estudo, Cober et al. (1996) reportaram que a aeronave de pesquisa foi forçada a abandonar uma região de precipitação de chuvisco, que apresentava gotas com diâmetro de até 500 μm , na faixa de temperatura entre -8°C e -11°C .

As condições meteorológicas favoráveis ao processo de formação de GGS são: nuvens com temperatura de topo entre 0°C e -15°C , fraca instabilidade termodinâmica e aporte suficiente de umidade. Essas nuvens são mais favoráveis porque mitigam a iniciação do gelo, o qual reduz o CAL por meios dos processos físicos de crescimento por deposição e acreção (POLITOVICH, 1989).

Pobanz et al. (1994) avaliaram o grau de cisalhamento em nuvens, a partir de aeronaves de pesquisa. Ficou evidenciado, na maioria dos casos, que a presença de GGS e de cisalhamento estão correlacionadas. Os autores identificaram que, em casos com forte cisalhamento, houve alta concentração de gotículas.

O levantamento climatológico de condições de FGA, associado à presença de GGS em altitude, é de difícil elaboração devido à escassez de medidas diretas desse parâmetro atmosférico. Contudo, as observações de superfície que reportam precipitação do tipo congelante podem ser utilizadas para inferir, parcialmente, as condições de FGA que estejam relacionadas à GGS. Quando uma aeronave voa uma região do espaço aéreo bem próxima a sítios (estações) que reportam, em superfície, chuva/chuvisco congelantes e/ou pelotas de gelo, fica sujeita à significativa ocorrência de FGA nos níveis mais baixos da atmosfera (BERNSTEIN et al., 1997, 1998, 1999 e 2000a).

Hanesiak e Stewart (1995) revelaram que reportes de pelotas de gelo e neve, em superfície, são um forte indicador da precipitação de chuva/chuvisco congelantes, que, conforme visto anteriormente, oferecem grande risco de FGA.

Num estudo de caso de Bernstein et al. (1999), foi demonstrado que a exposição da aeronave à precipitação de chuva congelante pode causar significativa formação de gelo, inclusive nas partes não protegidas pela aeronave.

Sobre esses tipos de precipitação, chuva/ chuvisco congelantes e pelotas de gelo, é importante ressaltar que os mesmos apresentam grande variabilidade espacial em sua frequência anual; em geral, são de curta duração e ocorrem, em grande parte, na estação de inverno em latitudes médias e altas (CORTINAS JR. et al., 2004).

2.6 Graus de severidade

A severidade da FGA é dependente do tipo da aeronave. As aeronaves que possuem bordos de ataque menos espessos são acumuladores de gelo mais eficientes. Por essa razão, aerofólios menores e/ou menos espessos podem sofrer acreação de gelo mais rapidamente do que os aerofólios maiores e/ou mais espessos. Com isso, uma aeronave comercial de grande porte terá, proporcionalmente, menor FGA do que uma aeronave de pequeno porte, cruzando o mesmo ambiente favorável à ocorrência de FGA.

A FGA pode ser classificada como severa quando a taxa de acumulação é tal que os equipamentos antigelo e degelo se tornam ineficazes (*CIVIL AVIATION AUTHORITY*, 2000).

As principais variáveis atmosféricas que governam a intensidade da FGA são o CAL, a temperatura do ar, o tamanho da gotícula e a extensão horizontal da cobertura de nuvens. Nos níveis atmosféricos com temperatura menor do que -20°C , a maior parte das gotículas terá se transformado em partículas de gelo, as quais não aderirão à superfície de uma aeronave que esteja passando. A espessura das nuvens é um fator limitante da severidade da FGA. Isso ocorre nas nuvens típicas de inverno, que possuem pouca espessura, com exceção das associadas aos ciclones. Entretanto, se essas nuvens se tornarem mais desenvolvidas verticalmente, em níveis abaixo de 0°C , geralmente reduz-se o potencial de FGA, devido à diminuição do CAL, pelo processo de formação de neve. Outro fator limitante da FGA é a presença de camada de inversão ou isotérmica acima de nuvens típicas de inverno, mais baixas e frias (GUTTMAN; JECK, 1987).

No caso de níveis atmosféricos com nuvens de fase mista, pesquisas têm demonstrado importante papel da fase de gelo no processo de acreação da ALS. A presença de partículas de gelo entre as gotículas superresfriadas provoca a redução da taxa de FGA. Bain e Gayet (1982), a partir de medições realizadas por aeronaves de pesquisa, em nuvens cumuliformes e estratiformes, identificaram esse efeito, na camada térmica entre -21°C e -08°C , para nuvens cumuliformes; a taxa de FGA foi reduzida em torno de 50%, sendo que a maioria dos máximos de redução ocorreu com temperatura em torno de -20°C . Somente as partículas de gelo com diâmetros maiores do que $200\ \mu\text{m}$ foram consideradas participantes desse processo. A explicação proposta pelos autores foi a de que as partículas de gelo diminuem gradualmente a FGA causada pelas gotículas superresfriadas. Com esse estudo, pôde-se verificar que a fase de gelo (presença de cristais de gelo na nuvem) deve ser considerada na estimativa/previsão de condições de FGA.

2.7 Relação da FGA com sistemas meteorológicos em escala sinótica

O entendimento da relação física entre os sistemas meteorológicos em escala sinótica e a FGA é de suma importância em qualquer método de estimativa ou previsão de regiões com potencial para a formação. Bernstein et al. (1998) examinaram com forte evidência estatística - numa seleção de 37 casos de outono e inverno - características em superfície dos sistemas meteorológicos, mecanismos forçantes de escala sinótica (da superfície até 500 hPa), origem de massas de ar em superfície e tipos de precipitação que chegaram à superfície, com o objetivo de se determinar onde a FGA preferencialmente tende a se formar em relação aos sistemas sinóticos. Aproximadamente 2700 AIREPs de FGA foram comparados a análises de dados operacionais e normalizados em relação à área coberta pelos sistemas meteorológicos.

As massas de ar mais favoráveis à existência de FGA foram a Ártica (continental polar), Costa Oeste e Costa Leste (marítimas polares).

Considerando os mecanismos forçantes, a grande maioria dos reportes de FGA – de intensidades moderadas e/ou severas e do tipo claro ou misto - ocorreu entre 250 e 600 km à frente (no lado frio) de sistemas frontais quentes ativos ou estacionários, onde foram encontradas nuvens de ALS com topos menos frios, baixas temperaturas em superfície, elevado conteúdo de umidade e precipitação leve e contínua, que em alguns

casos foi de natureza congelante; o lado pré-frontal das frentes quentes estacionárias apresentou maior potencial. Poucos AIREPs foram registrados no lado quente desses sistemas.

Com bem menos reportes impactantes do que nos casos de frentes quentes, as áreas - à frente dos sistemas frontais frios do Pacífico continental, dentro dos centros de baixa pressão em superfície, ao longo e imediatamente atrás das frentes frias árticas - foram associadas a condições de FGA mais que média de frequência dos casos estudados.

As áreas - ao longo ou atrás de frentes quentes estacionárias ou ativas, à frente das frentes frias árticas e nas porções centrais de grandes massas de ar (quando distantes de frentes, cavados e baixas) – estiveram associadas a condições de FGA menos que a média de frequência dos casos.

Nesse contexto de sistemas sinóticos, os setores com intenso levantamento de ar quente e úmido e a liberação de calor latente resultam num eficiente processo de formação de cristais de gelo e diminuição da disponibilidade de ALS por acreção.

2.8 A FGA e a observação de superfície e por radiossondagem

A avaliação climatológica de parâmetros atmosféricos que são favoráveis à FGA tem sido realizada a partir de observações de superfície e/ou radiossondagem, de forma isolada ou em associação a outros conjuntos de dados (BERNSTEIN et al., 1997, 1998, 2000a e 2007; YOUNG et al., 2002).

A partir da comparação entre mais de 2700 AIREPs de FGA e dados observacionais de superfície, Bernstein et al. (1997) apresentaram resultados estatísticos indicando forte correlação entre condições de FGA em altitude e a ocorrência de precipitação à superfície e cobertura de nuvens. Os resultados revelaram que a maioria dos AIREPs esteve associada à presença de precipitação de neve ou chuva em superfície, ou a condições de céu encoberto, sem precipitação. Já os eventos mais severos estiveram relacionados a áreas de precipitação congelante, observadas em superfície, ou a condições de céu obscurecido, sem precipitação. Posteriormente em outra pesquisa (BERNSTEIN et al., 2007), identificaram que mais de 98% dos reportes positivos de FGA ocorreram em condições de céu nublado ou encoberto.

Um estudo detalhado, realizado por Grenn (2006), mostrou a relação entre eventos estadunidenses de acidentes e/ou incidentes aeronáuticos e variáveis meteorológicas de superfície. Esses eventos estudados ocorreram no período de 1978 a 2002, sendo a FGA o fator contribuinte. Os resultados da análise evidenciaram forte correlação entre os eventos aeronáuticos (acidentes e/ou incidentes) com a precipitação do tipo congelante, que esteve associada a 33% dos eventos em estudo, embora esse tipo de precipitação representasse apenas 1.8% da precipitação total, ocorrida no período em questão. Os casos de neve e chuvisco congelante se relacionaram a 32% e 12% dos eventos, respectivamente. A Figura 2.5 mostra a relação entre o tipo de precipitação e o número de eventos de FGA.

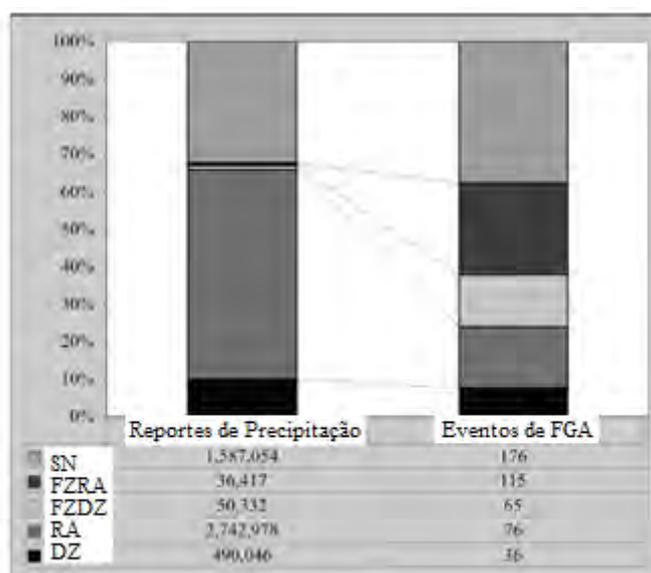


Figura 2.5: Esquema mostrando a normalização entre o número de eventos de FGA e os dados de precipitação.

Fonte: Adaptado de GRENN (2006).

Outros autores relataram condições de FGA causadas por chuva/chuvisco congelantes somente em altitude, ou seja, que não atingiram a superfície; as aeronaves que voaram sob tais condições atmosféricas sofreram FGA, com consequente impacto em suas performances aerodinâmicas (SAND et al., 1984; BERNSTEIN et al., 1999).

Young et al. (2002), usando dados AIREPs, emitidos sobre ou próximos a grandes cidades, e variáveis meteorológicas observadas em superfície, desenvolveram um

modelo estatístico de frequência de FGA, com o uso da teoria de regressão linear. Os resultados apresentados pelos autores foram consistentes com estudos climatológicos apresentados nos parágrafos anteriores.

Semelhante ao trabalho de Young et al. (2002), foi desenvolvido um modelo estatístico com outros parâmetros obtidos em observação de superfície (temperatura de superfície, temperatura do ponto de orvalho, altura do teto de nuvens e visibilidade horizontal), para apoiar a tomada de decisão dos pilotos em geral e, principalmente, da comunidade de pilotos que voam aeronaves não certificadas para condições de FGA. De acordo com a análise, a observação de superfície no momento da ocorrência de eventos de FGA reportou temperaturas entre -2.5°C e 1.75°C , teto de nuvens entre 450 e 1900FT e visibilidade de superfície entre 1.5 e 5.5 milhas com precipitação, ou entre 3 e 10 milhas, sem precipitação. A depressão do ponto de orvalho raramente passou de 3°C (GRENN, 2006).

Considerando que a presença ou não de condições de FGA pode ser estimada a partir de observações de superfície, recentemente, os parâmetros básicos de nuvens e de precipitação à superfície têm sido empregados em técnicas combinadas de estimativa de ALS em altitude, para geração de produtos operacionais. Essas técnicas combinam dados de satélite, radar, radiômetros de microondas, descargas atmosféricas, AIREPs, modelo numérico e METARs (TAFFERNER et al., 2003; LE BOT, 2004; BERNSTEIN et al., 2005; ISAAC et al., 2006).

Bernstein et al. (2007) realizaram um estudo climatológico de FGA e GGS em altitude combinando observações de superfície com perfis verticais de temperatura e umidade. Nesse trabalho, a metodologia empregada na estimativa do topo das nuvens (a base das nuvens foram estimadas pelas observações de superfície) foi baseada nos critérios de Wang e Rossow (1995). Esses autores descreveram um método para estimar os seguintes parâmetros de nuvem: estrutura vertical, altura da base e do topo, espessura e características de multicamadas. No método, a base e o topo da camada são determinados quando 3 critérios de umidade relativa (UR) – em relação à água, sob temperaturas maiores ou igual a 0°C , ou menores que 0°C , em relação ao gelo - são satisfeitos:

- UR máxima maior ou igual a 87%; ou

- UR mínima maior ou igual a 84%; e
- Saltos de UR maiores que 3%.

Numa comparação com observações em superfície feitas por meteorologistas, o método de Wang e Rossow (1995) detectou o mesmo número de camadas, para nuvens baixas e médias, mas apresentou discrepâncias para nuvens altas.

Nesse mesmo trabalho de Bernstein et al. (2007), foi feita uma verificação para um período de 5 anos de perfis de radiossondagens e de observações de superfície com AIREPs de FGA emitidos dentro de um raio de 40 km do sítio de sondagem e durante o horário de ascensão do balão meteorológico (1100-1159Z e 2300-2359Z). Mais de 98% dos AIREPs de FGA ocorreram com céu nublado ou encoberto; e pela análise da Figura 2.6, observa-se que a grande maioria dos casos aconteceu com UR superior a 70% e temperatura entre 0°C e -20°C.

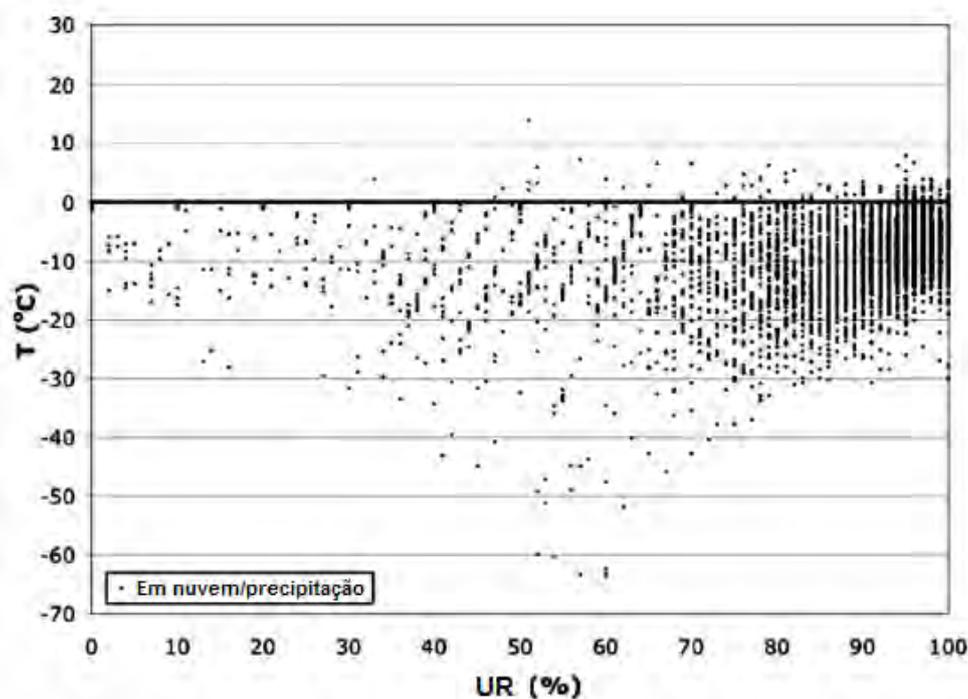


Figura 2.6: Diagrama de dispersão mostrando os valores de temperatura e de UR associados a cada AIREP de FGA, ocorrido em nuvem ou precipitação.

Fonte: Adaptado de Bernstein et al. (2007).

Como na presente Dissertação de Mestrado, são utilizados dados ópticos do imageador do satélite geoestacionário GOES, que permite o monitoramento contínuo do Brasil e da América do Sul, incluindo a vigilância de nuvens de FGA (ELLROD; BAILEY, 2006), para estudar os AIREPs brasileiros de FGA e ainda ajustar e validar as técnicas baseadas em canais do GOES-12, são discutidas, na próxima seção, para melhor compreensão desse trabalho, importantes características relacionadas à transferência radiativa na atmosfera, às propriedades ópticas das faixas espectrais do visível (VIS) e infravermelho (IR) do espectro eletromagnético, e aos canais do satélite GOES-12 que foram aplicados. São discutidos também estudos sobre a aplicação de satélites meteorológicos na detecção de nuvens com potencial de FGA.

2.9 O espectro da radiação

A radiação eletromagnética é um conjunto de ondas que se propagam sob a mesma velocidade, a da luz ($c = 2.998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$, na ausência de matéria) e constitui-se no processo mais importante para a transferência de energia na atmosfera. Os tipos de radiação eletromagnética são: a luz visível, raios gama, raios-X, a luz ultravioleta, a radiação infravermelha, as micro-ondas, os sinais de televisão e as ondas de rádio. Essas ondas radiativas são caracterizadas pelas grandezas comprimento de onda, frequência ou número de onda. A relação entre comprimento e frequência é estabelecida pela equação $f = c / \lambda$, em que f é a frequência, c é a velocidade da luz e λ é o comprimento de onda. A reunião ordenada de todas as ondas eletromagnéticas de acordo com o comprimento de onda ou frequência forma o espectro eletromagnético, que abrange desde ondas mais curtas até ondas mais longas. A Figura. 2.7 apresenta o espectro da radiação eletromagnética. A transferência de energia na atmosfera envolve radiação em duas bandas distintas de comprimento de onda, a radiação de onda curta, emitida pelo Sol, e a radiação de onda longa, emitida pela superfície da Terra e pela atmosfera. O comprimento de onda ou frequência de emissão depende da temperatura dos corpos emissores.

Nome da região	Comprimento de onda (μm)	Frequência (GHz)	Número de onda (cm ⁻¹)
Raios Gamma	10 ⁻¹⁵	3 x 10 ²⁸	10 ¹⁶
Raios X	10 ⁻¹²	3 x 10 ²⁷	10 ¹⁵
Ultravioleta	3 x 10 ⁻¹	10 ¹⁶	0,33 x 10 ¹⁵
Visível			
Infravermelho	1	3 x 10 ¹²	10 ¹⁴
	10 ³		10
Microondas	10 ⁴ (10m)	3 x 10 ¹	1
Nave espacial	10 ⁶	3 x 10 ⁻¹	10 ⁻²
Televisão & FM	10 ⁷	3 x 10 ⁻²	10 ⁻³
Onda curta	10 ⁸	3 x 10 ⁻³	10 ⁻⁴
Ondas de rádio AM	10 ⁹	3 x 10 ⁻⁴	10 ⁻⁵

Violeta 0,4 μm
 Roxo
 Azul
 Verde
 Amarelo
 Laranja
 Vermelho 0,7 μm

Figura 2.7: Esquema ilustrando o espectro eletromagnético.

Fonte: Adaptado de LIOU (2002).

A radiação eletromagnética que se propaga na atmosfera sofre a chamada atenuação atmosférica, através de dois processos, o de absorção e o de espalhamento. Na absorção, parte da energia é absorvida seletivamente por gases constituintes e pelo vapor d'água e reemitida em vários comprimentos de onda. Outra parte da energia que passa pela atmosfera é espalhada, numa quantidade e direção que depende do tamanho dos elementos espalhadores e do comprimento de onda da radiação incidente. Os sensores passivos dos satélites meteorológicos só conseguem monitorar as propriedades das nuvens e sua variabilidade e distribuição espacial e temporal devido à existência das chamadas janelas atmosféricas no espectro eletromagnético, regiões espectrais em que a energia emitida pela superfície terrestre e pelas nuvens passa pela atmosfera sem sofrer absorção (a atmosfera é transparente à radiação em determinados comprimentos de onda).

Nessa pesquisa foram utilizados canais da banda do visível ($0.6\mu\text{m}$) e do infravermelho ($10.7\mu\text{m}$), e ainda a diferença entre os canais $3.9\mu\text{m}$ e $10.7\mu\text{m}$ e a diferença entre os canais de $10.7\mu\text{m}$ e $13.3\mu\text{m}$, para a recuperação de propriedades físicas das nuvens (temperatura de topo e fase) e ainda para realizar a discriminação de nuvens cirros finos, a partir de dados do imageador do satélite GOES-12 (ELLROD; BAILEY, 2006). Os elementos que compõem a estrutura microfísica das nuvens (gotículas de água líquida e/ou cristais de gelo) podem ter diferentes geometrias moleculares, resultando em formas diferentes de absorção, emissão e espalhamento; essa resposta diferenciada pode ser aplicada na identificação remota de alvos de interesse e, no caso do presente estudo, na identificação de nuvens com potencial de formação de gelo em aeronaves.

2.10 A interação das nuvens com a radiação visível e infravermelha

Considerando que a FGA está diretamente relacionada com as nuvens superesfriadas e com a precipitação congelante, é importante compreender aspectos do processo de interação desses alvos com a radiação eletromagnética. A fase de uma partícula de nuvem, o tamanho e densidade determinam qual a quantidade de radiação que é absorvida, espalhada ou transmitida (KEY; INTRIERI, 2000). Os elementos que formam a composição de uma nuvem são as gotículas de água e/ou os cristais de gelo com raio da ordem de $10\mu\text{m}$; já as gotas de precipitação possuem raio de variando da ordem de $100\mu\text{m}$ (chuveiro) a $1000\mu\text{m}$ (chuva). Na banda visível do espectro eletromagnético, as gotículas de nuvem (água líquida) são geometricamente espalhadoras da radiação solar, com pouquíssima absorção, processo físico que aumenta em direção à faixa do infravermelho próximo. Por exemplo, uma nuvem de poucas dezenas de metros de espessura pode espalhar toda a radiação visível incidente sobre ela (KIDDER; HAAR, 1995). Um estudo, conduzido por Welch et al. (1980), verificou que uma nuvem estratos de 2 km de espessura espalha quase 80% da radiação solar que incide sobre o topo de volta ao espaço, absorvendo apenas 0.2%. O restante da radiação, em torno de 20%, é espalhado pela base da nuvem.

Na faixa de janela infravermelha do espectro ($8.5 - 12.5\mu\text{m}$), as gotículas são agentes espalhadores conforme a teoria de Lorenz-Mie, em que as partículas, nesse caso, gotículas nuvens e/ou gotas de precipitação são comparáveis ou maiores que o comprimento de onda da radiação incidente (LIOU, 2002). Todavia, as nuvens agem

como corpos negros e absorvem praticamente toda a radiação infravermelha incidente sobre elas.

Uma particularidade é a interação entre a radiação eletromagnética e as nuvens cirros; essas nuvens possuem transmitância muito maior do que a das nuvens de água líquida, pois as nuvens compostas por cristais de gelo possuem bem menos partículas por unidade de volume do que as nuvens compostas por gotículas, e porque a água é melhor absorvedora do que o gelo (KIDDER; HAAR, 1995).

Nas próximas 3 seções, são discutidos os canais e as análises multiespectrais com o uso dos canais do satélite GOES-12.

A tabela 2.1 mostra os comprimentos de onda dos canais do imageador do satélite GOES-12 e suas respectivas resoluções.

Tabela 2.1: Canais espectrais do imageador do satélite GOES-12.

Canal (CH)	Comprimento de onda (μm)	Resolução (km)
CH1	0.6	1
CH2	3.9	4
CH3	6.5	4
CH4	10.7	4
CH5	--	--
CH6	13.3	8

2.11 O canal IR (10.7 μm)

Nesse comprimento de onda, a energia térmica (infravermelha, onda longa) emitida pela superfície terrestre e pelas nuvens não sofre atenuação significativa pelos gases atmosféricos (pouca absorção), por situar-se numa região de janela atmosférica. O pico de emissão máxima de radiação termal encontra-se próximo ao comprimento de onda

desse canal. Para esse comprimento de onda, a maioria das superfícies e das nuvens apresentam emissividade próxima de 1, sendo, portanto, bem detectadas nesse canal pelos satélites, com exceção das nuvens cirros finos, que são consideradas semitransparentes. A temperatura de brilho estimada pelo satélite, a partir das radiâncias que chegam ao sensor imageador, é muito próxima da temperatura real das superfícies ou dos topos das nuvens (exceto nuvens cirros finos). Nesse canal, o espalhamento pelas partículas de nuvem é considerado desprezível, sendo a interação física com a radiação termal dominada pelos processos de absorção e emissão.

Para a detecção de cirros finos, o canal IR pode ser combinado com o canal de absorção de CO₂; fazendo-se a diferença entre esses canais, é possível obter uma equação empírica para discriminação daquelas nuvens (ELLROD; BAILEY, 2006). Essa técnica é discutida na seção 2.13.

2.12 O canal visível (0.6 μm)

Centrado 0.6μm, na estreita banda do visível, que vai do comprimento de onda de 0.39 μm a 0.76μm, o canal 1 do GOES-12 detecta a radiação solar refletida e/ou espalhada pela superfície da Terra e pelas nuvens, de volta para o espaço. Esse comprimento de onda está compreendido numa região de janela atmosférica, e próximo ao comprimento de onda de máxima emissão da radiação solar ($\lambda = 0.5\mu\text{m}$). A detecção de cobertura de nuvens com o uso do canal visível ocorre em função de contrastes importantes em termos de reflectâncias diferentes, entre as nuvens e as superfícies do continente ou do oceano. As diferenças de reflectância das nuvens de água líquida são função da espessura óptica, do conteúdo de água líquida e também da geometria Sol-satélite, e, numa dependência menor, em função do tamanho da gotícula e do ângulo solar zenital (ALLEN, 1989). Em virtude da dependência da radiação solar, esse canal só pode ser aplicado durante o dia. É um canal com excelente potencial para a detecção de nuvens (espessura, fase, cobertura e convecção) e de núcleos de condensação (WALLACE; HOBBS, 2006).

Ellrod e Bailey (2006) aplicaram o CH1, com a correção para o ângulo zenital, em seu algoritmo multiespectral, baseado nos canais do satélite GOES-12. Num avaliação

empírica, os autores associaram eventos de FGA a valores de CH1 maiores ou igual a 37%.

2.13 Diferença de temperatura de brilho entre os canais 2 e 4 (3.9 μ m - 10.7 μ m)

O canal infravermelho de onda curta em 3.9 μ m (CH2), também situado numa faixa de janela atmosférica, apresenta uma capacidade diferenciada de detecção, sendo de grande utilidade para a detecção de padrões de nuvens (LEE et al., 1997), focos de incêndio (WEAVER et al., 2004) e cobertura de neve (ALLEN, 1990). Nessa região espectral, as radiancias observadas pelo satélite durante o dia incluem contribuição tanto da radiação solar refletida como da radiação termal emitida, que por sua dependem da iluminação solar e das propriedades espectrais de cada tipo de superfície.

Segundo Key e Intrieri (2000), as diferenças radiativas espectrais entre as nuvens de água líquida e de cristais de gelo ocorrem devido às diferenças de absorção e de espalhamento. A Figura 2.9 mostra o índice imaginário de refração, que representa as propriedades de absorção, da água e do gelo, para a faixa espectral de 3 a 13 μ m. Para determinados comprimento de onda (e.g. 3.9 μ m e 10.7 μ m), observa-se que o gelo é mais absorvedor da radiação do que a água líquida, e que, em de 10.7 μ m, há muito mais absorção do que em 3.9 μ m. Assim, a diferença de temperatura de brilho entre 3.9 e 10.7 μ m será maior para nuvens formadas por cristais de gelo do que para nuvens de água líquida.

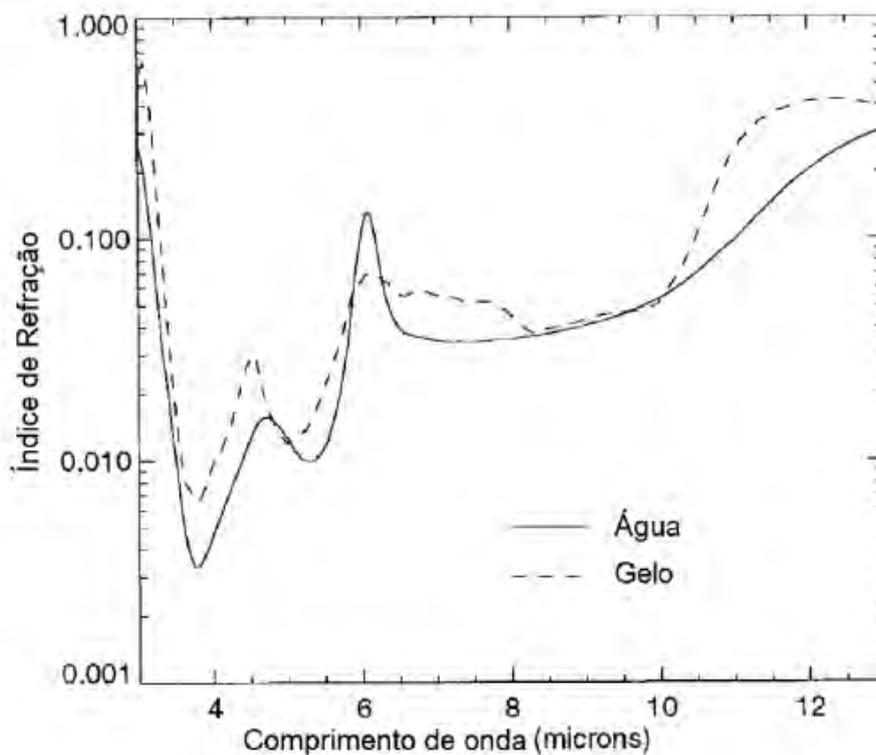


Figura 2.8: Índice imaginário de refração para a água e o gelo de 3 a 13 μ m.

Fonte: Adaptado de KEY e INTRIERI (2000).

Entretanto, as radiâncias medidas pelo sensor do satélite não são somente função do processo de absorção/emissão, mas também do espalhamento e transmitância. O grau de eficácia de espalhamento da radiação incidente pelas partículas de nuvem é representado pelo albedo de espalhamento simples (ω). A Figura 2.10 mostra o ω calculado para nuvens de água líquida e nuvem de gelo de acordo com a teoria de espalhamento Mie, considerando 4 diferentes valores de raio efetivo (R_e). É possível verificar que o espalhamento é maior em 3.9 μ m do que em 10.7 μ m. Esse resultado complementa o princípio físico de absorção mais forte no espectro de onda longa (KEY e INTRIERI, 2000). É possível verificar ainda que quanto menor o R_e da partícula, maior o espalhamento. Ainda nessa mesma análise, os autores verificaram que ω é muito mais dependente do tamanho da partícula do que da fase da partícula. Por isso, o espalhamento das nuvens de água líquida é maior do que das nuvens de cristais de gelo.

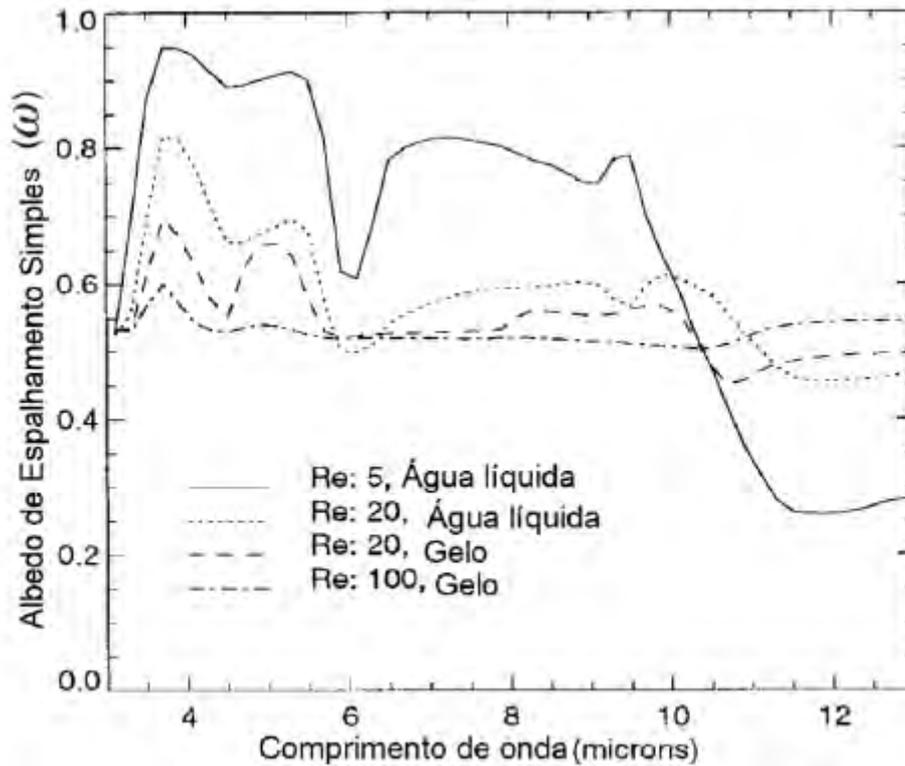


Figura 2.9: Albedo de espalhamento simples para nuvem de água líquida e nuvem de gelo para R_e de 5, 20 e 100 μm .

Fonte: Adaptado de Key e Intrieri (2000).

Assim o CH2 possibilita a detecção da fase e do tamanho da partícula da nuvem.

A DTB CH2-CH4 foi empregada por Ellrod e Bailey (2006) para a detecção de nuvens com potencial de FGA. Durante o dia, os autores aplicam o limiar de 10°C, obtido com o uso de análise discriminante empírica, com base em AIREPs reportados. É importante frisar que os valores de DTB CH2-CH4 durante o dia dependem do ângulo solar zenital, do ângulo zenital do satélite e ainda do tamanho da gotícula (LEE et al., 1997).

No período noturno, o CH2 não apresenta contribuição de espalhamento da radiação solar, sendo a radiância que chega ao satélite composta apenas pela emissão de radiação, nesse comprimento de onda (3.9 μm), do topo das nuvens. Com isso, a diferença de temperatura de brilho entre CH2 e CH4, DTB CH2-CH4, resulta em valores negativos

para as nuvens água líquida espessas com baixos valores de R_e . Para as nuvens de gelo, aquela diferença de temperatura de brilho apresenta na maioria dos casos valores não negativos.

Com base nos princípios físicos teóricos apresentados nessa seção, foram estabelecidas as relações abaixo que podem ser utilizadas para determinar a fase de nuvem a partir da análise multiespectral DTB CH2-CH4, durante a noite (KEY; INTRIERI, 2000):

- 1) Para nuvens gelo, DTB CH2-CH4 será positivo ou próximo de zero tanto para nuvens espessas como para nuvens finas; e
- 2) Para nuvens de água líquida, DTB CH2-CH4 será negativo somente se a nuvem for opticamente espessa ou se a temperatura da superfície for significativamente mais fria do que a da nuvem.

Para o período noturno, Lee et al. (1997), numa avaliação de nuvens estratocumulos marítimos, indicam o intervalo de diferença ideal para a detecção de nuvens de água líquida superesfriada: ligeiramente próximo de $-1^{\circ}\text{C}/-2^{\circ}\text{C}$. Ellrod e Bailey (2006) associam nuvens com potencial de FGA a valores de DTB CH2-CH4 menores ou igual a -2.5°C . Citando Saunders e D'aria (1994), afirmam que um limiar mais alto introduz mais ruído instrumental no CH2, em cenários com temperaturas da superfície abaixo de 0°C , durante período de inverno.

2.14 Diferença entre os canais 4 e 6 ($10.7\mu\text{m}$ - $13.3\mu\text{m}$)

O canal de absorção de CO_2 ($13.3\mu\text{m}$) pode ser aplicado em combinação com o canal IR de janela atmosférica ($10.7\mu\text{m}$), DTB CH4-CH6, para detectar a presença de cirros finos (ELLROD; BAILEY, 2006). Essas nuvens, por serem semitransparentes à radiação emitida, quando sobre nuvens estratos ou sobre cobertura de neve, podem se apresentar como falsas assinaturas de nuvens com potencial de FGA. Para mitigar esse problema, é possível estabelecer empiricamente uma equação para discriminar as nuvens de água

líquida super-resfriada das nuvens, através da relação entre a DTB CH4-CH6 e a TB do CH4.

2.15 A aplicação de satélites meteorológicos na detecção de nuvens com potencial de formação de gelo em aeronaves

Os dados obtidos por satélite meteorológicos, nas faixas espectrais do visível, infravermelho e microondas, têm sido importantes para a detecção e previsão de nuvens que apresentam potencial de provocar a formação de gelo em aeronaves. No início da década de 90, Curry e Liu foram os primeiros pesquisadores a fazer uma estimativa climatológica do potencial de formação de gelo em aeronaves, através de dados de satélite. Nesse estudo, os autores desenvolvem uma climatologia de probabilidade de formação de gelo em aeronaves na região de latitudes médias sobre o Atlântico Norte. A base de dados empregada é formada por radiâncias do sensor *SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer)* do satélite *Nimbus-7*, dados do *3DNEPH (U.S. Air Force Three-Dimensional Nephanalysis)*, reanálise do *ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)*, e radiâncias do *HIRS2-MSU (High-Resolution Infrared Sounder 2 – Microwave Sounding Unit)*.

Desde então, outros pesquisadores se engajaram na aplicação de técnicas de estimativa de potencial de gelo com dados de satélite. Tais técnicas são empregadas na melhoria da análise de potencial de FGA por modelos numéricos (THOMPSON; BULLOCK, 1997), e também na geração de produtos operacionais (ELLROD; BAILEY, 2006).

Lee et al. (1993) utilizaram dados de água líquida integrada (parâmetro nuvem de água líquida) do imageador (canal de 85-GHz) em microondas *SSM/I (Special Sensor Microwave Imager)* do satélite *DMSP (Defense Meteorological Satellite Program)*, dados de temperatura de topo das nuvens obtidas pelo canal infravermelho do *DMSP*, e os níveis de 0°C e -20°C, a partir de saída de modelo numérico. O algoritmo usa o limiar de 0.2 kgm⁻² para valores de nuvem de água líquida e o intervalo de temperatura de topo da nuvem entre 0°C e -20°C, como sendo o de maior potencial para FGA.

Thompson e Bullock (1997), usando análise multiespectral, baseada em dados do sensor *AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)*, mostram um aplicação conservadora da estimativa por satélite na redução da extensão espacial (superestimada) de previsão de formação de gelo em aeronaves, obtidas por modelo numérico (algoritmo simplista de T-UR, temperatura e umidade relativa). A dependência da umidade relativa para diagnosticar/prever nuvem é a fragilidade de modelos que usam aquele esquema. Para mitigar essa debilidade, os autores propõem a aplicação de dados de satélite para produzir uma análise que distingue regiões nubladas de regiões de céu claro, e que delinea as nuvens com topos mais frios do que o nível de congelamento ($NC = 0^{\circ}C$).

Ellrod e Bailey (2006) descrevem um produto chamado *ICECAP (Icing Enhanced Cloud-top Altitude)*, para ajudar a determinar o potencial de formação de gelo a partir do imageador do satélite GOES-12, integrado com as alturas de topo das nuvens, obtidas pelo sondador do GOES-12. Com base em estudos anteriores, os autores resumem os ingredientes mais importantes na formação de gelo em voo (intensidade moderada a severa): fase líquida de nuvens, temperaturas entre 0° e $-20^{\circ}C$, diâmetro-volume médio das gotículas grandes maior que $30\mu m$, movimento ascendente fraco, para repor a água super-resfriada disponível, elevado CAL (0.2 gm^{-3}) e, espessos e extensos sistemas de nuvens, resultando em maior tempo de exposição em voo da aeronave sob condições potenciais de FGA. O parâmetro explícito, temperatura do topo de nuvem (TTN), relacionado ao potencial de FGA, é medido a partir do canal 4, que é o canal de janela $10.7\mu m$. A faixa de TTN utilizada vai de $-1^{\circ}C$ a $-30^{\circ}C$. Segundo os autores, essa faixa de temperatura permite capturar maior percentagem de casos de FGA, por representar o resfriamento com a altura, que é característico de nuvens mais profundas. Durante o dia é aplicada uma correção de ângulo de visada nos dados do canal visível (VIS). Esse procedimento normaliza dos dados e os tornam mais consistentes sobre uma grande área. É realizado então o teste para nuvens de água líquida, através de limiares empíricos, com base na diferença de TB entre CH2 e CH4 ($DTB\ CH2-CH4 > 10$) e com base no CH1 corrigido ($> 37\%$). Durante a noite, as nuvens de água líquida são determinadas quando a diferença de TB entre CH2 e CH4 ($DTB\ CH2-CH4$) é menor ou igual a $-2.5^{\circ}K$. Para minimizar possíveis falsas assinaturas de formação de gelo, por causa da presença de cirros finos, é aplicada uma técnica de triagem de cirros, com base na diferença de TB entre CH4 e CH6 ($DTB\ CH4-CH6$).

O algoritmo CLIP (*CloudSat Icing Potential*), proposto por KAY et al. (2009), combina dados de classificação de nuvem do satélite *CloudSat* com perfis de temperaturas gerados por um modelo atmosférico global, para prover um diagnóstico do potencial de FGA. A Tabela 2.2 mostra os intervalos de temperaturas, por gêneros de nuvem, que são associados com a FGA no CLIP.

Tabela 2.2: Intervalos de temperatura associados à FGA para os diferentes tipos de nuvens disponíveis no algoritmo de classificação de nuvens do satélite *CloudSat*.

Tipos de nuvem	Intervalo de temperatura para FGA
Estratocumulos e Estratos	0°C a -10°C
Alto cumulos e Alto estratos	0°C a -20°C
Cumulus e Nimbostratos	0°C a -25°C
Convecção profunda	---
Cirros, Cirrostratos e Cirrocumulos	Não há FGA

Fonte: Adaptado de KAY et al. (2009).

O *Current Icing Potential* (CIP) é um produto que combina dados de satélite (canais visível e infravermelho), radar, METAR, descargas elétricas e observações de pilotos (AIREPs) com dados de modelo numérico, para gerar um campo diagnóstico do potencial de existência de nuvens de FGA e de GGS. O CIP determina a localização das nuvens e da precipitação, estimando o potencial de FGA e de GGS numa dada porção do espaço aéreo (BERNSTEIN et al., 2005). Esse produto, por considerar várias fontes de dados e também sofisticadas técnicas estatísticas, é considerado o estado da arte do diagnóstico operacional de condições potenciais de FGA.

Minnis et al. (2004), também identificaram o potencial de aplicação de análise multiespectral de dados de satélite na recuperação de parâmetros que dão a estimativa

de condições atmosféricas que podem implicar em FGA, cujas imagens geradas podem ser aplicadas em previsão de curto prazo.

O potencial de aplicação da análise multiespectral noturna no monitoramento de nuvens compostas de gelo ou de água líquida superesfriada, no território brasileiro, foi mencionado por Ferreira et al. (1998), que apresentou resultados a partir de dados do satélite GOES-8, fazendo uso da diferença entre os canais de janela 3.9 μm e o de 10.7 μm .

3 DADOS E METODOLOGIA

Neste estudo, as análises foram feitas para as seguintes áreas de estudo e com a utilização dos seguintes dados:

3.1 Áreas de estudo

As Regiões de Informação de Voo de Curitiba (FIR-CW) e de Brasília (FIR-BS) foram as áreas estudadas nessa pesquisa. Estas FIRs, de maior movimentação aérea no Brasil, estão localizadas em uma região em que a atuação de sistemas meteorológicos de mesoescala e em escala sinótica que favorecem a presença das condições potenciais para a FGA.

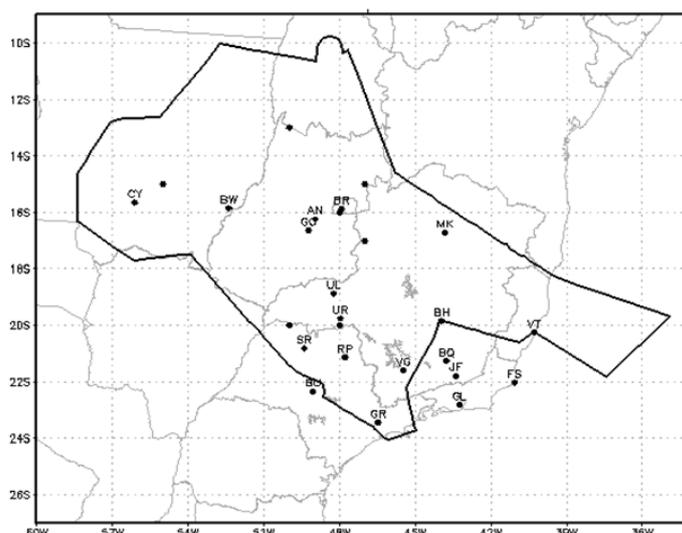


Figura 3.1: Representação da área geográfica coberta pela FIR-BS. Os pontos plotados representam indicativos OACI de aeroportos.

Fonte: REDEMET.

3.4 Dados de superfície

Foram adquiridos junto ao Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA) dados de observações de superfície realizadas por técnicos-meteorologistas que trabalham em estações meteorológicas de superfície classe 1, localizadas nos principais aeroportos da FIR-CW, contendo informações sobre tempo presente, e quantidade e tipo de nuvens.

3.5 Dados de radiossondagem

Foram utilizados os perfis de temperatura e umidade relativa (00 e 12UTC) gerados a partir de medições feitas por radiossondas lançadas pelas estações meteorológicas de altitude (EMA) localizadas na FIR-CW. Esses dados foram obtidos junto a Universidade de Wyoming (Estados Unidos).

3.6 Dados de Reanálise do NCEP/NCAR

Foram utilizados dados de Reanálise do NCEP/NCAR com resolução temporal de 6 h e resolução espacial de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ cobrindo todo o globo terrestre, com 17 níveis na vertical (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 e 10 hPa).

3.7 METODOLOGIA

3.7.1 Análise das características dos AIREPs de FGA

Considerando que o principal objetivo deste trabalho de pesquisa é ajustar e verificar a aplicação da análise multiespectral para estimar áreas com potencial de FGA, e que o AIREP é uma única forma real de medir a ocorrência ou não de FGA, e para melhor conhecimento do fenômeno, foram estudados estatisticamente os parâmetros dos 82 AIREPs relacionados à FGA registrados no banco de dados da REDEMET durante os

anos de 2002, 2003, 2007, 2008, 2009, 2010 e 2011. Os parâmetros – horário, intensidade, altitude, mês e localização geográfica - foram considerados. Com exceção das localizações geográficas de cada AIREP, as quais foram plotadas nos mapas das FIR-BS e FIR-CW, para análise de distribuição espacial, os demais parâmetros foram organizados e analisados a partir da técnica estatística de distribuição de frequência, cujos resultados são apresentados com o uso de histogramas de frequência relativa.

3.7.2 Classificação dos AIREPs por cenário meteorológico

Para executar essa classificação foram utilizadas as TBs do CH4 dos dados do imageador do satélite GOES-10 (para os eventos até novembro de 2009) e as TBs do CH4 dos dados do imageador do satélite GOES-12 (para os eventos a partir de dezembro de 2009). O uso de 2 satélites foi devido à disponibilidade de dados.

Como a maioria dos AIREPs tinha sua localização dada em termos de fixos aeronáuticos, foi necessária realizar procedimento de localização geográfica dos eventos, em termos de latitude e longitude, com o uso de programa de geolocalização do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA). Os seguintes critérios foram adotados:

- foram classificados em cenário convectivo os eventos cujas TTNs médias (considerando uma área de 10X10 pixel (40X40km), estando o evento localizado no pixel central) foram menores do que o limiar de -25°C;
- foram classificados em cenário estratiforme os eventos cujas TTNs médias (considerando uma área de 10X10 pixel, estando o evento localizado no pixel central) ficaram entre 0 °C e -25 °C;
- sempre na análise individual de cada AIREP, foi considerada a observação do satélite GOES disponível com horário mais próximo do horário do evento, antes ou depois, respeitando a janela de 1 hora.

3.7.3 Análise de TTN dos AIREPs de FGA em cenário estratiforme

Após a classificação dos AIREPs de FGA em cenário estratiforme ou convectivo, foi procedida uma análise da temperatura do topo das nuvens estratiformes que provocaram a FGA. Os eventos convectivos não foram considerados, pois já é sabido pela comunidade aeronáutica que esse tipo de nuvem provoca FGA, tendo em vista os aspectos microfísicos das nuvens convectivas. Portanto, o foco dessa pesquisa foram as nuvens estratiformes. Foi elaborada a distribuição das frequências relativas das TTNs médias e ainda foi aplicada a análise de padrão de reconhecimento (através do desvio-padrão). A relação entre a TTN observada, a intensidade do reporte e o padrão de reconhecimento foi verificada.

3.7.4 Análise multiespectral discriminante

Foram selecionados a partir da análise dos boletins de Síntese Sinótica Mensal do CPTEC, para o ano de 2010, 13 dias (dias 30 e 31/5, 20/6, 12, 13, 14, 18, 19, 22 e 25/7, 2, 3 e 13/8) com passagem de sistemas frontais (outono e inverno) sobre a FIR-CW, que potencialmente provocariam a presença de vários tipos de nuvens, incluindo aquelas que apresentavam as condições favoráveis à FGA, tema central desse estudo.

Com base nas técnicas de interpretação de imagem de satélite e nos dados horários de superfície registrados no INFOMET, foram escolhidos seis tipos de alvos para estudo:

- 1- Cobertura de nuvens (no mínimo 5/8) de nuvens de ALS ou nuvens mistas (que são favoráveis à FGA), com TTN variando entre 0°C e -20°C;
 - 2- Cobertura de nuvens quentes (no mínimo 5/8 de cobertura);
 - 3- Cobertura de nuvens cirros espessos, que são formadas por cristais de gelo (no mínimo 5/8 de cobertura);
 - 4- Cobertura de nuvens cirros finos sobre continente (no mínimo 5/8 de cobertura);
 - 5- Cobertura de nuvens de cirros finos sobre estratos (no mínimo 5/8 de cobertura);
- e

6- Superfície continental, sob a condição de céu claro.

Uma área quadrada com dimensões equivalente de 3X3 pixels (12X12km) do GOES-12, centrada sobre a localização geográfica das estações meteorológicas, foi utilizada para esse estudo. Cada pixel tem aproximadamente 4 km ao nadir. Nessa área, foram calculadas as médias das refletâncias (CH1) e das temperaturas de brilho (CH2, CH4 e CH6) para cada horário em análise. Com isso as médias foram relacionadas a cada alvo predefinido. Para cada alvo foi empregada a técnica de análise multiespectral com as seguintes combinações: DTB CH2-CH4 (para o dia e noite, feitas de forma separada, pois o canal de 3.9 μ m, durante o dia, contém contribuição tanto da emissão termal quanto da refletância solar). Aqui a pesquisa buscou, principalmente, determinar os limiares empíricos mais adequados para discriminar as nuvens de FGA (nuvens de ALS) das demais nuvens e também da superfície continental. Para a análise diurna, os dados do imageador do GOES-12 foram selecionados de modo que fossem consideradas várias quantidades de iluminação solar (vários horários durante o dia), sempre no período compreendido entre o horário do nascer-do-sol mais 2 horas e o horário do ocaso menos 2 horas. Assim, em termos de ângulo zenital, foram considerados valores variando entre 0° e 70°. Essa estratégia foi adotada por Ellrod e Bailey (2006), pois para valores de ângulo zenital superiores a 70°, o canal de 3.9 μ m apresenta ruídos instrumentais, tornando a análise ineficiente.

Foi realizada, também, análise comparativa entre as observações de superfície e as estatísticas das diferenças de temperatura de brilho e refletância. Aqui o objetivo foi determinar se as diferenças de temperatura de brilho e reflectância observadas entre os alvos em estudo pudessem ser utilizadas diferenciar as nuvens de ALS dos demais alvos.

A DTB CH4-CH6 foi executada com objetivo de eliminar falsas assinaturas de nuvens com potencial FGA, devido à presença de cirros finos sobre continente (CFC) ou sobre nuvens estratos (CFS), sendo utilizada a análise multiespectral como fator discriminante, com o uso dos canais 4 (10.7 μ m) e 6 (13.3 μ m) da plataforma GOES-12. A análise realizada considerou cenários diurnos e noturnos conjuntamente, dado o fato de que os canais em questão fazem parte da faixa termal do espectro eletromagnético.

3.7.5 Verificação da técnica e dos limiares

Determinados os limiares de CH1, DTB CH2-CH4 (dia ou noite) e DTB CH4-CH6 foram obtidos, foi realizado processo de verificação para identificar o potencial de aplicação operacional dos mesmos no monitoramento da FGA.

O único registro que confirma a ocorrência ou não de FGA é o AIREP, emitidos por aeronaves. Entretanto, devido ao baixo número e, em alguns casos, escassez de AIREPs de FGA, a verificação foi realizada a partir da comparação entre os pixels (classificados com potencial ou não de FGA) e as nuvens presentes (com potencial ou não), classificadas a partir da análise de perfis de atmosféricos (temperatura e umidade), obtidos por radiossondagem, análise de observações de superfície (fração de cobertura da abóboda celeste pelas nuvens) e cenário sinótico. O produto foi processado a partir dos dados obtidos pelo imageador do GOES-12, conforme a sequência de análise proposta pelo algoritmo descrito em Ellrod e Bailey (2006).

3.7.6 Análise de caso

Para a análise de um caso de FGA sobre uma aeronave Caravan que voava a FIR-CW, foram adotados os seguintes procedimentos:

- 1) Avaliação das condições sinóticas;
- 2) Interpretação de imagens de satélite e radar;
- 3) Análise de dados METAR;
- 4) Análise da TTN;
- 5) Análise do perfil termodinâmico;
- 6) Análise das fotos do gelo formado na aeronave; e
- 7) Aplicação da análise multiespectral com os limiares obtidos empiricamente.

4 RESULTADOS

4.1 Classificação dos AIREPs por cenário meteorológico

Inicialmente foram selecionados os casos de FGA sobre as FIRs Brasília e Curitiba utilizando-se informações dos AIREPs. Para os casos selecionados foram avaliadas a TTN a partir de dados dos satélites GOES-10 e GOES-12, considerando a janela de uma hora antes ou depois do horário de emissão do AIREP.

Dos 82 AIREPs de FGA coletados para exame, somente 78 foram examinados devido à questão de disponibilização da observação dos satélites GOES-10 e GOES-12.

Dos 78 AIREPs, 22 (~ 28%) ocorreram em cenário estratiforme, com TTN média entre 0°C e -25°C, e o restante, 56 (~ 72%), aconteceu em cenário convectivo, com TTN média entre -25°C e -79°C.

4.2 Características dos AIREPs de FGA

Nessa seção da pesquisa, são discutidas as características dos AIREPs estudados. Vale ressaltar que somente foram feitos reportes (82, considerando as regiões e o período de estudo) que confirmaram positivamente a ocorrência de FGA. Não houve reporte negativo, ou seja, quando a aeronave voa em condições com presumido potencial de FGA, mas o fenômeno não ocorre. Do ponto vista operacional bem como científico, a emissão de AIREP negativo (que não confirma o fenômeno quando a aeronave voa uma área com potencial de ocorrência) é suma importância para a melhoria da atividade de previsão e do desenvolvimento de melhores métodos objetivos a partir de ferramentas análise e previsão, como o satélite meteorológico (SCHULTZ e POLITOVICH, 1992).

Os parâmetros reportados nas mensagens AIREP de FGA foram organizados em planilha de dados e analisados estatisticamente. As Figuras. 4.1 e 4.2 mostram, respectivamente, as distribuições espaciais dos 82 AIREPs na FIR-BS e FIR-CW. Na FIR-BS foram registrados 30 (~ 36,5%) dos eventos de formação de gelo em aeronaves. Desse total, 20 (~ 66%) apresentaram intensidade moderada e/ou severa e apenas um AIREP omitiu a intensidade. Em cenário estratiforme, principal foco desse estudo, foram 13 ocorrências (~ 43% do total da FIR em discussão). A distribuição espacial da

amostra reflete a densidade de tráfego aéreo. Nesse mapa, é possível notar que a grande maioria dos eventos, 22 (~ 73%), aconteceu na porção de espaço aéreo (rotas) que pode ser delimitada por um polígono que une as áreas terminais de aeroportos com maior média de demanda de voos no Brasil (os aeroportos de Brasília, Campinas, São Paulo, Guarulhos, Confins, Santos Dumont e Galeão).

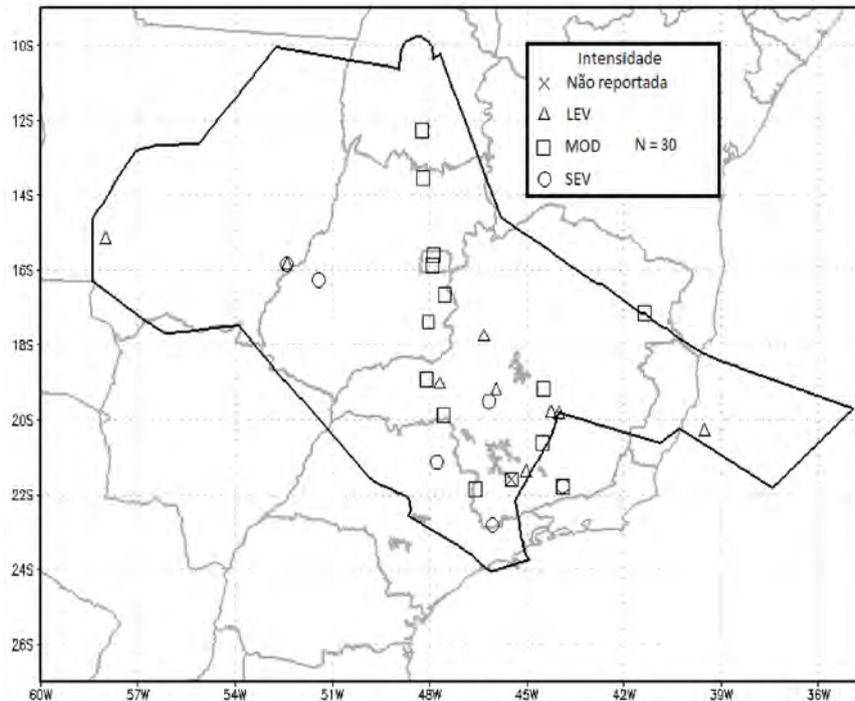


Figura 4.1: Distribuição espacial dos AIREPs de FGA na FIR-BS, considerando a intensidade e o período de avaliação. Na caixa de legenda, LEV, MOD e SEV, indicam, respectivamente, as intensidades, leve, moderada e severa.

Por outro lado, apesar da FIR-CW não hospedar os aeroportos mais movimentados do Brasil (Figura 4.2), registrou a maioria dos eventos de FGA, 52 (~ 63,5%). Desse total, 38 (~ 73%) apresentaram intensidade moderada e/ou severa. Em cenário estratiforme, foram 9 ocorrências (~ 17% do total da FIR em discussão). Aqui a distribuição espacial da amostra também reflete a densidade de tráfego aéreo. No mapa da FIR-CW, depreende-se que quase a totalidade dos eventos, 48 (~ 92%), aconteceu entre as áreas terminais (rotas) com os aeroportos de maior demanda de voos para essa FIR (os

aeroportos de Campo Grande, São Paulo, Porto Alegre, Florianópolis, Curitiba, Congonhas e Guarulhos). Contudo, reconhecendo que a maioria dos sistemas meteorológicos atuantes na América do Sul, e que favorecem a formação de nuvens que apresentam potencial de FGA, tais como frentes frias e quentes, sistemas de baixa pressão e fortes advecções frias, são transientes e deslocam-se com maior frequência pela FIR-CW, é possível explicar o maior número de ocorrências nessa FIR.

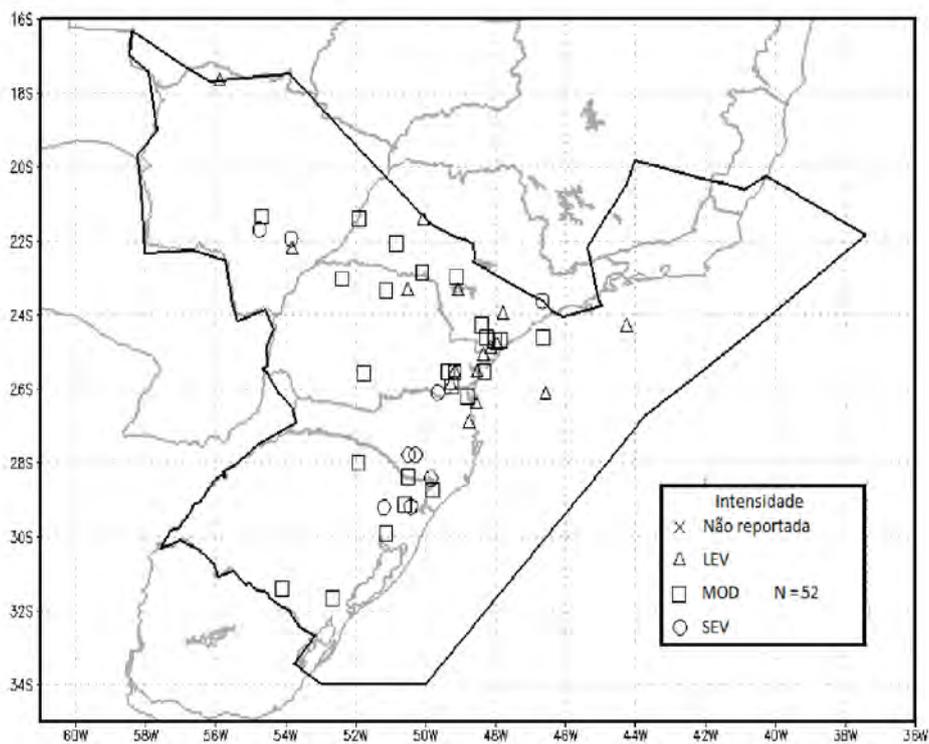


Figura 4.2: Distribuição espacial dos AIREPs de FGA na FIR-CW, considerando a intensidade e o período de avaliação. Na caixa de legenda, LEV, MOD e SEV, indicam, respectivamente, as intensidades, leve, moderada e severa.

A distribuição de AIREPs por hora do dia é apresentada na Figura 4.3. A grande maioria AIREPs (mais de 85%) foi reportada entre 0900 e 2200 UTC. Esse padrão possui forte relação com o ciclo de demanda de tráfego aéreo.

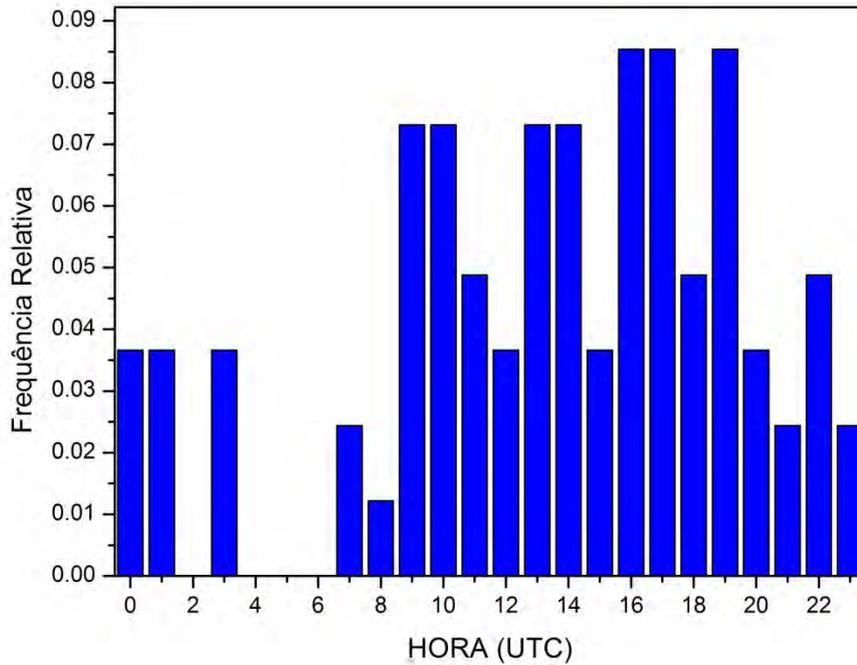


Figura 4.3: Distribuição horária de frequências relativas dos AIREPs de FGA.

Como pode ser verificado na Figura 4.4, a maioria dos AIREPs foi de intensidade moderada ou severa, totalizando aproximadamente 68%. Os casos com maior impacto nas aeronaves (intensidade severa) responderam por aproximadamente 20% do banco de dados investigado (81 AIREPs, pois 1 não reportou intensidade). Numa análise tabular, foi identificado que 28% dos reportes em cenário estratiforme tiveram intensidade severa.

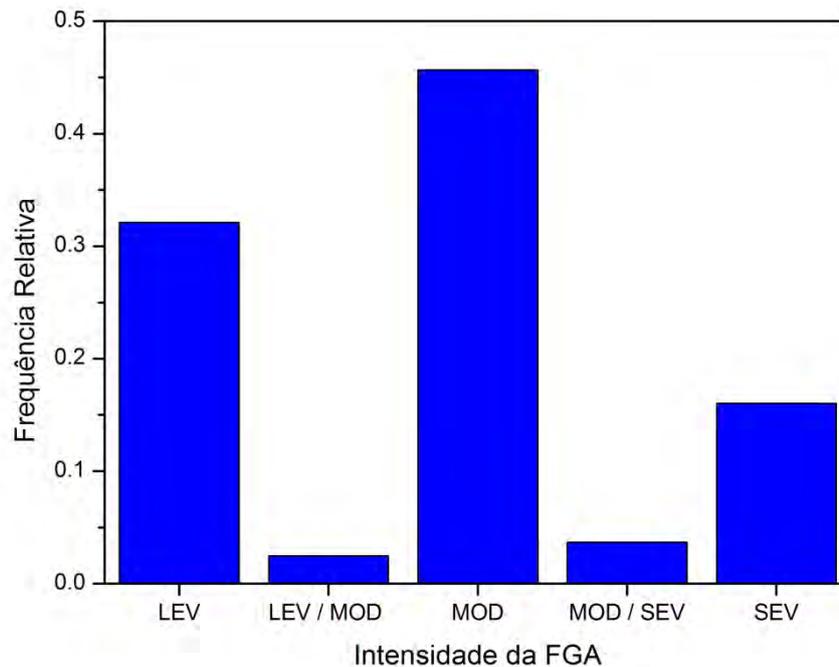


Figura 4.4: Distribuição de frequências relativas do grau de severidade dos AIREPs de FGA. No eixo das abscissas, LEV, LEV/MOD, MOD, MOD/SEV e SEV, indicam, respectivamente, as intensidades leve, leve a moderada, moderada, moderada a severa e severa.

A análise do parâmetro nível de voo (altitude), apresentada na Figura 4.5 permitiu constatar que, de 81 AIREPs de FGA, a grande maioria (~ 96%) ocorreu em altitudes acima de 4000 metros, havendo dois máximos nas faixas de altitude entre 4000 e 6000 metros (~ 40%) e acima de 8000 metros (~ 35%), ou seja, em níveis médios e altos da troposfera; agora, considerando somente os casos ocorridos em cenários estratiformes (22 AIREPs), a maioria (~55%) aconteceu com as aeronaves voando na média troposfera, na faixa de altitude entre 4000 e 6000 metros (Figura 4.6). Não houve reporte na faixa de altitude entre a superfície e 2000 metros (baixa troposfera) para ambos os cenários.

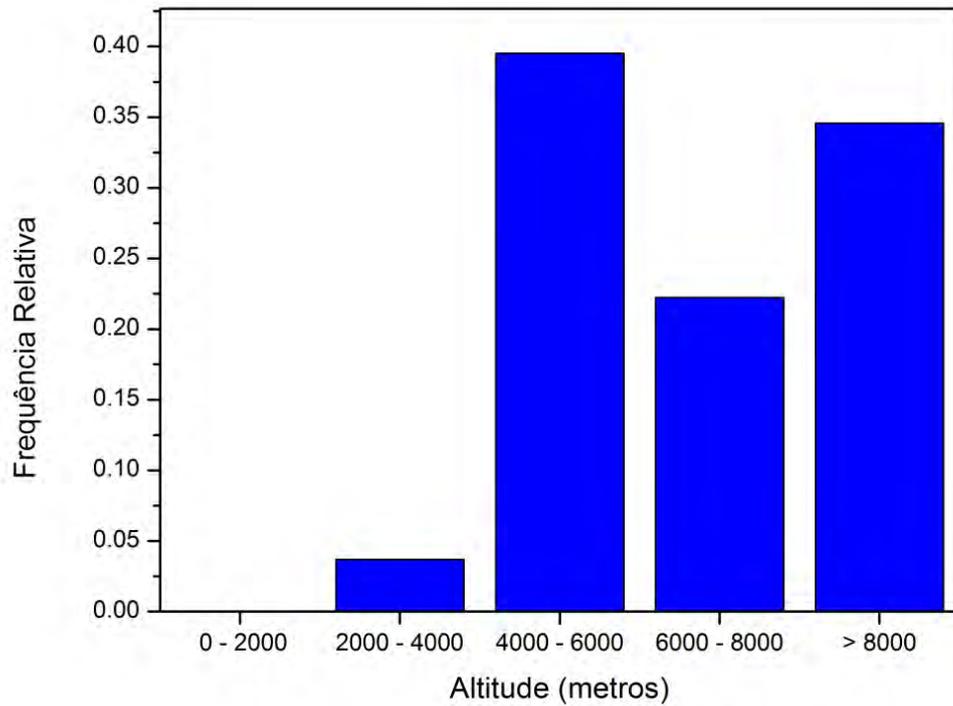


Figura 4.5: Distribuição de frequências relativas do nível de voo (altitude) dos AIREPs de FGA para todos os casos analisados.

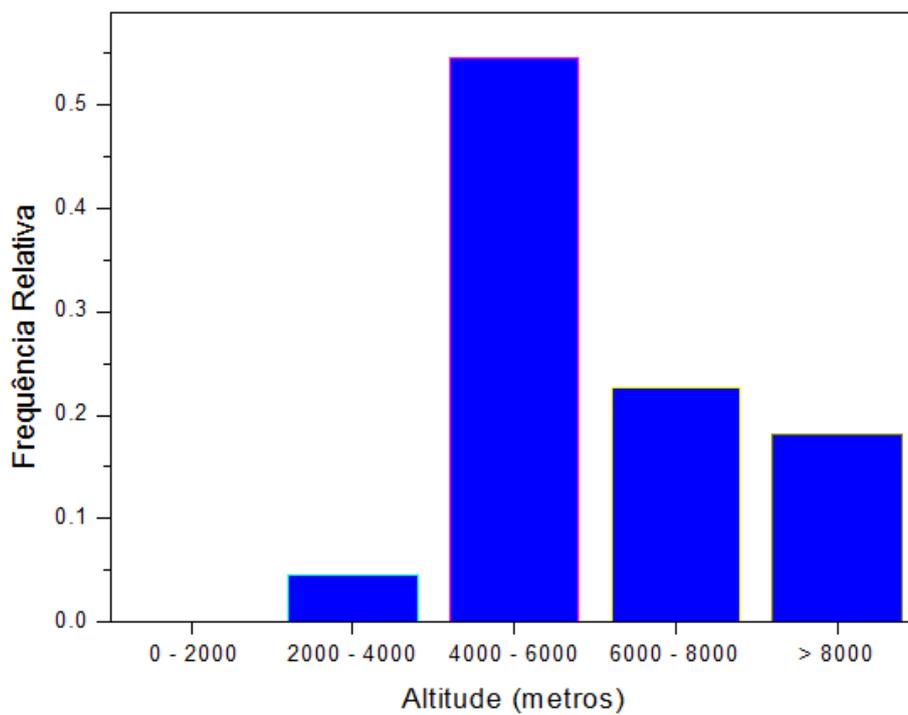


Figura 4.6: Distribuição de frequências relativas do nível de voo (altitude) dos AIREPs de FGA para os casos em cenário estratiforme.

A distribuição ao longo do ano dos 82 AIREPs de FGA estudados mostra dois máximos, nos meses de outubro e novembro (totalizando ~ 29% dos reportes), e dois mínimos, nos meses de junho e maio (totalizando ~ 4% dos reportes). No período de outubro a março (primavera e verão), houve a ocorrência de aproximadamente 60% dos reportes. Mesmo em um período climatologicamente mais seco no geral, principalmente para a FIR-BS, nos meses de abril a setembro foram emitidos 40% dos AIREPs de FGA.

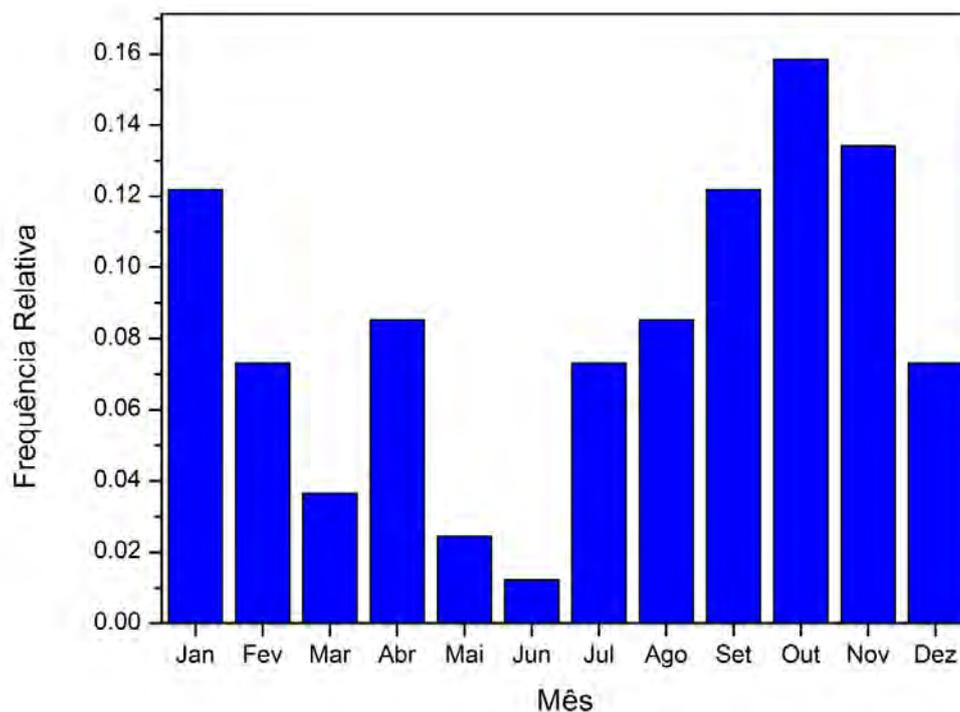


Figura 4.7: Distribuição de frequências relativas por mês do ano para os 82 casos analisados.

Após a classificação dos AIREPs em cenários convectivo ou estratiforme, com o uso da TTN média, foi efetivada a análise das temperaturas de brilho dos pixels nublados, associados aos 22 eventos em cenário considerado estratiforme. Os 1955 pixels foram distribuídos em um histograma de frequências relativas e frequência acumulada (Figura 4.8). Cerca de 80% dos pixels associados tiveram TTN maior ou igual a -20°C e menor ou igual a -2°C .

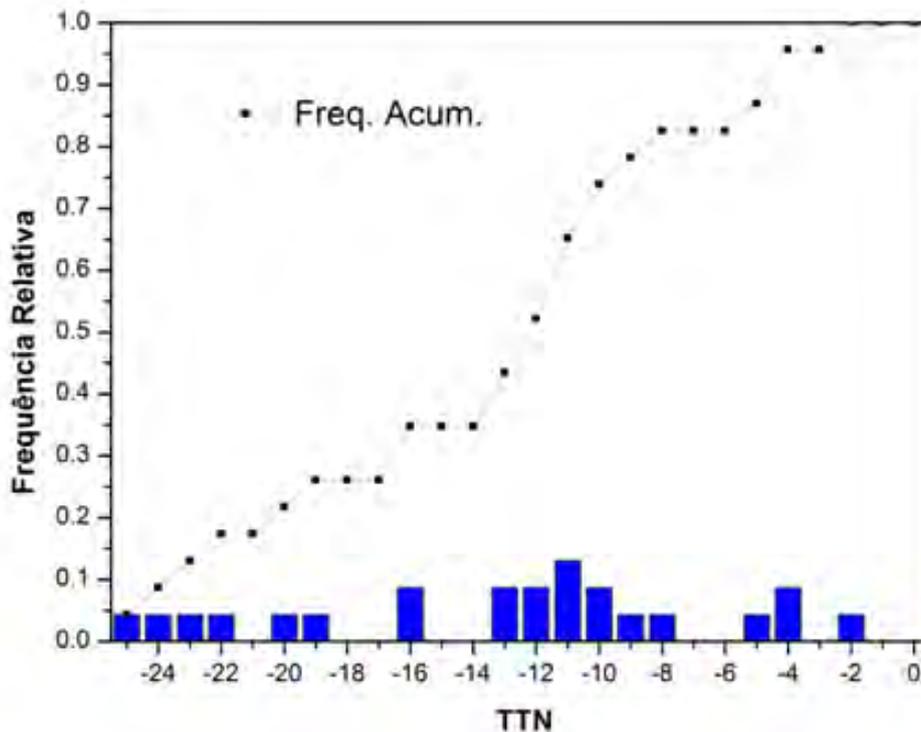


Figura 4.8: Distribuição de frequências relativas dos pixels estratiformes associados aos 22 eventos de FGA em cenário estratiforme.

Bernstein et al. (2005) avaliam o gradiente de TTN para a determinação do cenário físico e para o cálculo do potencial inicial de FGA e de GGS. Os autores explicam que quando há gradiente de TTN numa determinada área pode haver uma situação de transição. Como exemplo, os autores citam um cenário meteorológico que pode conter parcialmente nuvens com topos relativamente quentes (e.g., -12°C), para as quais a presença de ALS é esperada, e nuvens com topos relativamente frios (e.g., -25°C), para as quais a composição parcialmente ou completamente glaciada (água líquida superesfriada e cristais de gelo ou somente cristais de gelo) é esperada. Afirmando que uma aeronave voando nessas condições em altitude constante, com uma temperatura de -8°C em seu nível de voo, provavelmente encontrará água líquida em partes com nuvens de topos quentes e condição de fase mista ou glaciada em partes com nuvens de topos frios; uma aeronave voando em nível de voo mais alto, mais frio (e.g., -20°C), pode encontrar condições de céu claro quando acima das nuvens quentes e condições glaciadas quando dentro das nuvens de topos relativamente frios. Assim, nessa análise

Bernstein et al. (2005) atribuem potencial máximo de ocorrência de FGA para os casos com TTN maior ou igual a -12°C .

A aplicação da técnica de reconhecimento de padrão pode ser utilizada com o objetivo de identificar esses tipos de cenários, dando uma avaliação do potencial de ocorrência e também da severidade da FGA, a partir somente da análise da TTN e de um parâmetro de textura. Aqui, foi verificada a relação entre a intensidade reportada pelos 22 casos de FGA em cenário estratiforme, a TTN média, e o seu respectivo desvio padrão, como parâmetro de textura. Essa análise permitiu identificar que todos os AIREPs de FGA de intensidade severa (6 eventos) ocorreram com aeronave voando dentro de nuvens com TTN maior ou igual a -12°C e desvio padrão menor ou igual 3 (Figura 4.9); os dois outros eventos que tiveram intensidade leve e moderada e que ocorreram nas mesmas condições podem ter explicação no tempo de exposição da aeronave às condições reinantes. Como exemplo, pode-se citar o caso de uma aeronave que, no procedimento de subida para o nível de cruzeiro ou de descida para aproximação e pouso, cruza um cenário meteorológico com aquelas características. Assim como o gradiente de TTN, o desvio padrão dá uma medida da variabilidade espacial do parâmetro TTN. Esse resultado sugere que esse parâmetro de textura, combinado com a análise de TTN, pode ser utilizado para graduar a severidade da FGA esperada numa determinada área.

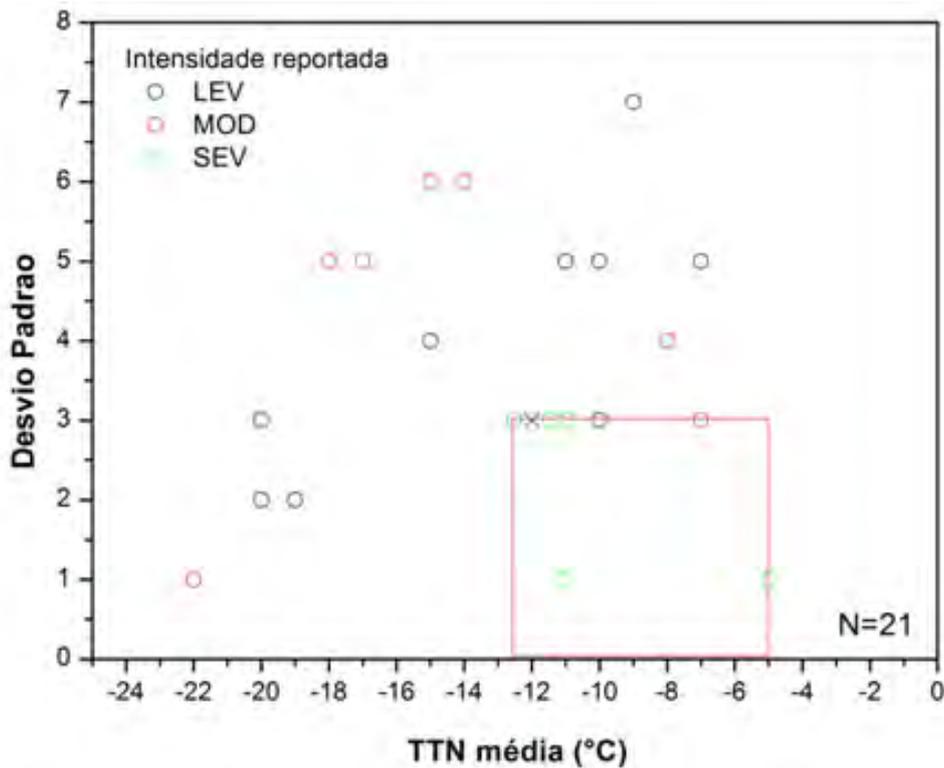


Figura 4.9: Diagrama de dispersão mostrando a relação entre a intensidade reportada, a TTN média e seu respectivo desvio padrão como parâmetro de textura. Legenda: LEV, MOD e SEV, indicam, respectivamente, as intensidades leve, moderada e severa.

4.3 Análise Multiespectral Discriminante – Período noturno

Nessa seção são apresentados os resultados da análise de comparação entre as observações de superfície registradas no sistema INFOMET com as estatísticas da análise multicanal, representada pela DTB CH2-CH4, para o período noturno, considerando inicialmente os alvos estabelecidos em 3.7.4. O propósito básico aqui foi identificar se as diferenças observadas pelo satélite para cada alvo podem ser atribuídas como fator discriminante entre eles, realçando o alvo central desse estudo que são as nuvens com potencial de FGA. Para tanto, os valores médios de DTB CH2-CH4 devem ter valores significativamente diferentes, para que seja possível determinar um limiar que seja eficiente para aplicação operacional.

A Tabela 4.1 mostra os valores médios, os desvios-padrão e o número de observações para os 6 alvos em estudo, considerando o período noturno.

Tabela 4.1: Estatísticas da diferença de temperatura de brilho entre os canais 2 e 4 do satélite GOES-12, para os 6 alvos – Formação de Gelo em Aeronaves (FGA), Nuvem Quente (NQ), Cirros Espessos (CE), Cirros Finos sobre o Continente (CFC), Cirros Finos sobre Estratos (CFS) e Cirros sobre Céu Claro (CCC) - para o período noturno. N representa o número de observações.

DTB CH2-CH4 / NOITE	FGA	NQ	CE	CFC	CFS	CCC
MÉDIA	-1.609	-2.211	6.183	8.209	7.878	0.1
DESVIO PADRÃO	0.923	1.092	4.394	3.354	5.159	0.517
N	115	90	60	96	20	568

Para facilitar a interpretação, os resultados dessa análise multicanal foram graficados (Figura 4.10) na forma de diagrama de caixa (box plot). O diagrama de caixa é um gráfico construído com base em parâmetros estatísticos da amostra estudada, sendo constituído pelo valor mínimo, primeiro quartil, mediana (segundo quartil), terceiro quartil e valor máximo. Ainda podem ser acrescentados à média e o valor atípico da amostra, esse quando for o caso. No diagrama de caixa, o topo e a base da linha representam, respectivamente, os valores máximo e mínimo; o topo e a base da caixa representam, respectivamente, os percentis de 75% e 25%; a linha dentro da caixa representa a mediana e o pequeno quadrado representa a média.

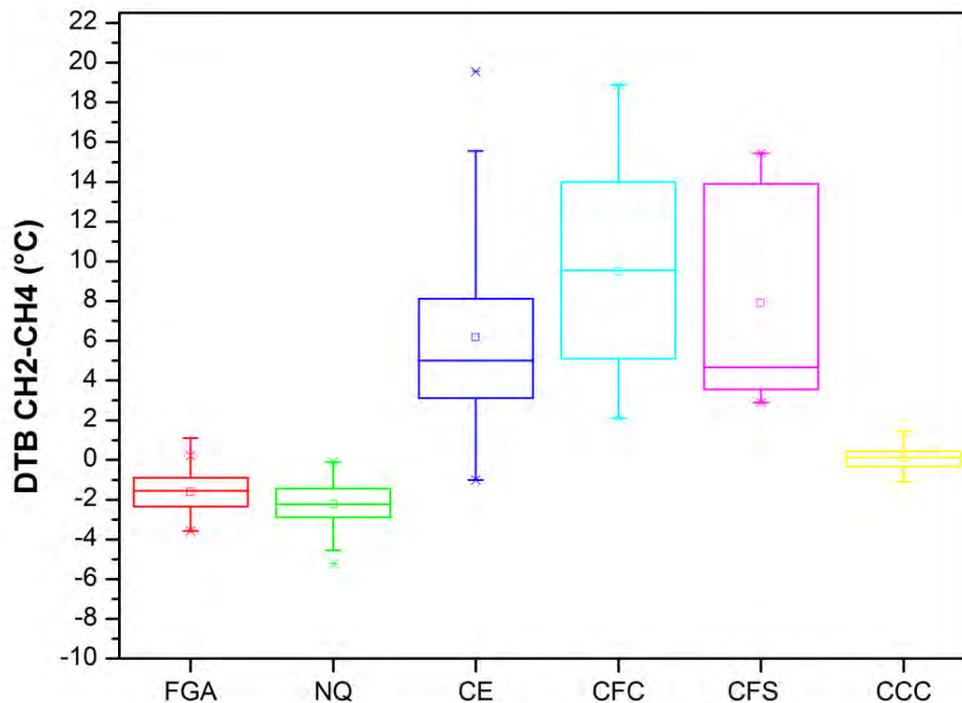


Figura 4.10: Análise de diagrama de caixa da diferença de temperatura de brilho entre os canais 2 e 4 do GOES-12, para os 6 alvos em estudo. Legenda: FGA (formação de gelo em aeronaves), NQ (nuvem quente), CE (cirros espessos), CFC (cirros finos sobre continente), CFS (cirros finos sobre estratos) e CCC (continente sob céu claro).

A análise comparativa, entre as médias das diferenças entre os canais 2 e 4 do GOES-12, permitiu identificar que os alvos FGA e NQ tiveram assinatura espectral bem diferente em relação aos demais grupos, com predominância de valores negativos para a DTB CH2-CH4. Para o alvo FGA, a DTB CH2-CH4 média foi de aproximadamente -1.6 °C e para NQ a DTB CH2-CH4 média ficou em torno de -2.2 °C.

Considerando que a primeira análise para detecção a partir de satélites de áreas com potencial de FGA é a de temperatura do topo dos alvos, e que nesse estudo a faixa de temperatura estabelecida para o potencial de FGA foi o intervalo entre 0 °C e -20°C, os alvos CE (temperatura do topo da nuvem inferior a -20°C) e NQ (temperatura do topo da nuvem superior a 0°C) não foram mais considerados, e dos alvos restantes, foram analisados somente os pixels com temperatura de brilho na faixa de FGA, os quais podem provocar falsas assinaturas. Na amostragem em questão, todos os pixels de todos os alvos tiveram temperatura na faixa 0°C e -15°C, faixa com maior potencial de

severidade, devido à possibilidade das nuvens apresentarem maior conteúdo de água líquida. Assim, foram refeitos os cálculos estatísticos (Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Estatísticas da diferença de temperatura de brilho entre os canais 2 e 4 do satélite GOES-12, para os 4 alvos que na amostragem, apresentaram TB no canal 4 no intervalo de FGA – Formação de Gelo em Aeronaves (FGA), Cirros Finos sobre o Continente (CFC), Cirros Finos sobre Estratos (CFS) e Cirros sobre Céu Claro (CCC) - para o período noturno. N representa o número de observações.

	FGA	CFC	CFS	CCC
MÉDIA	-1.601	13.183	4.308	0.4
DESVIO PADRÃO	0.923	2.638	1.577	0.258
N	115	54	13	15

Na tabela acima, é visível que as assinaturas multicanais em discussão (valores das médias) estão bem separadas entre si. A Figura 4.11 esboça os demais parâmetros estatísticos das amostras dos alvos na forma de diagrama de caixa.

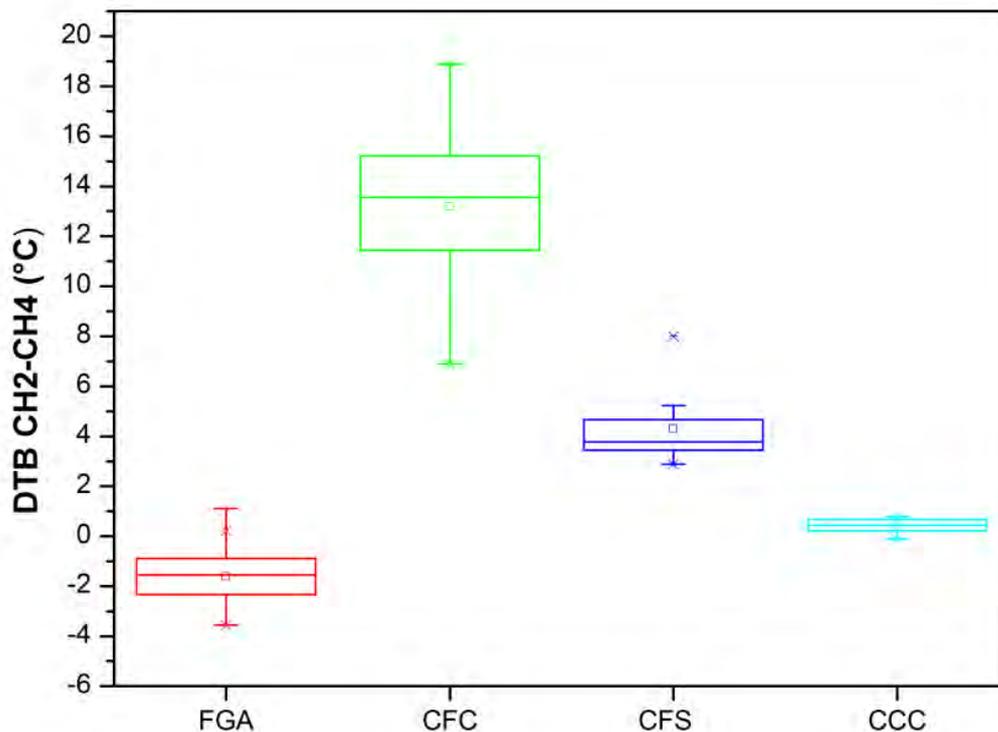


Figura 4.11: Análise de diagrama de caixa da diferença de temperatura de brilho entre os canais 2 e 4 do GOES-12, para os 4 alvos que tiveram temperatura de topo no intervalo de FGA. Legenda: FGA (formação de gelo em aeronaves), CFC (cirros finos sobre continente), CFS (cirros finos sobre estratos) e CCC (continente sob céu claro).

Com o foco de testar se as diferenças entre as médias encontradas são estatisticamente significantes, os dados amostrais foram submetidos a 2 testes estatísticos: a análise de variância e o teste de Tukey.

A análise de variância (ANOVA) é um teste estatístico utilizado avaliar se existe uma diferença importante entre as médias de grupos diferentes. Numa ANOVA são calculadas a variância dentro de grupos (MQG) e a variância das médias (MQR). Se a variância calculada usando a média (MQR) for maior do que a calculada (MQG) usando os dados pertencentes a cada grupo individual, isso pode indicar que existe uma diferença significativa entre os grupos. A Tabela 4.3 abaixo resume os cálculos estatísticos numa ANOVA:

Tabela 4.3: Quadro resumo genérico dos cálculos estatísticos realizados numa ANOVA.

FONTE DE VARIACÃO	GDL	SQ	MQ	Teste F
Entre Grupos	SQG	K – 1	MQG	MQG/MQR
Dentro dos Grupos	SQR	N-K	MQR	
Total	SQT	N-1		

Onde:

SQT = SQG + SQR, e representa a soma dos quadrados totais; mede a variação geral de todas as observações;

SQG é soma dos quadrados dos grupo, relacionada, exclusivamente, a um efeito dos grupos;

SQR é a soma dos quadrados dos resíduos, associados, exclusivamente, ao erro aleatório, medida dentro dos grupos;

MQG é a média quadrada dos grupos;

MQR é a média quadrada dos resíduos entre os grupos; e

SQG e MQG medem a variação total entre as médias, ao passo que SQR e MQR medem a variação das observações de cada grupo;

$F = MQG/MQR$;

$N - 1 = (K - 1) + (N - K)$;

$SQT = SQG + SQR$; e

$MQG = SQG (K - 1)$.

Nesse tipo de análise a hipótese nula sempre será rejeitada quando o F calculado for maior que o valor tabelado. Da mesma forma, se MQG for maior que MQR, rejeita-se a hipótese nula.

Utilizando um nível de significância de 5%, o valor F calculado, entre 3 e 193 graus de liberdade, foi 1058.0625, superando o F tabelado de 4.4652 (ver resultados do teste na Tabela 4.4). Assim, a hipótese nula pode ser rejeitada, denotando que as médias dos 4 alvos em questão são estatisticamente diferentes.

Tabela 4.4: Quadro resumo dos cálculos estatísticos realizados na ANOVA para comparação de significância estatística entre as médias dos 4 alvos amostrados que tiveram temperatura de topo no intervalo de FGA.

FONTE DE VARIAÇÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	MÉDIAS DOS QUADRADOS	VALOR F
ENTRE GRUPOS	3	8165.8055	2721.9352	1058.0625
DENTRO DE GRUPOS	193	496.5052	2.5726	
TOTAL	196	8662.3107		

Foi aplicado um teste estatístico de comparação múltipla, denominado teste de TUKEY, o qual permite determinar se as médias dos grupos em análise são significativamente diferentes, duas a duas, através da construção de intervalos de confiança para as diferenças entre as médias. A Tabela 4.5 mostra o resultado do teste de TUKEY aplicado aos 4 alvos em análise, com os respectivos parâmetros considerados:

Tabela 4.5: Resultados dos cálculos estatísticos realizados no teste TUKEY para comparação de significância estatística entre as médias, duas a duas, dos 4 alvos amostrados que tiveram temperatura de topo no intervalo de FGA.

Alvos comparados	Diferença entre as médias	Limite inferior do intervalo de confiança	Limite superior do Intervalo de confiança
CFC FGA	14.79182	13.95719	15.62646
CFS FGA	5.91639	4.43597	7.39681
CFS CFC	-8.87544	-10.43847	-7.3124
CCC FGA	2.0087	0.61977	3.39762
CCC CFC	-12.78313	-14.25979	-11.30646
CCC CFS	-3.90769	-5.82487	-1.99051

Ao nível de 10% de significância, todas as diferenças entre as médias, verificadas duas a duas, foram consideradas significantes estatisticamente.

4.4 Análise Multiespectral Discriminante – Cirros

Uma curva empírica discriminante (representada pela equação $DTB = 0.53TTN + 15$) foi obtida a partir de um diagrama de dispersão em que foram plotadas as diferenças de TBs entre os canais 4 e 6 (DTB CH4-CH6) e as TBs do canal de janela atmosférica (10.7 μm), as quais representam as temperaturas do topo das nuvens (TTN) investigadas (Figura 4.12). Amostragem considerada resultou num total de 188 observações. A análise do diagrama permite estabelecer que os valores de diferenças entre os canais maiores ou iguais do que os valores determinados pela equação estão associados a cirros finos sobre continente ou sobre nuvens quentes, sendo, portanto, consideradas falsas assinaturas de FGA, cujos pixels devem ser desconsiderados numa análise de cenário de FGA.

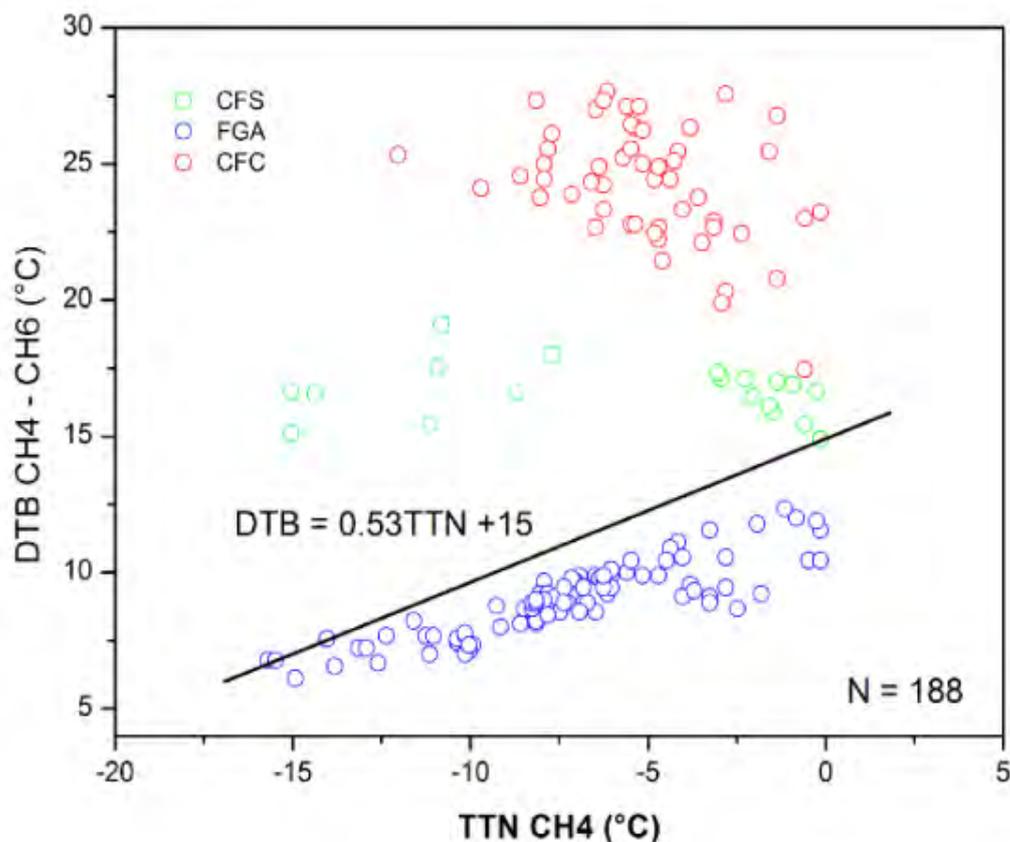


Figura 4.12: Diagrama de dispersão mostrando as diferenças de temperatura de brilho entre os canais 4 e 6 plotadas versus a temperatura de do topo das nuvens (canal 4). A curva empírica permite discriminar falsas assinaturas de nuvens Cirros Finos sobre Estratos (CFS) e de nuvens Cirros Finos sobre Continente (CFC) de nuvens com potencial de FGA.

4.5 Análise Multiespectral Discriminante – Período Diurno

A análise discriminante multiespectral realizada durante o dia a partir de casos selecionados para a FIR-CW, com o uso de dados dos canais visível, 3.9 μm e IR, obtidos pelo imageador do satélite GOES-12, permitiu a obtenção de limiares empíricos que podem ser aplicados na detecção e monitoramento de nuvens que possam oferecer potencial de FGA. O estudo foi realizado empiricamente a partir da comparação entre as observações de satélite (considerada a média de uma área de 3X3 pixels, centrada sobre a localização da estação meteorológica) e as observações de superfície obtidas pelas estações meteorológicas classe 1 do DECEA, cujas observações e classificação de

nuvens são realizadas por técnicos em meteorologia. Para essa análise foram verificados os seguintes cenários: 1) topo de nuvens superesfriadas, 2) nuvens cirros finos sobre continente, 3) neve, e 4) cirros sobre neve ou sobre nuvens estratos. A escolha desses cenários para a análise discriminante em questão é devida ao fato de que os cenários 2 a 4, podem estar na faixa superesfriada (entre 0°C e -20°C), mas não oferecer risco de FGA, configurando-se, portanto, como falsas assinaturas, necessitando assim da aplicação do canal VIS e da DTB CH2-CH4, para melhor discriminação. Foram processadas 151 observações nessa faixa de temperatura, estimadas com o uso do canal IR, das quais 145 foram de nuvens superesfriadas, e o restante (6), de nuvens cirros finos sobre nuvens estratos. Para o período amostrado, não foram encontrados registros de observações de neve ou de cirros finos sobre neve. Também, nesse exame, foram vistos somente cenários de nuvens com céu nublado ou encoberto. Nessa análise discriminante, as nuvens com potencial de FGA foram relacionadas a valores de reflectância maiores do que 45% e valores de DTB CH2-CH4 maiores ou igual a 10°C (vide Figura 4.13). Os dados de reflectância utilizados já se encontravam normalizados em relação ao ângulo zenital; entretanto, não foram corrigidos em relação ao ângulo de visada do satélite, como na avaliação empírica realizada por Ellrod e Bailey (2006). Já o limiar obtido para a diferença entre os canais 2 e 4 foi semelhante ao obtido no trabalho de Ellrod e Bailey (2006).

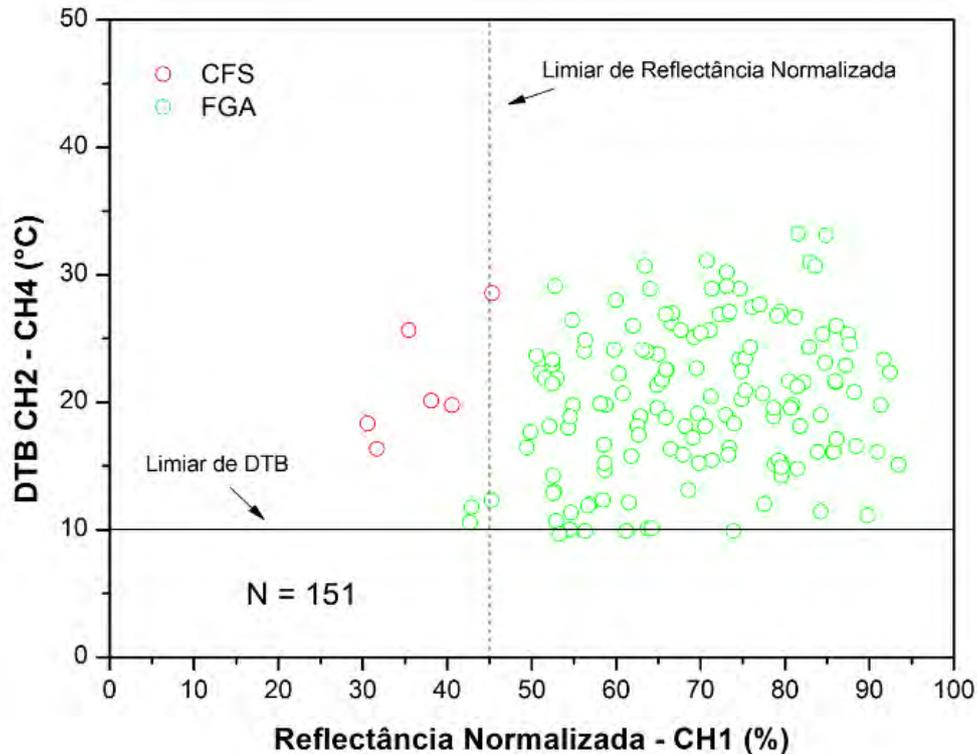


Figura 4.13: Diagrama de dispersão apresentando a diferença entre os canais 2 e 4 do GOES-12 versus a reflectância normalizada (canal 1). As linhas verticais e horizontais identificam os limiares. Legenda: CFS (cirros finos sobre estratos) e FGA (formação de gelo em aeronaves).

4.6 Verificação

Com o objetivo de validar os limiares obtidos a partir da análise discriminante realizada nessa pesquisa, foram selecionados cenários meteorológicos (Tabela 4.6) contendo alvos com potencial e sem potencial de FGA do ano de 2010 e 2011, considerando o horário de 1230UTC (dia) e o de 2330UTC (noite), para a FIR-CW.

A interpretação de imagens de satélite no canal IR, a análise de observações de superfície (METARES) e a análise de perfis de radiossondagem (aplicando a técnica, apresentada por Wang e Rossow (1995), foram usadas para determinar o potencial ou não de FGA, permitindo a comparação com a observação do satélite, possibilitando assim a verificação dos limiares multiespectrais.

Tabela 4.6: Essa Tabela apresenta a data e horário dos casos que foram selecionados na FIR-CW e o respectivo mecanismo forçante relacionado.

Data / Horário	Mecanismo Forçante
03 Ago 2010 / 1230UTC	Advecção Fria
25 Jun 2011 / 2330UTC	Frente Fria
26 Jun 2011 / 1230UTC	Frente Fria
26 Jun 2011 / 2330UTC	Frente Fria
02 Jul 2011/ 1230UTC	Frente Semiesticionária
02 Jul 2011/ 2330UTC	Frente Semiesticionária

Os limiares adotados foram processados de acordo com a sequência de análise descrita em Ellrod e Bailey (2006):

Para o dia:

- 1) Análise de TTN, usando o intervalo entre 0°C e -20°C;
- 2) Análise de reflectância, selecionando valores acima de 45%;
- 3) Análise da DTB CH2-CH4, considerando somente valores superiores a 10°C; e
- 4) Análise da DTB CH4-CH6, verificando se essa DTB é maior ou igual a $0.53TTN + 15$, onde a TTN é a temperatura de brilho obtida pelo CH4.

Para a noite:

- 1) Análise de TTN, usando o intervalo entre 0°C e -20°C;
- 2) Análise da DTB CH2-CH4, assumindo como limiar o valor médio encontrado na análise discriminante (DTB CH2-CH4 menor -1.6 °C); e
- 3) Análise da DTB CH4-CH6, verificando se essa DTB é maior ou igual a $0.53TTN + 15$.

Sobre uma região de tamanho de 3X3 pixels (12X12km), centrada nas estações meteorológicas de altitude, os limiares foram testados.

Para ambos os períodos, os pixels que satisfizeram simultaneamente, seguindo a sequência de análise, todas as condições consignadas foram considerados cobertos por

nuvens com potencial de FGA. Aqueles pixels que por ventura não satisfizeram qualquer das condições não foram classificados como tendo potencial de FGA. A partir daí foi realizada a comparação com o diagnóstico dado pelo conjunto de observações utilizados para configurar ou não o potencial de FGA para uma área de 3x3 pixels centrada na estação.

Nessa avaliação foram utilizadas uma tabela de contingência contendo o número de vezes em que houve detecção ou não, e o numero de vezes em que houve observação ou não (Tabela 4.7).

Tabela 4.7: Tabela de contingência para a avaliação da detecção dicotômica (e.g. Sim/Não). Os elementos nas células representam a contagem dos pares de detecção/observação.

Detecção	Observações		Total
	com potencial de FGA	sem potencial de FGA	
Detectou	YY	YN	YY+YN
Não detectou	NY	NN	NY+NN
Total	YY+NY	YN+NN	YY+YN+NY+NN

Os parâmetros estatísticos POD_y (proporção de observações positivas feitas corretamente) e POD_n (proporção de observações negativas feitas corretamente), sugeridos por Brown et al. (1997), na validação de técnicas de previsão ou detecção de cenários de FGA, foram empregados. Juntos, esses dois indicadores dão a medida da habilidade (TSS, *True Skill Statistic*, descrita em DOSWELL et al., 1990) de detecção

da técnica em discriminar observações com potencial de FGA positivas e negativas. A Tabela 4.8 mostra a definição dos indicadores utilizados.

Tabela 4.8: Parâmetros estatísticos utilizados no processo de verificação.

Parâmetro	Definição	Descrição
POD_y	$YY/(YY+NY)$	Probabilidade de detecção de observações com potencial de FGA
POD_n	$NN/(YN+NN)$	Probabilidade de detecção de observações sem potencial de FGA
TSS	$POD_y + POD_n - 1$	Nível de discriminação entre observações com potencial de FGA e sem potencial de FGA

Durante o dia, foram realizadas 270 observações, sendo 99 de nuvens com potencial de FGA e 171 de nuvens sem potencial de FGA ou de condições de céu claro sobre o continente, conforme descrito na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Tabela mostrando os valores obtidos na verificação para os pares de detecção/observação, para 1230 UTC.

Detecção (dia, 1230UTC)	Observações		Total
	com potencial de FGA	sem potencial de FGA	
Detectou	65	11	76
Não detectou	34	160	194
Total	99	171	270

A verificação noturna foi realizada considerando o horário de lançamento da radiossondagem (2330 UTC). Foram realizadas 252 observações, sendo 81 de nuvens com potencial de FGA e 171 de nuvens sem potencial de FGA ou de condições de céu claro sobre o continente, conforme apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Tabela mostrando os valores obtidos na verificação para os pares de detecção/observação, para 2330 UTC.

Detecção (noite, 2330UTC)	Observações		Total
	com potencial de FGA	sem potencial de FGA	
Detectou	47	167	214
Não detectou	34	4	38
Total	81	171	252

Os resultados estatísticos da verificação estão apresentados na Tabela 4.11. Os valores de PODy para período diurno foi de aproximadamente 66%, superando em quase 14% de detecção o valor de PODy para o período noturno, que ficou em 58%. Já os valores de PODn ficaram próximos de 94%, para o dia, e 98%, para noite. Tanto para o dia como para noite, os valores de TSS ficaram acima de 0.5, respectivamente 0.592 e 0.557, mostrando que a técnica e os limiares aplicados apresentaram boa habilidade em detectar nuvens com potencial de FGA.

Tabela 4.11: Resultados do processo de verificação para 1230 UTC e 2330 UTC.

Teste	Dia (1230UTC)	Noite (2330UTC)
PODy	0.656	0.580
PODn	0.936	0.977
TSS	0.592	0.557

5 ANÁLISE DE CASO

No dia 02 de agosto de 2011, uma aeronave tipo Caravan (C-98) da Força Aérea Brasileira (FAB) enfrentou FGA, com intensidade moderada a severa, por volta de 1430UTC, quando voava a aproximadamente 10.000FT (~ 3 km) de altitude, sobre a região serrana de Santa Catarina, na FIR-CW. Apesar de possuir sistemas antigelo e degelo, a aeronave foi obrigada a desviar sua rota prevista para sair das nuvens que estavam favorecendo a formação de gelo, por motivos de segurança de voo. Sobre a mesma área, foi emitido um AIRMET, reportando potencial de FGA pelo CMV-CW.

Nesse capítulo, são analisados o cenário sinótico atuante, dados do satélite GOES-12, imagens de radar, fotos do gelo formado, tiradas logo após a formação pela tripulação, perfis de radiossondagem, dados de superfície, e feita ainda a aplicação da análise multiespectral para o caso. Os objetivos desse estudo de caso são compor o cenário meteorológico associado ao evento e ainda mostrar a aplicabilidade da técnica multiespectral na detecção e monitoramento de áreas com nuvens com potencial de FGA.

5.1 Cenário sinótico

5.1.1 Análise sinótica de superfície

No horário do evento de FGA enfrentado pela aeronave (~1430 UTC, 02 de agosto de 2011) havia um ciclone extratropical em intensificação, que se aprofundou de 1005 hPa para 998 hPa, entre 00 UTC e 12 UTC, e estava localizado com centro ligeiramente a leste do Rio Grande do Sul (Figura 5.1, a e b). Associada a esse ciclone, ocorria forte baroclinia em superfície. Nas cartas de análise de superfície (12 UTC e 18 UTC) do dia 02 de agosto de 2011, também se observou uma onda frontal clássica, associada a esse ciclone extratropical (Figura 5.1, a e b). A linha frontal fria se estendeu desde o Acre até o estado de São Paulo, passando pelo Centro-Oeste. Uma crista do pós-frontal, avançou, pelo norte da Argentina, Paraguai e Bolívia, para o Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, onde as pressões ficaram em torno de 1019 hPa; a massa de ar polar, associada a essa crista, reduziu significativamente as temperaturas naquelas

regiões. Esse sistema frontal tinha associada uma advecção fria em 850 hPa (Figura 5.2, a e b), conforme reanálise do campo de vento meridional, com temperaturas em superfície próximas de 9°C, no setor pós-frontal, e próximas de 25°C, no setor pré-frontal e entre 14 UTC e 15 UTC (próximo ao horário do evento), os ventos em superfície variaram a direção de noroeste para sudoeste, com intensidade média variando entre 11 e 22KT, e rajadas de até 32KT, na região próxima ao evento.

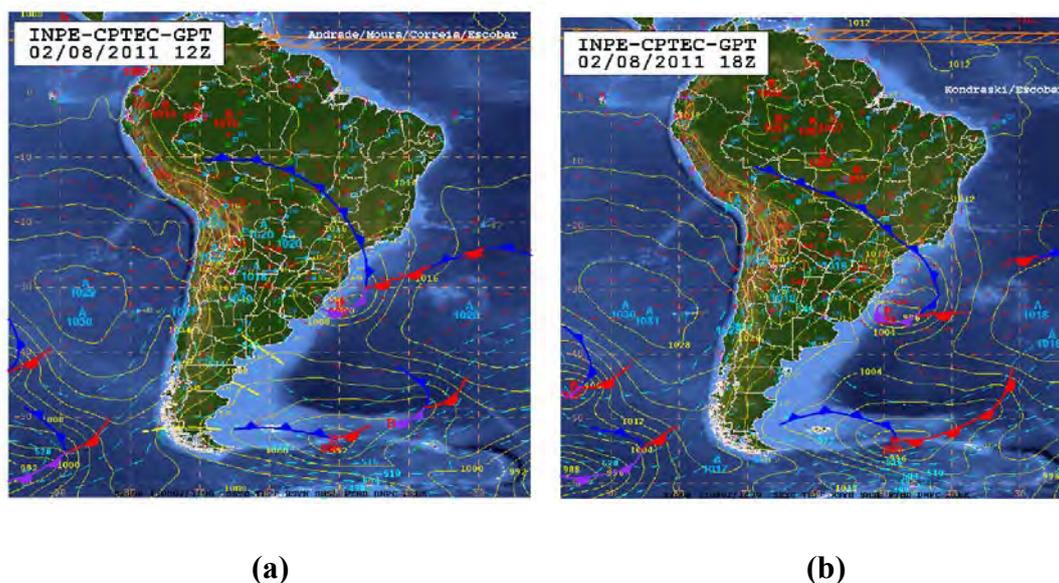


Figura 5.1: Análise de superfície para 12UTC (a) e 18UTC (b) do dia 02 de agosto de 2011. As isóbaras são as linhas amarelas, as isotermas são as linhas tracejadas em azul, as isoípsas são as linhas tracejadas em vermelho. A frente fria e o ciclone extratropical são indicadas.

Fonte: CPTEC-INPE.

5.1.2 Análise sinótica de altitude

A análise dos campos de escoamento e vento meridional em 850 hPa dá uma boa indicação do principal mecanismo forçante em escala sinótica, em altitude, existente na região onde houve o reporte de FGA: a advecção fria na parte sul e oeste do ciclone extratropical (Figura 5.2, a e b). O evento de FGA ocorreu ao norte do ciclone extratropical e a sudoeste da linha frontal.

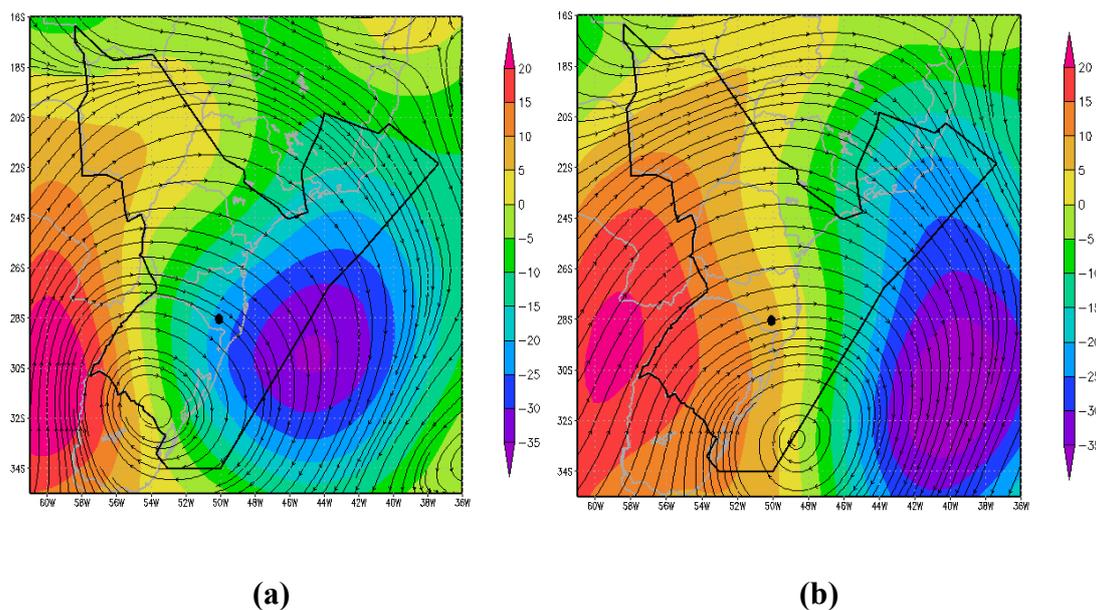


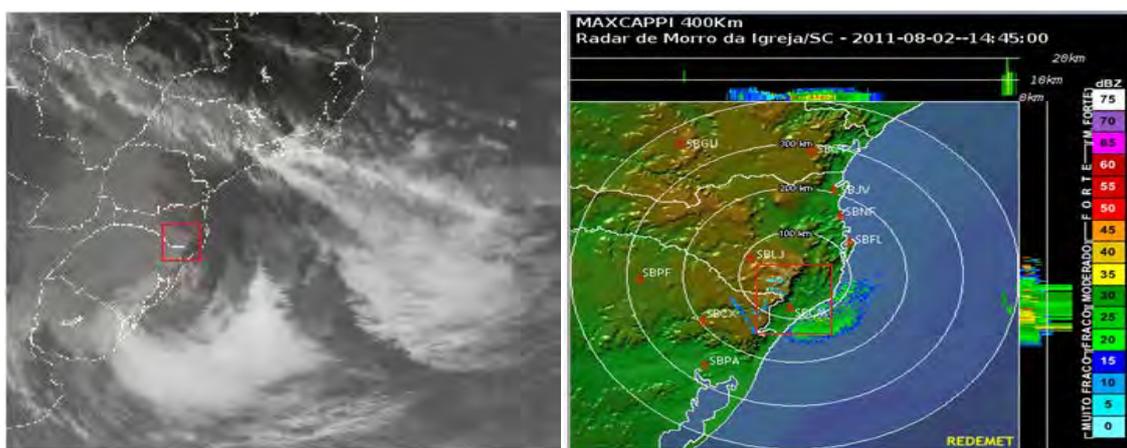
Figura 5.2: Campos de escoamento e velocidade meridional em 850hPa, gerados a partir de dados de reanálise do NCEP, sendo (a) 12 UTC e (b) 18 UTC. O ponto em preto indica a localização do evento de FGA.

5.2 Análise de dados de satélite e radar

O recorte da imagem do canal IR do satélite GOES-12 (Figura 5.3a), realizada no horário do evento, mostra que o mesmo ocorreu associado a nuvens estratiformes densas, relativamente quentes (tons de cinza mais escuro), que cobriram uma área extensa, englobando boa parte da FIR-BS e parte do Paraguai; essas nuvens estiveram relacionadas à intensa advecção fria na parte oeste e noroeste do ciclone extratropical em deslocamento sobre o litoral do RS. A imagem revela ocorrência de céu nublado a encoberto, com TTN média de -5°C , com baixa variabilidade espacial, representada pelo desvio padrão no valor 1, considerando uma área de 40×40 km, centrada sobre o pixel de localização da aeronave. Dados superfície, obtidos pela estação meteorológica de superfície de Porto Alegre (classe 1), confirmam a presença de nuvens altostratus.

A imagem MAXCAPPI de 400 km (Figura 5.3b) do Radar de Morro da Igreja/SC (1445UTC), localizado a cerca de 60 km a sudeste do local do evento de FGA, indica que a precipitação na região era fraca e em pontos isolados, com padrão de baixa

refletividade, variando entre 5 e 10 dBZ (fraca atividade). A ausência de banda brilhante (níveis dentro da nuvem onde os flocos de neve ou granizo se derretem e se transformam em chuva) dá mais uma indicação da ausência significativa de hidrometeoros na fase de gelo no local do evento. Assim, provavelmente, somente água líquida esteve presente, com a possibilidade de formação de GGS, em caso de presença de cisalhamento vertical.



(a)

(b)

Figura 5.3: Imagem de satélite do canal IR das 1430UTC (a) e imagem MAXCAPPI 400km das 1445UTC (b). O polígono em vermelho indica a região do evento de FGA.

Fonte: (a) – INPE (b) - REDEMET

5.3 Análise do perfil atmosférico

Embora na região do evento não haja estação meteorológica de altitude nas cercanias da localização do evento de FGA, é discutido o perfil atmosférico (Figura 5.4) obtido no dia 02 de agosto de 2011 às 1200UTC, pela estação meteorológica de altitude de Porto Alegre-RS (SBPA), situada à aproximadamente 257 km.

O perfil atmosférico de SBPA, plotado no diagrama Skew T -log p , é mostrado na Figura 5.4. Esse perfil revela ar seco acima de 400 hPa e ar saturado entre 700hPa (FL 100) e

870hPa (FL 040). Nessa camada, os valores de umidade relativa variaram entre 87 e 96%, e os valores de temperatura do ar decresceram de 0°C para -7.3°C, sendo, portanto um perfil com grande potencial de FGA. Pela técnica de Wang e Rossow (1995), estima-se que a camada de altostratus, com base em 0°C e topo em -7.3°C, aproximadamente, encontrava-se justamente nessa zona atmosférica, com espessura em torno de 1750m. O perfil de vento de SBPA mostra ventos fortes com cisalhamento vertical (variando de 55 a 40kt com a altitude, na camada em análise), fato que sugere, sem deixar de considerar a TTN inferior a -15°C, a possibilidade do desenvolvimento de GGS, cenário mais crítico para as aeronaves.

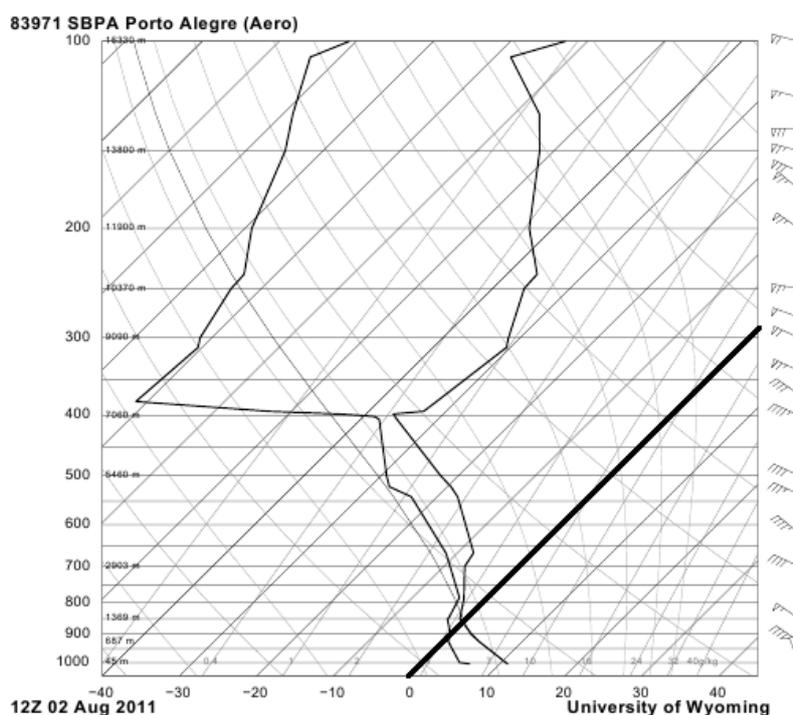


Figura 5.4: Diagrama Skew T -log p mostrando os perfis de temperatura (°C), ponto de orvalho (°C) e de direção e velocidade do vento (kt), obtidos pela estação de radiossondagem de Porto Alegre, no dia 02 de agosto de 2011 às 1200 UTC. A isoterma de 0°C está evidenciada pela linha diagonal em preto.

Fonte: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> .

As análises dos diagramas Skew T -log p de Uruguaiana (SBUG) e Santa Maria (SBSM) indicam condições termodinâmicas semelhantes ao perfil de SBPA, sendo perfis com potencial de FGA (Figura 5.5 a e b).

Os boletins meteorológicos METAR de SBPA, SBUG e SBSM reportaram a presença de céu nublado a encoberto por várias horas, incluindo o horário do evento.

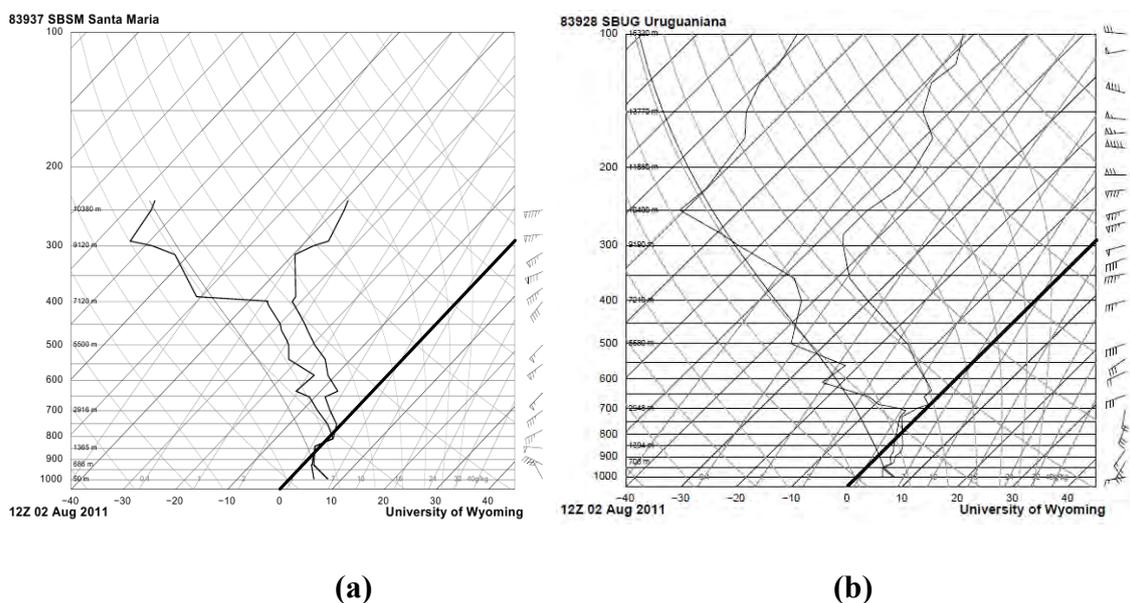


Figura 5.5: Diagramas Skew T-logp mostrando os perfis de temperatura (°C), ponto de orvalho (°C) e de direção e velocidade do vento (kt), obtidos pelas estações de radiossondagem de Santa Maria (a) e Uruguaiana (b), no dia 02 de agosto de 2011 às 1200 UTC. Em ambos os diagramas, a isoterma de 0°C está evidenciada pela linha diagonal em preto.

Fonte: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.

5.4 Análise de fotos do gelo formado na aeronave

As fotos tiradas pela tripulação da aeronave (Figura 5.6 a, b, c e d) confirmam a presença de FGA no trem de pouso (Figura 5.6 a), nos parabrisas (Figura 5.6 c), na parte inferior das asas (Figura 5.6 b) e nos bordos de ataque (parte frontal das asas, Figura 5.6 d). Sand et al. (1984), em seu estudo realizado com aeronave de pesquisa, identificaram que a rápida acreação de gelo, incluindo partes inferiores das asas, esteve relacionada à presença de GGS. Nesses tipos de cenários, os voos sofreram impacto severo, com

perda aerodinâmica significativa, tendo os pilotos que abandonar rapidamente as nuvens analisadas. A Figura b, que mostra pelotas de gelo em partes inferiores da asa, sugere que o cenário estava favorável à formação de GGS, de acordo com SAND et al. (1984). Efeitos locais relacionados à topografia da região serrana de Santa Catarina podem ter contribuído para a formação de GGS, por intensificarem o crescimento das gotículas pelo processo de colisão-coalescência.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.6: Fotos do gelo formado no trem de pouso (a), na parte inferior da asa (b), no parabrisa (c) e na parte frontal da asa (d).

Fonte: DECEA.

5.5 Cenário meteorológico atuante

A análise feita até agora, indica que aeronave voou em cruzeiro dentro da nuvem e estava próxima ao topo (parte da nuvem que pode conter a maior concentração de ALS, segundo RAUBER e TOKAY, 1991), de uma nuvem relativamente quente ($TTN < -15^{\circ}\text{C}$), que em geral oferece maior risco de FGA e maior severidade, num perfil vertical com cisalhamento do vento, assim com a possibilidade de formação de GGS pelo processo de colisão-coalescência, configurando-se um cenário meteorológico com potencial de grande impacto na aeronave, com a formação de FGA.

5.6 Exemplo de aplicação da análise multiespectral

A Figura 5.7 mostra um exemplo de aplicação da análise multiespectral para o monitoramento e previsão *nowcasting* de nuvens com potencial de FGA. Aqui foram processados os limiares das diferenças multiespectrais, do canal infravermelho e do canal visível, discutidos nessa pesquisa, e aplicados a esse estudo de caso, a partir dos dados do imageador do GOES-12, para 1430UTC, horário estimado do evento de FGA. No produto gerado, as regiões realçadas em azul representam as nuvens estratiformes com potencial de FGA. As demais nuvens (convectivas ou estratiformes que não oferecem potencial de FGA) ou superfícies são representadas em escala de cinza, utilizando-se a temperatura de brilho do canal IR. Uma análise do produto mostra que o mesmo foi representativo das condições de FGA reinantes na FIR-CW, conforme discutido na análise meteorológica do estudo de caso, detectando uma extensa área favorável, incluindo a região onde a aeronave sofreu impacto moderado a severo, tendo que adotar medidas mitigadoras, embora tivesse equipamentos de proteção.

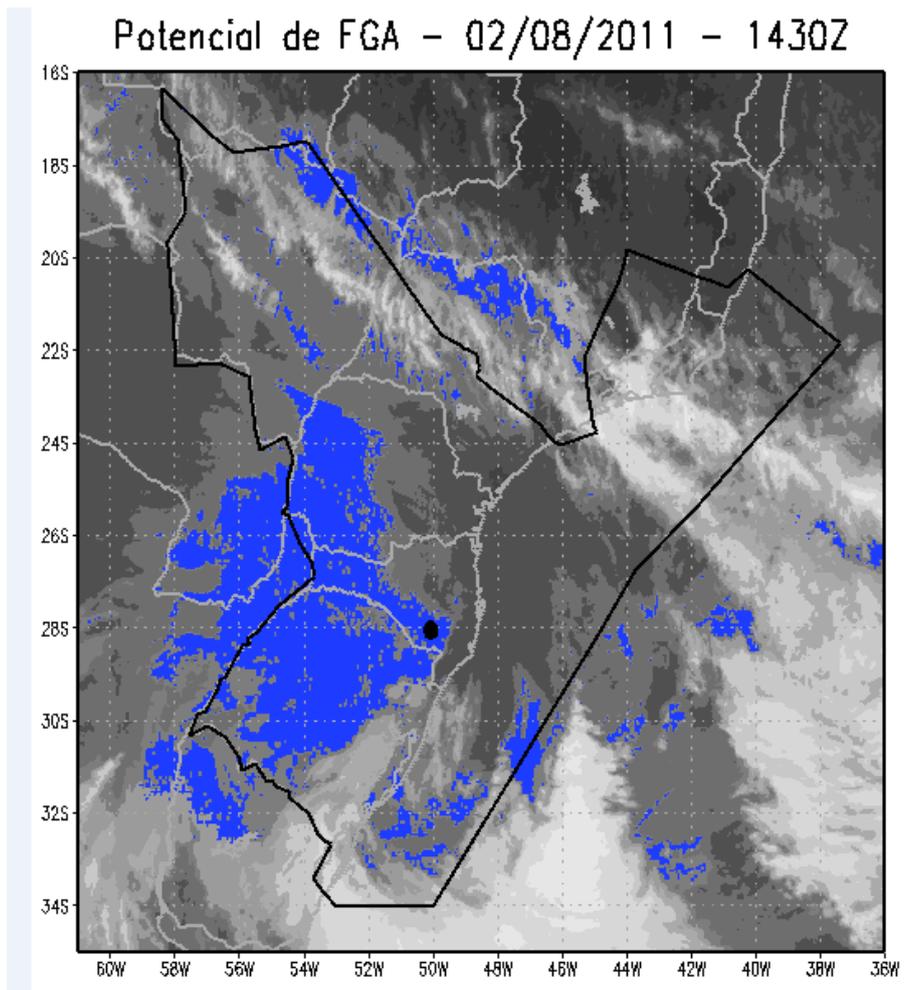


Figura 5.7: Imagem gerada a partir da análise multiespectral baseada nos dados do imageador do satélite GOES-12 para o dia 02 de agosto de 2011 às 1430 UTC. As áreas realçadas em azul indicam a presença de nuvens com potencial de FGA. O ponto em negrito mostra a região onde foi reportada FGA pela aeronave.

Abaixo segue a sequência temporal de imagens da análise multiespectral, entre os horários de 1200 UTC até 1400 UTC (Figura 5.8).

(imagens (a) a (e)). Tal fato pode ser explicado pela característica espectral do CH₂, que compõe a diferença CH₂-CH₄. Próximo aos horários do crepúsculo e ocaso (valores de ângulo zenital acima de 70°), as radiâncias medidas nesse canal podem apresentar ruídos, fazendo que a diferença CH₂-CH₄ não alcance o limiar (10 °C), representativo da condição de FGA existente.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Conclusões do trabalho

Eventos de FGA observados por aeronaves civis e militares foram investigados, e a análise multiespectral com o uso de 4 dos 5 canais do imageador do satélite GOES-12 foi empregada, conforme sequência de análise do algoritmo proposto por Ellrod e Bailey (2006), para a obtenção de limiares e de uma equação, por meio de observações empíricas, considerando as FIR-CW e FIR-BS, a fim de detectar nuvens com potencial de FGA; aquelas regiões do espaço aéreo brasileiro foram as duas únicas nas quais foram originados reportes.

A análise dos AIREPs mostrou que aproximadamente 28% dos eventos ocorreram em cenário estratiforme e aproximadamente 72% dos eventos ocorreram em cenário convectivo, os quais estiveram relacionados à, respectivamente, 28% e 20% dos casos com intensidade severa. Vale frisar que, apesar de totalizar menos de um terço dos casos, o cenário estratiforme foi responsável pela maioria dos AIREPs de FGA com intensidade severa.

Houve uma tendência de concentração das ocorrências de FGA em rotas que liga os aeroportos de maior movimento aéreo e também nos horários de maior densidade de tráfego, com a maior fração de eventos ocorrendo acima de 4000 metros de altitude, sem ocorrências entre a superfície e 2000 metros. A FIR-CW apresentou a maioria dos casos (63,5%); resultado que sugere uma relação com sistemas transientes, tais como frentes frias e quentes, centros de baixa pressão e advecções frias, que se deslocam com maior frequência pela FIR-CW do que na FIR-BS.

Durante todo ano houve reportes de FGA, sendo 60% no período primavera/verão e 40% no período de outono/inverno.

A avaliação da temperatura média do topo das nuvens estratiformes mostrou que 80% dos pixels associados aos AIREPs de FGA tinham temperatura entre -2°C e -20°C . Aquele parâmetro, juntamente com a análise do seu desvio-padrão, como parâmetro de textura, indicou uma relação com a intensidade; eventos severos só aconteceram com temperatura média de topo não mais frias do que aproximadamente -13°C , com desvio-padrão de valor não maior que 3.

Os limiares empíricos obtidos para detecção de FGA e a equação empírica para a detecção de cirros finos, que podem configurar falsas assinaturas, foram empregados de acordo com a sequência de análise descrita em Ellrod e Bailey (2006). Uma avaliação com o uso do parâmetro estatístico TSS demonstrou que o processo de detecção aplicado obteve resultados bem satisfatórios, principalmente durante o dia, onde é aplicado também o canal visível. As seguintes análises foram empregadas:

Para o dia:

- 5) Análise de TTN, usando o intervalo entre 0°C e -20°C ;
- 6) Análise de reflectância, selecionando valores acima de 45%;
- 7) Análise da DTB CH2-CH4, considerando somente valores superiores a 10°C ; e
- 8) Análise da DTB CH4-CH6, verificando se essa DTB é maior ou igual a $0.53\text{TTN} + 15$, onde a TTN é obtida a temperatura de brilho no CH4.

Para a noite:

- 4) Análise de TTN, usando o intervalo entre 0°C e -20°C ;
- 5) Análise da DTB CH2-CH4, assumindo como limiar o valor médio encontrado na análise discriminante (DTB CH2-CH4 menor -1.6°C); e
- 6) Análise da DTB CH4-CH6, verificando se essa DTB é maior ou igual a $0.53\text{TTN} + 15$.

Num caso severo ocorrido na FIR-CW, que impactou o voo, obrigando o piloto a desviar a sua rota e mudar de nível de voo, a condição sinótica – advecção fria na parte oeste de um ciclone extratropical localizado sobre o litoral do Rio Grande do Sul – favoreceu a formação de nuvens com potencial de FGA sobre uma área extensa, abrangendo os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. A partir desse caso, detalhadamente investigado, a partir de várias fontes de dados observacionais, foi possível identificar o potencial de aplicação do processo de detecção discutido nesse trabalho. Tal é ferramenta baseada em dados de satélite pode configurar-se mais importante ainda em regiões remotas, onde impera a escassez de dados observacionais

que são utilizados pelos previsores do SISCEAB para a detecção e monitoramento do fenômeno.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros sugerem-se:

- a) Com o uso da análise de multiespectral, considerando os limiares adotados, realizar trabalho de climatologia da frequência nuvens de FGA sobre a América do Sul, para determinar-se em quais regiões e períodos do ano essas nuvens são mais favoráveis;
- b) Verificar a relação entre os sistemas meteorológicos em escala sinótica, atuantes sobre a América do Sul, e os eventos de formação de gelo em aeronaves; e
- c) Testar a aplicação da análise de imagens multiespectrais a partir de dados do sensor MODIS, tendo em vista que a nova geração dos satélites GOES-R fornecerá dados em diversos canais existentes no sensor MODIS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRCRAFT OWNERS AND PILOTS ASSOCIATION (AOPA). **Safety advisor, weather n. 1:** aircraft icing. Frederick, MD, 2002.
- Disponível em: <<http://www.aopa.org/asf/publications>>. Acesso em: 20 fev. 2011.
- ALLEN, R. C.; DURKEE, P. A.; WASH, C. H. Snow/cloud discrimination with multispectral satellite measurements. **J. Appl. Meteor.**, v. 29, p. 994–1004, 1990.
- BAIN, M.; GAYET J. F. Aircraft measurements of icing in supercooled and water droplet/ice crystal clouds. **J. Appl. Meteor.**, v.21, p. 631–641, 1982.
- BERNSTEIN, B.C.; CARRIERE, J. M.; ALQUIER S.; LE BOT, C.; MOULIN. E. Statistical verification of forecast icing risk indices. **Meteor. Appl.**, v.4, p.115–130, 1997.
- BERNSTEIN, B. C.; OMERON, T. A.; MCDONOUGH, F.; POLITOVICH M. K. The relationship between aircraft icing and synoptic scale weather conditions. **Wea. Forecasting**, v.12, p. 742–762, 1997.
- BERNSTEIN, B. C.; POLITOVICH, M. K.; MCDONOUGH, F. Surface weather features associated with freezing precipitation and severe in-flight aircraft icing. **Atmos. Res.**, v. 46, p. 57–74, 1998.
- BERNSTEIN, B. C.; RATVASKY, T.; MILLER, D.; MCDONOUGH, F. Freezing rain as an in-flight icing hazard. Preprints, Eighth Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Dallas, TX, **Amer. Meteor. Soc.**, p. 38–42, 1999.
- BERNSTEIN, B. C. Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events. **Wea. Forecasting**, v. 15, p. 485–508, 2000a.
- BERNSTEIN, B. C.; MILLER, D.R.; WOLFF, C.A.; CUNNING, G. Current icing potential (CIP): algorithm description and comparison with aircraft observations. **J. Appl. Meteor**, v. 44, p. 969-986, 2005.
- BERNSTEIN, B. C.; WOLFF, C. A.; MCDONOUGH, F. An inferred climatology of icing conditions aloft, including supercooled large drops. Part I: Canada and the continental United States. **J. Appl. Meteor. Climatol.**, v. 46, p. 1857–1878, 2007.
- BRASIL. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Manual de centros meteorológicos**. Rio de Janeiro: MCA, 2010. (MCA 105-12).
- BRASIL. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Voo. **Informações meteorológicas de aeronaves**. Rio de Janeiro: IMA, 1990. (IMA 105-5).
- BROWN, B. G.; THOMPSON, G.; BRUINTJES, R. T.; BULLOCK, R.; KANE, T. Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part II: Statistical verification results. **Wea. Forecasting**, v. 12, p. 890–914, 1997.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Procedures for air navigation services** - air traffic management. 15. ed. Doc 4444-ATM/501 Amendment No. 1.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **International Standards and Recommended Practices** - meteorological service for international air navigation. 17. Ed. Annex 3.

CARRIERE, J.; ALQUIER, S.; LE BOT, C.; MOULIN, E. Some results of a statistical evaluation of forecast icing risk algorithms. **Meteor. Appl.**, v.4, p. 115–130, 1997.

CIVIL AVIATION AUTHORITY. **Aircraft icing handbook**. 1 Edição 2000. Disponível em <http://www.caa.govt.nz/fulltext/safety_booklets/aircraft_icing_handbook.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2011.

COBER, S. G.; STRAPP, J. W.; ISAAC, G. A. An example of supercooled drizzle drops formed through a collision-coalescence process. **J. Appl. Meteor.**, v. 35, p. 2250–2260, 1996.

CORTINAS JR., J. V.; BERNSTEIN, B. C.; ROBBINS, C. C.; STRAPP, J. W. An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada. **Wea. Forecast.**, v. 19, p. 377–390, 2004.

CURRY, J. A.; LIU, G. Assessment of aircraft icing potential using satellite data. **J. Appl. Meteor.**, v. 31, p. 605–621, 1992.

DOSWELL, C. A.; DAVIES-JONES, R.; KELLER, D. L. On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables. **Wea. Forecasting**, v. 5, p. 576–585, 1990.

ELLROD, G. P.; BAILEY, A. A. Assessment of aircraft icing potential and maximum icing altitude from geostationary meteorological satellite data. **Wea. Forecasting**, v. 22, p.160–174, 2006.

FERREIRA, N. J.; SANTOS, C. C.; SCOFIELD, G. B.; ARAI, E. Monitoramento de nuvens de gelo e de água líquida super resfriada sobre as regiões Sul e Sudeste do Brasil utilizando-se imagens multiespectrais do GOES-8. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** 2000. p. 3892-3896. CD-ROM, Papel. (INPE-12461-PRE/7763).

FUCHS, W.; SCHICKEL, K. P. Aircraft icing in visual meteorological conditions below stratus clouds. **Atmos. Res.**, v. 36, p. 339–345, 1995.

GEERTS, B. **Supercooled liquid water and airframe icing**. 1998. Disponível em: <<http://www-das.uwyo.edu/~geerts/cwx/notes/chap08/supercooled.html>>. Acesso em: 06 abr. 2011.

GREEN, S. D. A Study of U. S. In-flight icing accidents and incidents, 1978 to 2002. In: AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 44., 2006, Reno, Nevada. **Proceedings...** Reno, Nevada: AIAA, 2006.

GUTTMAN, N. B.; JECK, R. K. Aircraft icing environment in low ceiling conditions near Washington, D. C. **Wea. Forecasting**, v. 2, p. 114-126, 1987.

- HILL, G. E. Analysis of precipitation augmentation potential in winter orographic clouds by use of aircraft icing reports. **J. Appl. Meteor.**, v. 21, p.165–170, 1982.
- KELSCH, M.; WHARTON, L. Comparing PIREPs with NAWAU turbulence and icing forecasts: Issues and results. **Wea. Forecasting**, v. 11, p. 385–390, 1996.
- KEY; INTRIERI, J. Cloud particle phase determination with the AVHRR. **J. Appl. Meteor.**, v. 39, p. 1797–1805, 2000.
- KIDDER, S.Q.; VONDER HAAR, T.H. **Satellite meteorology: an introduction**. Academic Press, 1995. 466 p.
- KOENIG, G.; RYERSON C.; KMIEC, R. UAV icing flight simulation. In: AEROSPACE SCIENCES MEETING & EXHIBIT, 40., 2002, Santa Maria, CA. **Proceedings...** Santa Maria: AIAA, 2002.
- LE BOT, C. SIGMA: System of icing geographic identification in meteorology for aviation. In: CONF. ON AVIATION, RANGE AND AEROSPACE METEOROLOGY (ARAM), 11., 2004, Hyannis, MA. **Proceedings...** Hyannis: Amer. Meteor. Soc., 2004. CD-ROM.
- LEE, T. F.; CLARK, J. R.; SWADLEY, S. D. Potential applications of the SSM/I cloud liquid water parameter to the estimation of marine aircraft icing. **Wea. Forecasting**, v. 9, p. 173–182, 1994.
- LEE, T. F.; TURK, F. J.; RICHARDSON K. Stratus and fog products using *GOES-8-9* 3.9 _m data. **Wea. Forecasting**, v.12, p. 664–677, 1977.
- LIU, K.N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. Academic Press, 2002.
- MINNIS, P.; SMITH, W. L.; NGUYEN, JR. L.; KHAIYER, M. M.; SPANGENBERG, D. A.; HECK P. W.; PALIKONDA R.; BERNSTEIN B. C.; MCDONOUGH, F. A real-time satellite-based icing detection system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CLOUDS AND PRECIPITATION (ICCP), 14., 2004, Bologna, Italy. **Proceedings...** Bologna, 2004.
- PETTY K. R.; FLOYD, C. D. J. **A statistical review of aviation airframe icing accidents in the US**. Washington, D.C: National Transportation Safety Board, 2004.
- POBANZ, B. M.; MARWITZ, J. D.; POLITOVICH, M. K. “Conditions associated with large-drop regions”, **J. Appl. Meteor.** , v. 33, p. 1366-1372, 1994.
- POLITOVICH, M. K. Aircraft icing caused by large supercooled droplets. **J. Appl. Meteor.**, v. 28, p. 856–868, 1989.
- POLITOVICH, M. Response of a research aircraft to icing and evaluation of severity indices. **Journal of Aircraft**, v. 33, p. 291-297, 1989.
- PRUPPACHER, H. R. A new look at homogeneous ice nucleation in supercooled water drops. **J. Atmos. Sci.**, v. 52, p.1924-1933, 1995.

- SAND, W. R.; COOPER, W. A.; POLITOVICH, M. K.; VEAL, D. L. Icing conditions encountered by a research aircraft. **J. Climate Appl. Meteor.**, v. 23, p. 1427–1440, 1984.
- SCHULTZ, P.; POLITOVICH, M. K. Toward the improvement of aircraft-icing forecasts for the continental United States. **Wea. Forecasting**, v. 7, p. 491–500, 1992.
- SCHWARTZ, B. The quantitative use of PIREPs in developing aviation weather guidance products. **Wea. Forecasting**, v.11, p. 372–384, 1996.
- SMITH, W. L.; MINNIS, J. R.; BERNSTEIN, P. B.; HECK P. W. Supercooled liquid water cloud properties derived from GOES: Comparisons with in-situ aircraft measurements. In: CONFERENCE ON AVIATION, RANGE AND AEROSPACE METEOROLOGY, 10., 2002, Portland, OR. **Proceedings...** Portland: Amer. Meteor. Soc., 2002.
- TAFFERNER, A.; HAUF T.; LEIFELD C.; HAFNER, T.; LEYKAUF, H.; VOIGT, U. ADWICE: Advanced diagnosis and warning system for aircraft icing environments. **Wea. Forecasting**, v. 18, p.184–203, 2003.
- THOMPSON, G.; BULLOCK, R.; LEE, T. F. Using satellite data to reduce spatial extent of diagnosed icing. **Wea. Forecasting**, v.12, p.185–190, 1997.
- THOMPSON, G.; BRUINTJES, R. T.; BROWN, B. G.; HAGE, F. Intercomparison of in-flight icing algorithms. Part I: WISP94 real-time icing prediction and evaluation program. **Wea. Forecasting**, p.12, p. 878–889, 1997a.
- YOUNG, S.; PLATT, C.; AUSTIN, R.; PATTERSON, G. Optical properties and phase of some midlatitude, midlevel clouds in ECLIPS. **J. Appl. Meteor.**, v. 39, p. 135-152, 2000.
- YOUNG, G. S.; BROWN, B. G.; MCDONOUGH, F. An inferred icing climatology—Part I: Estimation from pilot reports and surface conditions. In: CONFERENCE ON AVIATION, RANGE AND AEROSPACE METEOROLOGY, 10., 2002, Portland, OR. **Proceedings...** Portland: Amer. Meteor. Soc., 2002.
- WANG, J. W.; ROSSOW, W. B. Determination of cloud vertical structure from upper-air observations. **J. Appl. Meteor.**, v. 34, p. 2243–2258, 1995.
- WALLACE, M. J.; HOBBS, V. P. **Atmospheric science: an introductory survey.** Academic Press, 2006.
- WEAVER, J. F.; LINDSEY D.; BIKOS D.; SCHMIDT C. C.; Prins, E. Fire weather detection using GOES rapid scan imagery. **Wea. Forecasting**, v.19, p.496–510, 2004.
- WELCH, R.; COX, S.; DAVIS, J. Solar radiation and clouds. **Meteorol. Monogr.**, v. 17, p. 96, 1980.