



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/08.23.16.41-RPQ

DESENVOLVIMENTO DE UM ÍNDICE DE PREVISÃO DE GEADAS: TÉCNICA E VALIDAÇÃO

José Roberto Rozante
Alex Almeida Fernandes
Vinícius Matoso Silva

URL do documento original:
<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RMFDRE>>

INPE
São José dos Campos
2018

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/08.23.16.41-RPQ

DESENVOLVIMENTO DE UM ÍNDICE DE PREVISÃO DE GEADAS: TÉCNICA E VALIDAÇÃO

José Roberto Rozante
Alex Almeida Fernandes
Vinícius Matoso Silva

URL do documento original:
<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3RMFDRE>>

INPE
São José dos Campos
2018



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

“Construímos muros demais e pontes de menos.”.

Isaac Newton

Aos colegas de trabalho e aos meus queridos filhos Vinícius e Gabriela.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro através do projeto “Índice de ocorrência de geadas a partir de modelagem numérica de alta resolução” (Processo número: 443698/2014-7), e ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) pela disponibilização da infra-estrutura.

RESUMO

Tendo em vista o enorme impacto que ocorrências de geadas podem causar aos setores ligados à produção de alimentos de um país, propõe-se neste trabalho a elaboração de um índice permita prever, com dias de antecedência, a ocorrência deste fenômeno. O índice de geada (IG) trata-se de uma equação, devidamente calibrada, que leva em conta: a) as principais variáveis meteorológicas (temperatura e umidade do ar em 2 metros, vento em 10 metros, nebulosidade e pressão atmosférica) que favorecem ou desfavorecem a formação de geadas, b) os pesos que cada uma dessas variáveis contribui para a formação do fenômeno, c) as médias e desvios padrões dessas variáveis obtidos apenas em casos de episódios de geadas. As variáveis meteorológicas utilizadas no IG são previstas por um modelo regional de tempo. Os episódios de geadas, utilizados para os cálculos das médias e desvios padrões, foram definidos a partir de dados observados de temperaturas iguais ou inferiores de 6 graus Celcius. Para calibrar o IG foi utilizado um período de dados de 5 anos (2012 até 2016) considerando apenas meses em que ocorrem geadas na região de estudo (maio, junho, julho, agosto e setembro). Durante a calibração foram obtidos os pesos utilizados na equação do IG e os limiares que permitem decidir se ocorreu ou não o evento de geada. Os resultados da calibração mostraram (como esperado) que a temperatura é responsável pela maior contribuição, sendo que o restante das variáveis apresentaram os mesmos valores de pesos. Após a calibração do índice e obtenção dos limiares, o IG foi aplicado para condições atmosféricas dos meses que ocorrem geadas para o ano de 2017. No intuito de verificar se o IG poderia contribuir satisfatoriamente com o previsor de tempo em uma rotina operacional, optou-se então em comparar os resultados do IG com as saídas de temperatura do modelo numérico. Os resultados mostram que para as três áreas analisadas, e todos os horários de previsão, o IG apresentou resultados mais satisfatórios quando comparado com as previsões de temperaturas do modelo regional. Este fato ocorreu tanto no período de calibração, quanto para o ano de 2017. Neste sentido, a utilização do IG em um ambiente operacional proporcionaria melhorias consideráveis na previsão de eventos de geadas.

ABSTRACT

The frost index (IG) is an equation, duly calibrated, which takes into account: a) the main meteorological variables that favor or oppose the formation of frosts b) the weights that each of these variables contribute to the formation of the phenomenon, c) the means and standard deviations of these variables obtained only in cases of episodes of frost. The meteorological variables used in the IG are predicted by a regional weather model. The frost episodes, used for calculations of means and standard deviations, were defined from observed data of temperatures equal to or less than 6 degrees Celsius. The calibration results showed (as expected) that the temperature is responsible for the largest contribution, and among themselves, the rest of the variables took on equal values of the weights. After calibration of the index and the determination of thresholds, the IG was applied to the atmospheric conditions for the months in which frost occurred, for the year 2017. In order to verify if the IG could contribute satisfactorily to operational weather forecasting, we then compare the results of the IG with the temperature outputs of the numerical model. The results show that for the three areas analyzed, and all the forecasting schedules, the IG presented more satisfactory results when compared to the regional model temperature forecasts. This occurred in both the calibration period and the year 2017. In this sense, the use of the IG in an operational environment would provide considerable improvements in the prediction of frost events.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1 – Média espacial das previsões de 24, 48, 72, 96, 120 horas, considerando o domínio de estudo, das médias (linhas) e desvios padrões (barras verticais) das variáveis de temperatura observada (a), temperatura prevista (b), pressão ao nível médio do mar (c), magnitude do vento (d), umidade relativa (e) e nebulosidade (f).....	15
Figura 2 - Média entre as previsões de 24, 48, 72, 96 e 120 horas das variáveis médias (calculadas em casos de geada) da temperatura observada (a), temperatura prevista (b), pressão ao nível médio do mar (c), magnitude do vento, umidade relativa (e) e nebulosidade (f).	18
Figura 3 - Média dos limiares entre os horários de previsão de 24, 48, 72, 96 e 120 (a), e média espacial dos limiares para cada horário de previsão (b).....	19
Figura 4 - Diagrama de performance (Roebber, 2009) do IG (preto) e da temperatura prevista pelo modelo (vermelho) para o período de calibração (painel esquerdo) e ano de 2017 (painel direito) das regiões R1 (a,b), R2 (b,c) e R3 (c,d). Os círculos representam os horários de previsões, sendo que o círculo de raio menor está associado às previsões de 24 horas, enquanto que o de raio maior com as previsões de 120 horas.....	25

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 1- Tabela de contingência com análise comparativa dos acertos e erros nas estimativas da ocorrência (“SIM”) e não ocorrência (“NÃO”) de um determinado evento.....	11
Tabela 2- Tabela contendo os índices estatísticos, formulas, significados e valores assumidos utilizados para a avaliação.....	12
Tabela 3- Tabela contendo os pesos, associados às variáveis meteorológicas, que apresentaram valores mais elevados de PC dentre todas as combinações para as previsões de 24, 48,72, 96 e 120 horas.....	13
Tabela 4- Número de eventos de geadas ocorridos durante o período de calibração e ano de 2017 para cada uma das três regiões.....	20

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Pág.

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais	
RAF	Razão de Falso Alarme	
ISC	Índice de Sucesso Crítico	
PC	Proporção Correta	
POD	Probabilidade de Detecção	
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos	
ETS	Equitable Threat Score	

LISTA DE SÍMBOLOS

Pág.

$^{\circ} W$	Longitude Oeste
$^{\circ} S, ^{\circ} N$	Latitude Sul e Norte, respectivamente
\sum	Somatória
K	Kelvin
σ	Erro médio
$\overline{\sigma_{(m)}}$	Viés médio
D	Total de dias
$\overline{\sigma_{(m)}^2}$	Erro quadrático médio
F, A	Previsões, Análises respectivamente
M	Modelos
x	longitude
y	latitude
z	Nível vertical
t	tempo
x	longitude

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 METODOLOGIA.....	5
2.1 DADOS	5
2.2 DESCRIÇÃO DO MODELO REGIONAL ETA.....	6
2.3 ÍNDICE DE GEADA (IG)	7
2.4 MÉTODO DE AVALIAÇÃO	11
3 RESULTADOS.....	13
3.1 PERÍODO DE CALIBRAÇÃO.....	13
3.2 APLICABILIDADE DO IG	19
4 CONCLUSÃO	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1 INTRODUÇÃO

Vários fenômenos atmosféricos que ocorrem no Brasil causam muitos prejuízos à sociedade. Porém a geada pode ser considerada um dos mais impactantes para a economia do país, principalmente no que diz respeito aos setores ligados a produção de alimentos. Um exemplo pode ser visto em Hewitt (1983) onde o autor descreve os efeitos da geada na produção de café no Brasil durante os anos de 1960 e 1970. Em anos com altos índices de incidência de geadas ocorrem um queda substancial na produção, e conseqüentemente a escassez do produto acarreta a elevação do preço, tanto no mercado interno como no externo. Um exemplo clássico deste fato foi o episódio de geada ocorrido na noite de 16 de julho de 1975 na região sul do Brasil, que provocou forte queda na produção de café e um aumento em até quase 200% no preço do quilo (Margolis, 1979).

No contexto meteorológico, a geada é tecnicamente definida como sendo a formação de cristais de gelo sobre as superfícies expostas, seja por congelamento do orvalho ou por mudança de fase do vapor para gelo (Blanc et al., 1963), sendo caracterizada pela ocorrência de temperaturas abaixo de 0°C medidas em abrigos meteorológicos entre as alturas de 1.25 e 2 metros (Lawrence, 1952; Snyder e Melo-Abreu, 2005). Snyder, Paw U e Thompson (1987) e Kalma et al. (1992) definiram este fenômeno em duas categorias: advectiva e por perda radiativa. Geadas advectivas ocorrem devido à incursão da massa de ar polar sobre o continente, e podem ocorrer tanto durante o dia quanto a noite. Geadas por perda radiativa ocorrem durante noites de céu claro, sem vento, com inversão térmica e predomínio de um centro de alta pressão. Em algumas situações, a combinação entre essas duas categorias também podem ocorrer.

As geadas, embora sejam fenômenos locais, vários autores associam as suas ocorrências a padrões sinóticos. Sobre a América do Sul, os principais sistemas sinóticos que influenciam na ocorrência das geadas são: a) entrada

de sistemas frontais (Parmenter, 1976), b) posicionamento de anticiclones (Hamilton e Tarifa, 1978; Rogers e Rohl,1991), c) teleconexões (Fortune e Kousky., 1983; Müller e Ambrizzi, 2007), d) escoamento em altos níveis da atmosfera (Satyamurty et al.,1990), e) deslocamento de trens de onda de Rossby (Müller e Berri, 2007), f) intensificação e posicionamento dos jatos subtropical e polar (Müller et al., 2005). Estudos pioneiros (Müller et al., 2000), buscando relacionar episódios de ENSO com geadas na América do Sul, mostraram que em anos de El Nino a ocorrência de geadas é inferior. No entanto, devido à alta variabilidade interanual das variáveis estudadas, não fica clara a relação entre as intensidades dos episódios de geadas e eventos de ENSO.

Devido ao enorme impacto que a ocorrência de geadas causa ao setor agrícola do país, inúmeros trabalhos científicos vem sendo publicados abordando principalmente os prejuízos causados por este fenômeno na cultura de; i) café (Androcioli Filho et al., 2000), ii) pêssego (Szewczuk et al. 2007), iii) cana de açúcar (Monteiro e Sentelhas, 2014), iv) milho (Carter, 1995), v) feijão (Meyer e Badaruddin, 2001), vi) maçãs (Eccel et al., 2009), videiras (Brixner et al., 2014), canolas (Perissato et al., 2013) e entre outros insumos. A minimização dos danos provocados pelas geadas pode ser feita tomando medidas preventivas (proteção passiva), ou atuando ativamente durante a ocorrência da geada (Snyder e de Melo-Abreu, 2005). As principais técnicas de prevenção a geadas utilizadas são; i) nevoeiros artificiais que consiste em evitar a perda radiativa, ii) cobertura sobre as culturas, iii) aquecimento direto do ar, iv) ventilação forçada, v) rega por aspersão, etc.

O conhecimento das condições atmosféricas favoráveis para a ocorrência da geada, juntamente com as técnicas empregadas para minimizar seus danos, de nada adianta se não tivermos uma maneira de prever, com qualidade, o estado da atmosfera com certo tempo de antecedência. Neste sentido, sistemas de alerta de geadas tem sido desenvolvidos/testados com

base em previsões de modelos numéricos (Prabha, 2008), e redes neurais (Ghielmi and Eccel, 2006).

Tendo em vista os impactos negativos causados pelos eventos de geadas na economia do Brasil, pretende-se neste trabalho elaborar um índice que permita identificar regiões/localidades com possibilidades de ocorrência de geadas. O índice de geada, doravante denominado de IG, será obtido a partir de previsões numéricas de tempo de modelos regionais em alta resolução espacial e temporal. Desta forma o IG permita prever ocorrências de casos de geadas com antecedência suficiente para que medidas de proteção possam ser adotadas. A possibilidade de prever com antecedência eventos de geadas é essencial para o planejamento das operações na agricultura, com vistas a otimização da produção e produtividade.

2 METODOLOGIA

Os valores de temperatura mínima atribuídos a eventos de geadas variam muito de acordo com o tipo de estudo que está sendo realizado, por exemplo, em estudos meteorológicos a caracterização de casos de geadas ocorre em situações onde a temperatura atinge valores iguais ou inferiores a zero, no entanto, para a agricultura a temperatura para a caracterização de ocorrência de geadas depende da espécie vegetal e seu estágio fenológico. Neste sentido, foi adotado que eventos de geadas ocorrem quando a temperatura do ar, medido em 2 metros acima da superfície, for igual ou inferior a 6°C. As causas favoráveis a formação da geada podem ser distribuídas em duas classes distintas: a primeira dependente das condições meteorológicas atuantes, e a segunda resultantes das condições locais. As principais condições locais que influenciam são: a) exposição do terreno; b) proximidade de matas; c) latitude; e d) altitude. No que diz respeito as condições atmosféricas podemos destacar: a) temperatura baixa; b) céu claro; c) vento fraco; d) pressão atmosférica alta; e e) baixo teor de umidade. Em função das condições atmosféricas descritas acima, cinco variáveis meteorológicas (temperatura e umidade relativa do ar em 2 metros, magnitude do vento em 10 metros, pressão reduzida ao nível médio do mar e nebulosidade) extraídas do modelo numérico serão utilizadas para a elaboração/obtenção do IG.

2.1 – Dados

No estudo foram considerados os cinco meses (maio, junho, julho, agosto e setembro) que ocorrem casos de geadas para as regiões Sul e Sudeste do Brasil durante os anos de 2012 até 2017. Esse período foi dividido em dois, sendo o primeiro (2012 à 2016) destinado apenas para a calibração, e o segundo (2017) a aplicabilidade do IG. A área de abrangência do estudo compreende entre as longitude de 65° e 44°W e latitudes de 36° e 20°S (figura 1), cobrindo parte do Uruguai e Argentina, Paraguai, Sul e Sudeste do Brasil e Mato Grosso. A realização deste estudo contou basicamente com dois tipos de dados:

i) Dados observados – Dados de temperatura mínima coletados em estações meteorológicas convencionais e distribuídos através do Global Telecommunication System (GTS) e fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Esses dados serão utilizados tanto para caracterizar eventos de geada, quando para calibrar e avaliar o IG. Dentro do domínio descrito acima, em média, 400 informações de temperaturas mínimas foram reportadas diariamente pelo INMET.

ii) Dados de previsões numéricas – previsões numéricas de variáveis meteorológicas em pontos de grades regularmente espaçados, com resolução temporal horária. Essas previsões foram obtidas a partir das integrações operacionais do modelo regional Eta do CPTEC/INPE. Esse modelo é integrado duas vezes ao dia, sendo inicializado com condições iniciais dos horários de 00 e 12 UTC. O horizonte de previsão deste modelo é de 168 horas.

2.2 – Descrição do modelo regional Eta

O modelo numérico de previsão de tempo utilizado no estudo foi o modelo regional Eta (Mesinger et al., 1988; Black, 1994). Este modelo foi desenvolvido na Universidade de Belgrado e usa a grade E de Arakawa (Arakawa e Lamb, 1977) e coordenada vertical η (Mesinger, 1984). A integração no tempo utiliza a técnica de 'split-explicit' (Gadd, 1978). Os processos turbulentos são tratados através do esquema de Mellor-Yamada (1974, 1982). A topografia é em forma de degraus discretos na grade, e é gerada a partir de dados de elevação com resolução de 30 metros. O esquema de parametrização de radiação de ondas longas (Fels e Schwarzkopf, 1975) e curtas (Lacis e Hansen, 1974) foi desenvolvido pelo Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. O modelo utiliza um esquema de Betts-Miller modificado para parametrizar a convecção (Janjic, 1994). O esquema de superfície é representado pelo esquema OSU (Chen et al., 1997). Devido a sua coordenada vertical, e a forma como a topografia é representada, este modelo tem como característica representatividade bastante satisfatória em regiões de elevadas altitudes (regiões preferenciais para ocorrência de geada).

Para o estudo foram utilizados os dados referentes às integrações operacionais do modelo Eta pelo Centro de Previsões de Tempo e Estudo Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). As principais configurações do modelo são: resolução horizontal de 15 quilômetros e 50 níveis na vertical, versão não hidrostática, e domínio de integração cobrindo toda a América do Sul e oceanos adjacentes. As previsões do modelo regional são geradas a cada hora, caracterizando o ciclo diurno necessário para o desenvolvimento do estudo. As condições iniciais e contornos laterais são fornecidos pelo modelo global T126L28 do CPTEC/INPE.

2.3 – Índices de geada (IG)

O IG trata-se de um índice que indica a possibilidade de ocorrência ou não de geadas, levando em conta as contribuições de algumas variáveis meteorológicas que influenciam diretamente na ocorrência do fenômeno. Este índice é obtido em função das previsões numéricas de cinco variáveis meteorológicas, juntamente com as médias e os desvios padrões dessas variáveis calculados apenas em situações de ocorrência do fenômeno. As cinco variáveis previstas pelo modelo Eta, e consideradas para a obtenção do IG são: temperatura (T) e umidade relativa (H), ambas em 2 metros, magnitude do vento em 10 metros (V), pressão reduzida ao nível médio do mar (P) e nebulosidade (N). Os procedimentos para a obtenção do índice, juntamente com a sua calibração são descritos abaixo:

i) Obtenção das médias e desvios padrões das variáveis meteorológicas
- médias e desvios padrões das cinco variáveis meteorológicas, considerando apenas eventos de geadas que ocorreram durante o período utilizado para calibração (2012 à 2016) (aproximadamente 23.500 casos), foram obtidas a partir dos seguintes procedimentos:

- a) Através das temperaturas mínimas observadas identificam-se os casos de geadas e as localidades, ou seja, as latitudes e longitudes onde ocorreram temperaturas mínimas iguais ou inferiores a 6°C;
- b) Para as localidades (pontos de latitudes e longitudes) onde ocorreram casos de geadas ($T \leq 6^{\circ}\text{C}$), as variáveis do modelo Eta foram extraídas

- dos pontos de grades mais próximos as latitudes e longitudes das observações que reportaram geadas;
- c) O horário de previsão no qual as variáveis meteorológicas foram extraídas coincide com o horário do valor mínimo de temperatura prevista pelo modelo durante o ciclo diurno de cada dia de previsão.
- d) A partir das informações obtidas nos passos anteriores a média e o desvio padrão para cada variável são calculados utilizando a equação 1 e 2, respectivamente.

$$\overline{VAR}_{(l,j,h)} = \sum_{k=1}^n \frac{VAR_{(i,j,h)}}{n} \quad (1)$$

$$\sigma_{VAR(i,j,h)} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(VAR_{(i,j,h)} - \overline{VAR}_{(l,j,h)})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Onde;

VAR são as variáveis de T, H, V, N e P previstas pelo modelo Eta;

n é o número de dias com casos de geadas;

σ_{VAR} são os desvios padrões de cada variável;

h indica os horários de previsão (24, 48, 72, 96 e 120 horas);

i e **j** indicam os pontos de grades mais próximos da posição das estações meteorológicas.

As médias e os desvios foram calculados (considerando apenas casos de geadas) para as previsões de 24, 48, 72, 96 e 120 horas de integração. Exemplos da distribuição espacial dos campos de médias e seus respectivos desvios padrões são apresentados na figura 2.

ii) Obtenção IG - após obter os valores das médias e desvios de todas as variáveis em todos os pontos de grade onde houveram temperaturas mínimas observadas menores que 6°C durante o período de calibração, o IG pode ser calculado através da soma das contribuições de cada variável dado pela equação 3.

$$IG_{(i,j,h)} = \alpha \cdot \frac{(\overline{T_{(i,j,h)}} - T_{m(i,j,h)})}{\sigma_{T(i,j,h)}} + \mu \cdot \frac{(\overline{P_{m(i,j,h)}} - P_{(i,j,h)})}{\sigma_{P(i,j,h)}} + \psi \cdot \frac{(\overline{V_{(i,j,h)}} - V_{m(i,j,h)})}{\sigma_{V(i,j,h)}} + \eta \cdot \frac{(\overline{H_{(i,j,h)}} - H_{m(i,j,h)})}{\sigma_{H(i,j,h)}} + \beta \cdot \frac{(\overline{N_{(i,j,h)}} - N_{m(i,j,h)})}{\sigma_{N(i,j,h)}} \quad (3)$$

Onde:

$P_{m(i,j,h)}$, $T_{m(i,j,h)}$, $V_{m(i,j,h)}$, $H_{m(i,j,h)}$ e $N_{m(i,j,h)}$ são as variáveis extraídas do modelo numérico;

\bar{P} , \bar{T} , \bar{V} , \bar{H} e \bar{N} são as médias calculadas somente em casos de geadas;

σ_P , σ_T , σ_V , σ_H , σ_N são os desvios padrões calculados somente em casos de geadas;

α , μ , ψ , η e β são os pesos atribuídos a cada variável meteorológica.

iii) Calibração e obtenção dos pesos (α , μ , ψ , η e β) – o processo de calibração e a obtenção dos pesos foram realizados de modo simultâneo. Este processo foi aplicado às previsões de 24, 48, 72, 96 e 120 horas. De acordo com o resultado da equação 3, o IG pode assumir valores positivos ou negativos, dependendo do resultado da somatória das contribuições (pesos) de cada variável. Neste sentido, foi necessário definir acima de qual limiar ($L_{(i,j)}$) de IG seria considerado como caso de geada, e quais valores de pesos contribuiriam para maiores taxas de acerto do IG. A forma como a calibração e o cálculo dos pesos foram realizados estão descritas abaixo:

- a) Primeiramente todos os casos de ocorrência de geadas (Temperatura observada $\leq 6^\circ$) do período de calibração foram identificados para serem utilizados em uma tabela de contingência (tabela 2).
- b) O critério utilizado verificar se o IG está indicando ocorrência ou não de geadas foi:

$$IG_{(i,j,h)} \geq L_{(i,j,h)} \Rightarrow \text{Ocorrência}$$

$$IG_{(i,j,h)} < L_{(i,j,h)} \Rightarrow \text{Não Ocorrência}$$

onde;

$L_{(i,j,h)}$ São os limiares para os pontos de grade mais próximos da posição das estações meteorológicas utilizadas na calibração. Um exemplo da distribuição espacial dos limiares é mostrado na figura 3a.

- c) Pesos e limiares foram variados no intuito de obter uma combinação entre eles que acarrete o maior número de acerto de casos. Os valores de limiares foram variados entre -1.5 até 1.5 com intervalos de 0.25, enquanto que os pesos variaram entre 0.25 e 1.00 em intervalos de 0.25. Para cada limiar ($L_{(i,j,h)}$), o IG foi calculado variando os valores dos pesos, tal qual demonstrado no exemplo abaixo onde é apresentada apenas uma iteração de todo o processo. Para o limiar $L_{(i,j,h)} = -1.5$ calculou-se o IG variando todos valores de pesos de acordo com a sequência abaixo.

$$\alpha = 0.25, \mu = 0.25, \psi = 0.25, \eta = 0.25, \beta = 0.25$$

$$\alpha = 0.25, \mu = 0.25, \psi = 0.25, \eta = 0.25, \beta = 0.50$$

$$\alpha = 0.25, \mu = 0.25, \psi = 0.25, \eta = 0.25, \beta = 0.75$$

$$\alpha = 0.25, \mu = 0.25, \psi = 0.25, \eta = 0.25, \beta = 1.00$$

$$\alpha = 0.25, \mu = 0.25, \psi = 0.25, \eta = 0.50, \beta = 0.25$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$\alpha = 1.00, \mu = 1.00, \psi = 1.00, \eta = 1.00, \beta = 1.00$$

- d) Os resultados dos cálculos do IG, para cada combinação entre pesos e limiares, são avaliados estatisticamente com os casos de geadas previamente identificados. A análise estatística foi realizada em função de uma tabela de contingência (tabela 1) apresentada na próxima sessão.
- e) O critério de seleção dos pesos e limiares levou em conta a combinação entre eles que produziram os maiores números de acertos, ou seja, quando a proporção de acertos com e sem ocorrência do evento assumisse o valor máximo entre todas as combinações.

2.4 – Métodos de avaliação

Ocorrência ou não de geadas, trata-se de uma evento dicotômico, logo para avaliar a performance do IG em prever ou não eventos de geadas foram utilizados índices estatísticos formulados com base em uma tabela de contingência apresentada abaixo:

Tabela 1: Tabela de contingência com análise comparativa dos acertos e erros nas estimativas da ocorrência (“SIM”) e não ocorrência (“NÃO”) de um determinado evento.

		OBSERVADO		
		SIM	NÃO	TOTAL
PREVISTO	SIM	a	b	a+b
	NÃO	c	d	c+d
	TOTAL	a+c	b+d	n=a+b+c+d

Onde;

a - número de vezes que ocorreu o evento e foi previsto;

b - número de vezes que o evento não ocorreu, no entanto foi previsto;

c - número de vezes que ocorreu o evento, porém sua ocorrência não foi prevista;

d - número de vezes que o evento não ocorreu e não foi previsto.

n – número total de eventos

A partir dos valores da tabela de contingência, diversos índices podem ser deduzidos com enfoques diferentes quanto à avaliação da performance das estimativas realizadas de ocorrência/não ocorrência do evento (Wilks, 2006; Stephenson, 2000, Mesinger, 2008). Neste estudo, foram utilizados os índices de performance denominados proporção correta (PC), probabilidade de detecção (POD), taxa de alarme falso (RAF), índice de sucesso crítico (ISC), Equitable threat Score (ETS), Porcentagem de acerto (PA), e o índice BIAS cujas formulações, significados e variações de valores esperados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Tabela contendo os índices estatísticos, formulas, significados e valores assumidos utilizados para a avaliação.

Índice	Formulação	Significado	Valores
Proporção Correta	$PC = \frac{a + d}{a + b + c + d}$	Proporção de acertos com e sem ocorrência do evento.	$0 \leq PC \leq 1$; Perfeito igual = 1
Probabilidade de Detecção	$POD = \frac{a}{a + c}$	Dado que o evento ocorreu, proporção de acertos em estimar sua ocorrência.	$0 \leq POD \leq 1$; Perfeito igual = 1.
Razão do Falso Alarme	$RAF = \frac{b}{a + b}$	Proporção de previsões de ocorrência as quais não ocorreram.	$0 \leq RAF \leq 1$; Perfeito igual = 0
Índice de Sucesso Crítico	$ISC = \frac{a}{a + b + c}$	Proporção de acertos nas estimativas, descontando às vezes em que a não ocorrência do evento foi corretamente prevista.	$0 \leq ISC \leq 1$; Perfeito igual = 1.
Taxa de tendência	$BIAS = \frac{a + b}{a + c}$	Relação entre o número de estimativas de ocorrência do evento e o número de eventos ocorridos.	$BIAS > 0$; Perfeito igual = 1. $BIAS > 1$ superestimativa $BIAS < 1$ subestimativa.

3 RESULTADOS

Os resultados serão apresentados abordando primeiramente a obtenção dos pesos e limiares, utilizando para isso todo o período de calibração. Após a discussão a respeito dos pesos e limiares, os resultados da aplicabilidade do IG serão mostrados para as condições atmosféricas tanto do período de calibração, quanto para os meses que ocorreram geadas no ano de 2017.

3.1 – Período de calibração

i) Pesos

Dentre todas as iterações realizadas para determinar os valores de pesos associados às variáveis meteorológicas, apenas as combinações que apresentaram os maiores valores de proporção de acertos (PC) com e sem ocorrência de geadas para as previsões de 24, 48, 72, 96 e 120 horas serão mostradas na tabela 3. Nota-se através da tabela que, como o esperado, a temperatura em 2 metros é a variável que apresenta o maior peso ($\alpha=1.0$) para todos os horários de previsão. Os restantes das variáveis apresentam o mesmo valor de contribuição, ou seja, $\mu=\psi=\eta=\beta=0.25$ para todos os horários de previsão. Nota-se ainda uma redução na proporção de acertos em função do aumento do prazo de previsão, este fato está diretamente associado à queda da previsibilidade das variáveis meteorológicas previstas pelo modelo numérico.

Tabela 3: Tabela contendo os pesos, associados às variáveis meteorológicas, que apresentaram valores mais elevados de PC dentre todas as combinações para as previsões de 24, 48, 72, 96 e 120 horas.

horas	$\alpha \rightarrow T$	$\mu \rightarrow P$	$\psi \rightarrow V$	$\eta \rightarrow H$	$\beta \rightarrow N$	$PC = \frac{a+d}{a+b+c+d}$
24	1.0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.84
48	1.0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.81
72	1.0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.78

96	1.0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.72
120	1.0	0.25	0.25	0.25	0.25	0.65

De acordo com os resultados mostrados na tabela 3 o IG pode ser dado por:

$$IG_{(i,j,h)} = \frac{(\overline{T_{(i,j,h)}} - T_{m(i,j,h)})}{\sigma_{T(i,j,h)}} + \frac{1}{4} * \left[\frac{(\overline{P_{m(i,j,h)}} - P_{(i,j,h)})}{\sigma_{P(i,j,h)}} + \frac{(\overline{V_{(i,j,h)}} - V_{m(i,j,h)})}{\sigma_{V(i,j,h)}} + \frac{(\overline{H_{(i,j,h)}} - H_{m(i,j,h)})}{\sigma_{H(i,j,h)}} + \frac{(\overline{N_{(i,j,h)}} - N_{m(i,j,h)})}{\sigma_{N(i,j,h)}} \right] \quad (4)$$

ii) Médias e desvios padrões

A média e o desvio padrão das variáveis, calculadas apenas para os pontos de grade que ocorreram eventos de geadas, utilizadas para a obtenção do IG foram calculados para as previsões de 24, 48, 72, 96 e 120. A figura 1 mostra a média espacial, calculada sobre todo o domínio de estudo, dessas variáveis para cada horário de previsão. A temperatura observada (fig. 1a), tida como base para caracterizar casos de geadas, não varia com o prazo de previsão e fica em torno de 4.0 graus com desvio de 1.7 graus. O aumento do prazo de previsão indica que o modelo tende a prever temperaturas (fig. 1b) ligeiramente mais elevadas (cerca de 1.0 grau), queda em cerca de 3 hPa na pressão ao nível médio do mar (fig. 1c), aumento em 0.13 na nebulosidade (fig. 1f), enquanto que a magnitude do vento (fig. 1d) e umidade relativa (fig. 1e) praticamente não apresentaram variações significativas. No que diz respeito aos desvios padrões, pode-se verificar um aumento com prazo de previsão para as variáveis de temperatura prevista (0.6 graus), pressão ao nível médio do mar (0.1 hPa) e nebulosidade (0.08). As demais variáveis não apresentaram variações significativas, sendo que o desvio da umidade relativa ficou em torno de 8% e a magnitude do vento em 1.3 m/s.

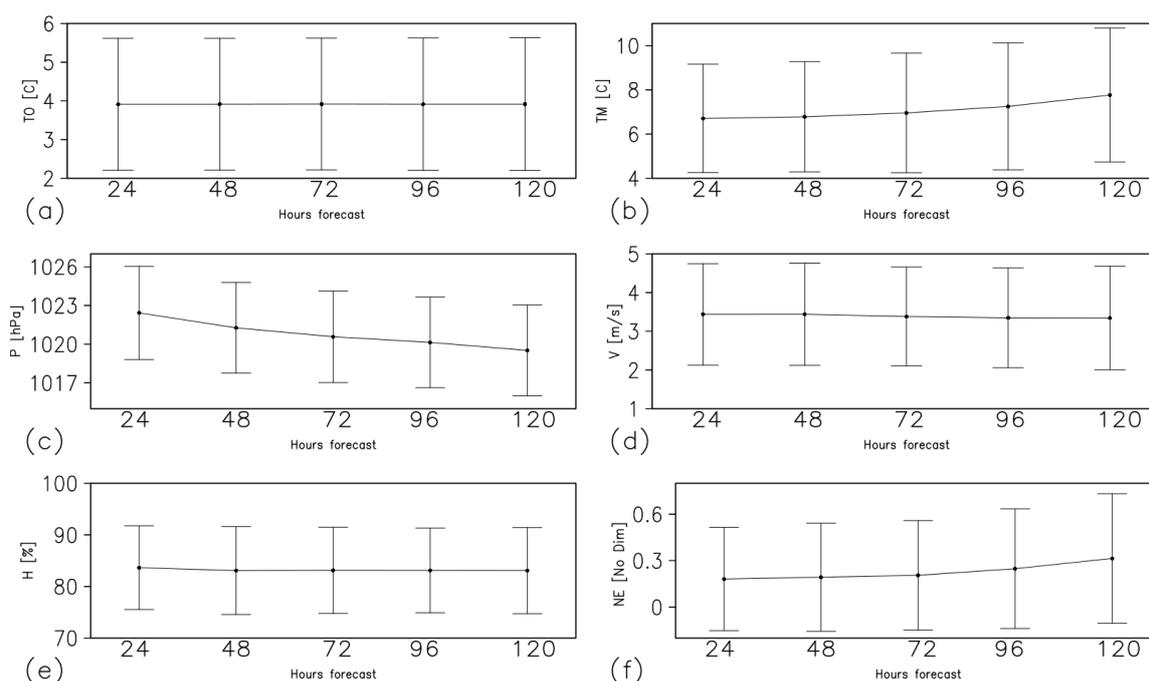
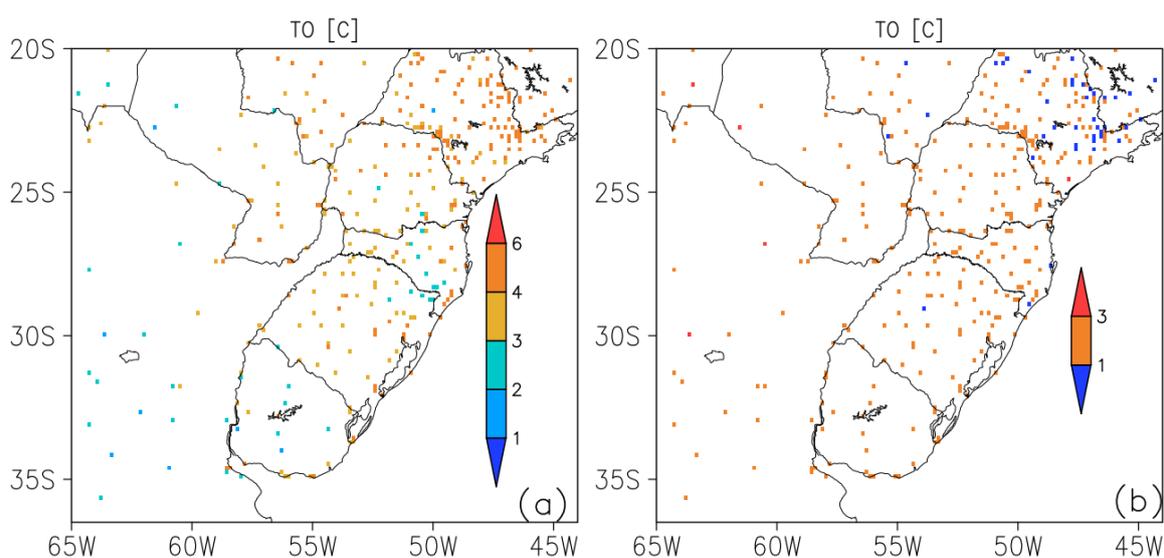
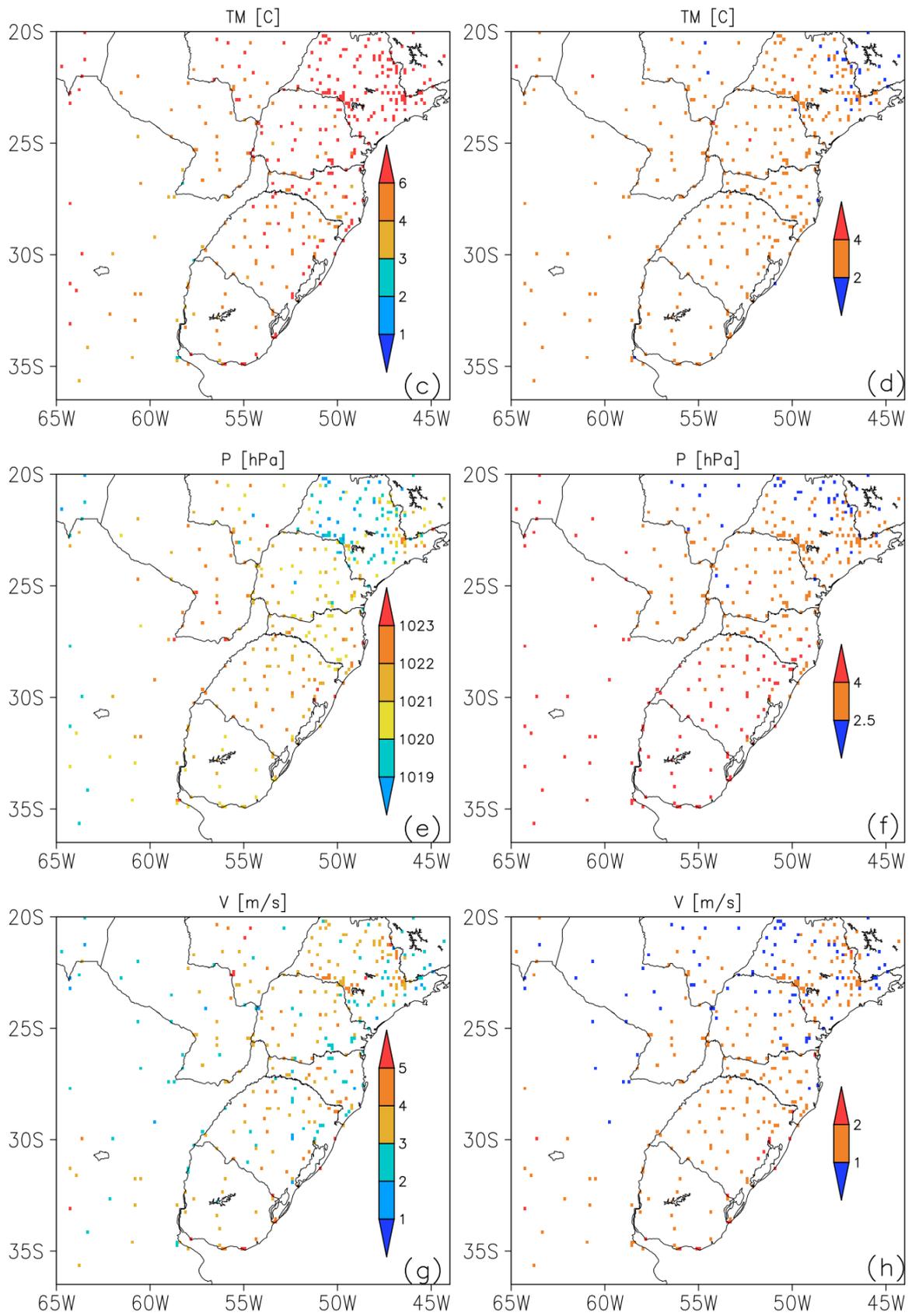


Figura 1. Média espacial das previsões de 24, 48, 72, 96, 120 horas, considerando o domínio de estudo, das médias (linhas) e desvios padrões (barras verticais) das variáveis de temperatura observada (a), temperatura prevista (b), pressão ao nível médio do mar (c), magnitude do vento (d), umidade relativa (e) e nebulosidade (f).

A figura 2 mostra a média entre as previsões de 24, 48, 72, 96 e 120 horas da distribuição espacial da média (painel da esquerda) e desvio padrão (painel da direita) das variáveis meteorológicas utilizadas para a elaboração do IG. Em termos da temperatura observada (fig. 2a) a maior parte do Brasil e Paraguai apresenta temperaturas entre 3.0 e 6.0 graus, enquanto que abaixo desses valores são mais frequentes na Argentina e regiões serranas do Brasil (divisa entre Rio grande do Sul e Santa Catarina). A distribuição espacial do desvio padrão (fig. 2b) mostra que os menores desvios (abaixo de 1.0 grau) são verificados principalmente no estado de São Paulo, sendo que no restante do domínio predomina desvios entre 1.0 e 3.0 graus. Em geral, a temperatura do modelo (fig. 2c) é prevista com viés positivo (em média 3 graus), enquanto que o desvio (fig. 2d) apresenta configuração espacial semelhante, porém com maiores valores de desvios (em média 1.0 grau). Em casos de geadas, a

pressão reduzida prevista pelo modelo (fig. 2e), na maior parte do domínio, fica acima de 1020 hPa, sendo que os menores valores são mais frequentes sobre o estado de São Paulo (abaixo de 1020 hPa). Este padrão repercute diretamente na distribuição dos desvios (fig. 2f), uma vez que a alta frequência de passagens de centros de altas pressões nas regiões da Argentina, Uruguai, e Rio Grande do Sul ocasionam maiores desvios (acima de 4.0 hPa). No que diz respeito à magnitude do vento (fig. 2g) observa-se padrões de ventos fracos, sendo que a maioria dos pontos do domínio encontra-se entre 3.0 e 4.0 m/s com desvio padrão (fig. 2h) em torno de 1.5 m/s. Os menores desvios (inferiores à 1.0 m/s) são verificados ao norte de 30 graus de latitude. Para dias com ocorrência de geadas, a umidade relativa prevista pelo modelo (fig. 2i) mostra que os valores mais frequentes encontram-se em torno de 85%, ocorrendo poucos pontos abaixo de 80%. Através do desvio padrão (fig. 2j) nota-se, de um modo geral, que os maiores desvios (entre 10 e 20%) da umidade estão localizados em pontos onde o modelo previu valores de umidade abaixo de 80%. Na maior parte dos pontos o desvio encontra-se em torno de 10%. A nebulosidade prevista pelo modelo (fig. 2k), na grande maioria dos pontos, indica valores abaixo de 0.3 configurando situações com baixa nebulosidade, no entanto, os valores dos desvios (fig. 2l) são da mesma ordem de magnitude ou superiores aos da nebulosidade.





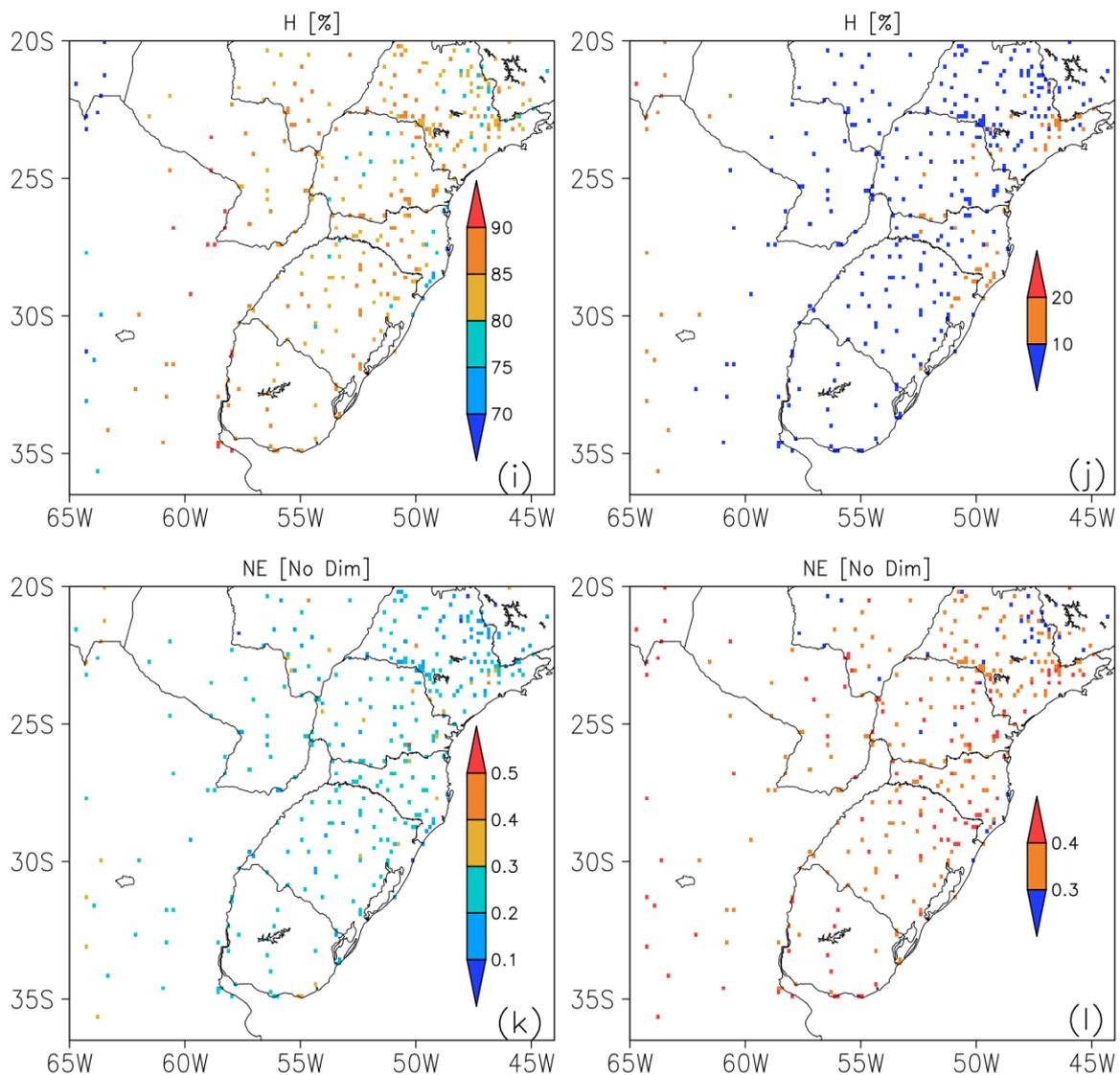


Figura 2. Média entre as previsões de 24, 48, 72, 96 e 120 horas das variáveis médias (calculadas em casos de geada) da temperatura observada (a), temperatura prevista (b), pressão ao nível médio do mar (c), magnitude do vento, umidade relativa (e) e nebulosidade (f).

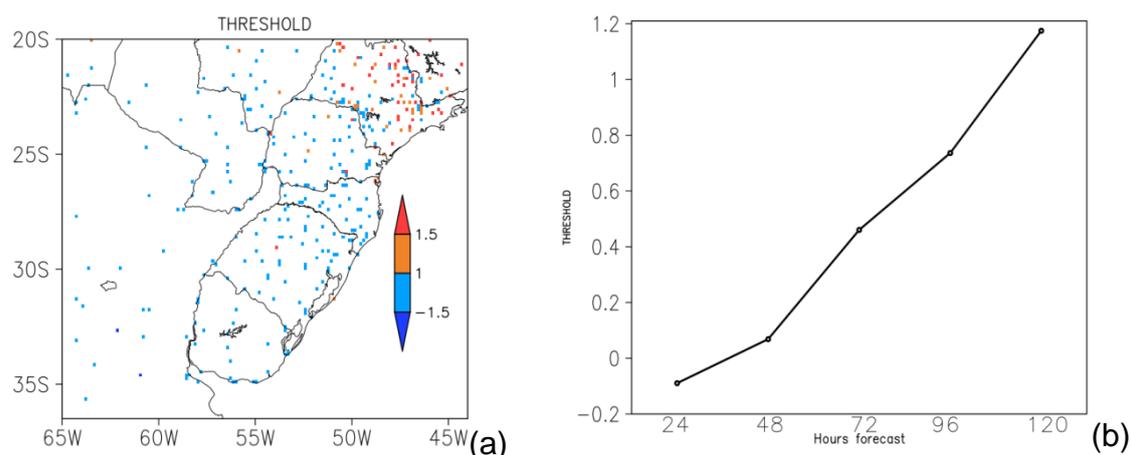


Figura 3. Média dos limiares entre os horários de previsão de 24, 48, 72, 96 e 120 (a), e média espacial dos limiares para cada horário de previsão (b).

Para cada horário de previsão foram obtidos os limiares seguindo o critério descrito na sessão 2.3. A média entre esses horários (fig. 3a) mostra que na maior parte do domínio os valores encontrados estão na faixa entre -1.5 e 1.0. Valores acima destas faixas são verificados principalmente nos estados de São Paulo e sul de Minas Gerais. Nestes estados, o critério para que o IG indique a ocorrência de geadas torna-se mais rigoroso. A média espacial para cada horário de previsão (fig. 3b) foi realizada para verificar como varia os valores dos limiares com o aumento do prazo de previsão. Nota-se que em média os valores dos limiares aumentam com o prazo de integração. Este fato está associado à queda de desempenho do modelo.

3.2 – Aplicabilidades do IG

Nesta seção será apresentada a aplicabilidade do IG para o período de calibração (doravante chamado de IG_CALI), e para o ano de 2017 (doravante chamado de IG_2017). No intuito de verificar se o índice proposto poderá contribuir satisfatoriamente com o previsor de tempo em uma rotina operacional, optou-se então em comparar o IG com as saídas de temperatura do modelo regional, neste contexto a temperatura para o período de calibração será denominada de TE_CALI, enquanto que para o ano de 2017 de TE_2017. Neste caso, quando ocorrem eventos de geadas (temperaturas observadas \leq

6 graus), para que seja considerado acerto as temperaturas previstas pelo modelo também tem que satisfazer esse critério. E conseqüentemente para casos de não ocorrência, onde as temperaturas observadas e previstas devem ser > 6 graus. Em análises prévias (não apresentadas) verificou-se que algumas regiões do domínio apresentaram comportamentos semelhantes entre si, neste sentido, para sintetizar os resultados optou-se em agrupá-las em três regiões. A primeira região (R1) abrange o norte da Argentina, Uruguai e Paraguai. A segunda engloba toda a região sul do Brasil, ou seja, Rio grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. A última região contempla os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e sul de Minas Gerais.

Tabela 4: Número de eventos de geadas ocorridos durante o período de calibração e ano de 2017 para cada uma das três regiões.

Regiões	N. pontos	N. de eventos de geada (Calibração)	N. de eventos de geada (Ano de 2017)
R1	66	10.150	1.193
R2	122	9.305	860
R3	137	4.125	450

A tabela 4 mostra a quantidade de eventos de geadas que ocorreram durante o período de calibração e no ano de 2017 para as três regiões avaliadas. As informações foram obtidas utilizando a contagem de temperaturas observadas inferiores ou iguais a 6 graus Celcius. A região R1, embora seja a que possua a menor quantidade de pontos (66), foi a que registrou o maior numero de eventos, enquanto que a R3 apresenta a menor frequência de ocorrência com o maior numero de pontos (137).

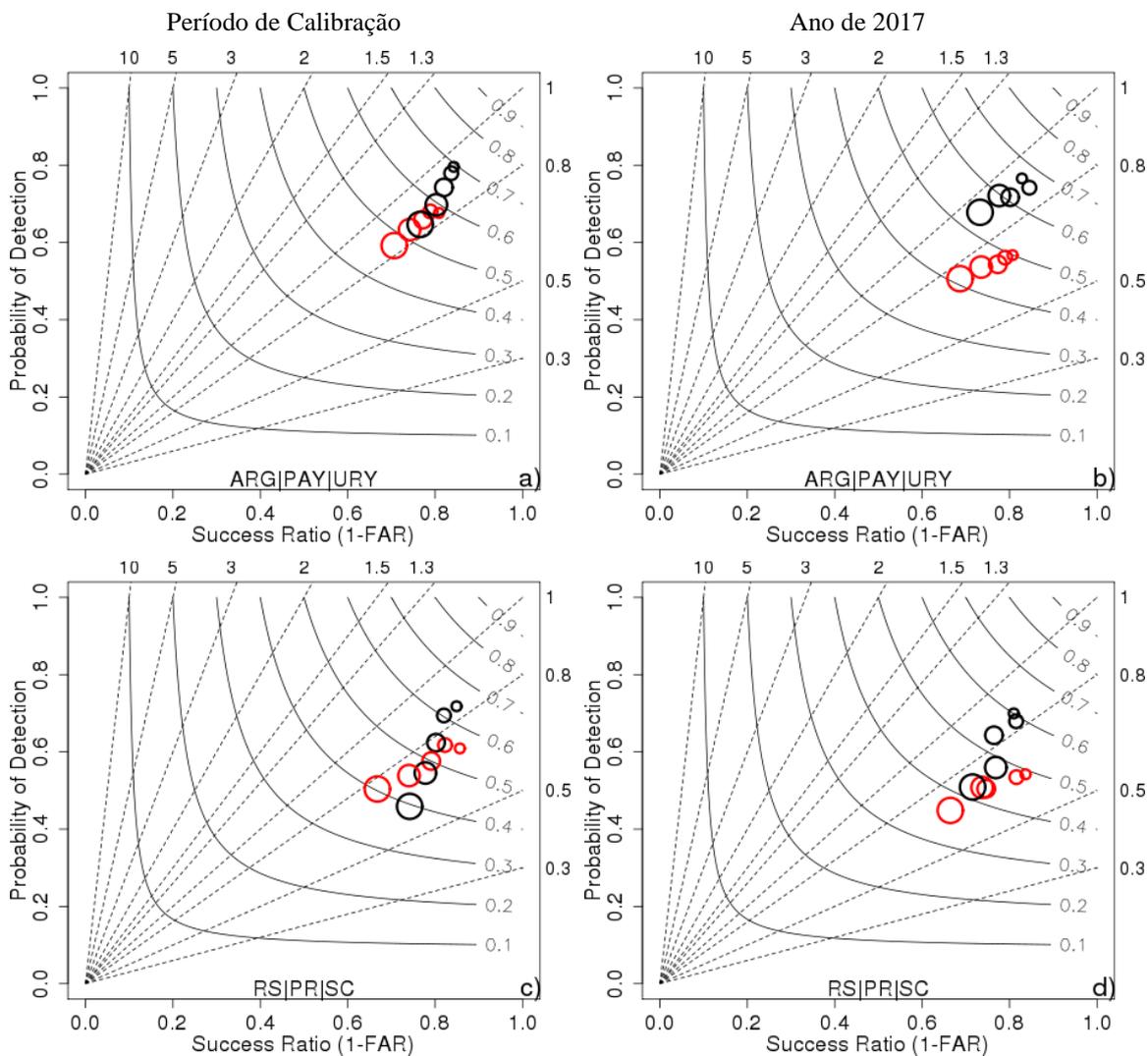
A figura 4 apresenta o diagrama de performance (Roebber, 2009) do IG (preto) e da temperatura prevista pelo modelo (vermelho) para o período de calibração (painel esquerdo) e ano de 2017 (painel direito) das regiões R1, R2 e R3. Os círculos representam os horários de previsões, sendo que o círculo de

raio menor está associado às previsões de 24 horas, enquanto que o de raio maior com as previsões de 120 horas. Este diagrama facilita a análise dos resultados, uma vez que apresenta várias medidas de qualidade de estimativa dicotômica (sim-não), tais como POD, BIAS, ISC, RAF, SR. As linhas tracejadas representam o BIAS, enquanto que as curvas sólidas representam o ISC. Neste sentido, as melhores estimativas são aquelas que estejam na parte superior direita do diagrama. Os resultados referentes à região R1 durante o período de calibração (fig. 4a) mostram que o IG_CALI apresenta resultados mais satisfatórios para todos os índices analisados, e em todos os horários de previsão. No que diz respeito ao ISC nota-se melhorias em torno de 30% superior quando comparado com os resultados de TE_CALI. A tendência em subestimar os números de casos é minimizada com a utilização do IG_CALI. O maior número de detecção dos casos, juntamente com menores valores de falso alarme, para todos os horários de previsão, faz com que o IG_CALI demostre resultados mais satisfatórios. A aplicabilidade do IG para o ano de 2017 (fig. 4b) mostra que o índice é consistente. Neste caso, o IG_2017 reduziu substancialmente (em torno de 25%) a tendência em subestimar os eventos quando utilizado os resultados de TE_2017, além de manter valores mais elevados de POD (cerca de 40% maior) com reduzidos valores de RAF (cerca de 20% menor). Assim como verificado para o período de calibração, o ISC do IG_2017 também apresentou melhorias em torno de 30% superiores aos encontrados para a TE_2017. A comparação entre os resultados da calibração e o ano de 2017 (fig. 4a e 4b) permite verificar que, para Argentina, Paraguai e Uruguai o IG_2017 consegue manter performance semelhantes ao IG_CALI, indicando que o índice está bem calibrado para esta região. No caso dos resultados do TE_2017 pode-se observar claramente que o modelo indica temperaturas mais elevadas, e conseqüentemente reduz o número de eventos de geadas previstos, reduzindo em torno de 18% os valores de POD. Em termos de RAF para TE_2017, verificou-se que para 24, 48 e 72 horas os valores são semelhantes, porém com o aumento do prazo de previsão os valores de RAF para 2017 são superiores.

Os resultados para a região sul do Brasil durante o período de calibração (fig. 4c) mostram que tanto o IG_CALI, quanto TE_CALI indicam ligeiras tendências em subestimar os eventos de geadas. Com o aumento do prazo de previsão a tendência de subestimativas para TE_CALI não sofre grandes alterações, ficando com valores de BIAS em torno de 0.73. O BIAS para o IG_CALI permanece constante para os horários de 24 e 48 horas (em torno de 0.84), e com o aumento do prazo de previsão tende a aumentar a tendência em subestimar (BIAS em torno de 0.63). As performances do IG_CALI e TE_CALI caem com o aumento do prazo de previsão, no entanto o IG_CALI apresenta valores de ISC superiores para os horários de 24, 48, 72 e 96 horas. A diferença entre o ISC do IG_CALI e do TE_CALI também caem com o aumento do prazo de previsão, sendo que em 120 horas são praticamente iguais. Os valores de POD do IG_CALI são superiores aos de TE_CALI nos horários de 24, 48 e 72 horas, iguais em 96 horas e inferiores em 120 horas. No que diz respeito ao RAF, nas primeiras 72 horas, o IG_CALI e o TE_CALI apresenta resultados semelhantes, porém nos horários de 96 e 120 o RAF referente ao IG_CALI é inferior. Análises para o ano de 2017 também indica ligeiras subestimativas por parte do IG_2017 e da TE_2017. O desempenho do IG_2017 é superior ao TE_2017 em todos os horários de previsão, sendo que nas primeiras 72 horas os valores de ISC são em torno de 25% superiores, enquanto que para os horários de 96 e 120 horas os valores de ISC são em torno de 15% superiores. Para todos os horários de previsões, o POD do IG_2017 apresenta valores mais elevados que TE_2017, sendo que as maiores diferenças (em torno de 25%) encontram-se em 24, 48 e 72 horas. Os valores de RAF para as primeiras 72 horas são semelhantes, no entanto para 96 e 120 horas o RAF da temperatura apresenta valores ligeiramente superiores ao IG_2017. Comparando o período de calibração com o ano de 2017 temos que os valores de BIAS são semelhantes entre o IG_CALI e IG_2017, porém ambos com ligeiras subestimativas. Os valores de ISC e POD do IG também foram semelhantes nos dois períodos analisados, já para o RAF, os valores foram ligeiramente superiores para o IG_2017.

Os resultados referentes à região R3, onde se encontra os estados de São Paulo, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul, são apresentados nas figuras 4e e 4f. Para o período de calibração (fig. 4e) nota-se subestimativas por parte do IG_CALI e da TE_CALI. Para o caso do IG_CALI os valores de BIAS caem com o aumento do prazo de previsão, indicando um aumento na subestimativas. Já para TE_CALI os valores de BIAS permanecem quase que constante em torno de 0.22 para todos os horários de previsão. Em todos os horários de previsão o ISC e o POD do IG_CALI são superiores aos da TE_CALI. Tanto o POD quanto o ISC do IG_CALI apresentam uma queda com o aumento do prazo de previsão, no entanto os valores referentes TE_CALI não sofrem variações significativas. No que diz respeito ao RAF, nota-se valores semelhantes entre si, com valores ligeiramente superiores por conta do RAF referente à TE_CALI. Os resultados para o ano de 2017 (fig. 4f) mostram ligeiras tendências de subestimativas, com valores de BIAS em torno de 0.8 para o IG_2017, nos horários de 24, 48, 72 e 96. Para 120 horas as subestimativas ficam mais evidenciadas (BIAS em torno de 0.55). As tendências em subestimar os eventos de geadas, para todos os horários de previsão, são mais pronunciadas nos resultados referentes à TE_2017. A análise do ISC permite verificar que o desempenho do IG_2017 é mais que o dobro do TE_2017 em todos os horários de previsão. Nota-se ainda que os valores de ISC de TE_2017 quase não variam nas primeiras 96 horas, ficando em torno de 0.2, enquanto que em 120 horas ocorre uma queda considerável, atingindo valores em torno de 0.1. Os valores de POD do IG_2017 são superiores aos do TE_2017, sendo que em alguns horários chegando a ser mais que o dobro. Entre os horários de 24 até 96 horas os valores de POD do IG_2017 não variam significativamente, ficando em média em torno de 0.58. Em termos de RAF, os valores para TE_2017 são maiores para os horários de 72, 96 e 120 horas. Em 24 e 48 horas os valores de RAF de TE_2017 são ligeiramente inferiores. A comparação entre o período de calibração e o ano de 2017 mostra que, para a região 3, os valores de ISC, POD e RAF para IG_2017 foram superiores aos valores encontrados para IG_CALI em todos

os horários analisados. No que diz respeito a BIAS, os resultados do IG_2017 mostra minimização de tendências de subestimativas em relação ao IG_CALI.



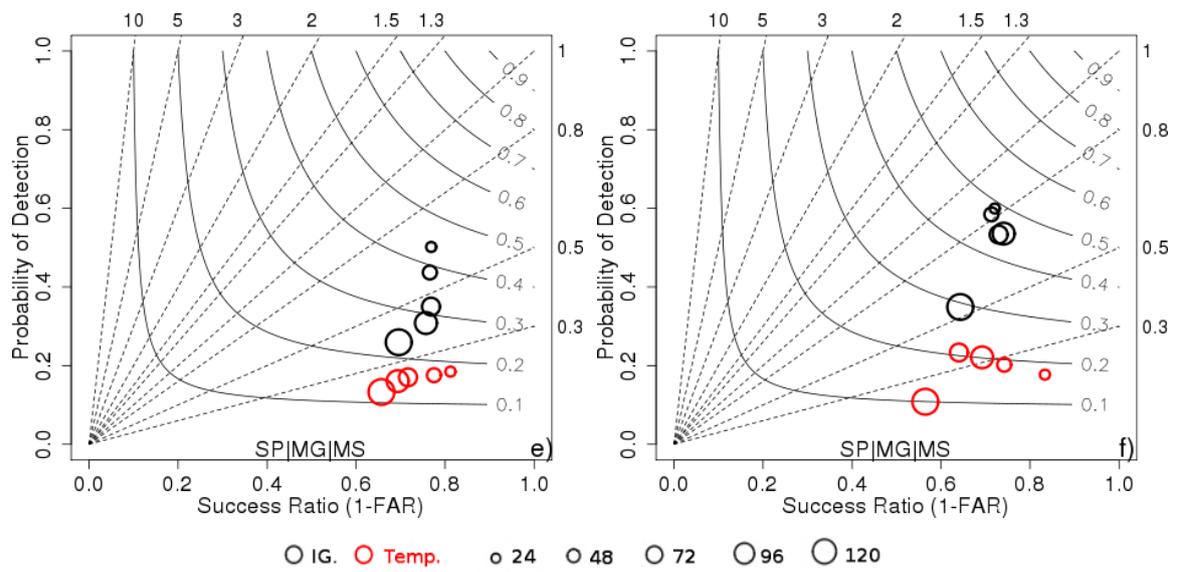


Figura 4. Diagrama de performance (Roebber, 2009) do IG (preto) e da temperatura prevista pelo modelo (vermelho) para o período de calibração (painel esquerdo) e ano de 2017 (painel direito) das regiões R1 (a,b), R2 (b,c) e R3 (c,d). Os círculos representam os horários de previsões, sendo que o círculo de raio menor está associado às previsões de 24 horas, enquanto que o de raio maior com as previsões de 120 horas.

4 CONCLUSÕES

Utilizando previsões numéricas de tempo, fornecidas por um modelo regional, foi possível desenvolver um IG que permite prever, com alguns dias de antecedência, a ocorrência de eventos de geadas que ocorrem no Brasil e países adjacentes (Argentina, Paraguai e Uruguai). Durante o período de calibração do IG pode-se concluir que, dentre todas as variáveis utilizadas no processo, a temperatura foi a que apresentou as maiores contribuições em termo de peso para a elaboração do IG. As demais variáveis envolvidas contribuíram de forma igualitária. Análises com relação às médias/desvios das variáveis, calculadas somente nos casos de eventos de geadas, permite concluir que o modelo regional Et a fornecer previsões de temperaturas mais elevadas, pressões mais baixas e um aumento na cobertura de nuvem a medida que aumenta o prazo de previsão. Tais características contribuem para diminuição dos números de casos de eventos de geadas indicados pelo IG. Os limiares de decisão para que o IG considere um evento de geada ou não ficou entre -1.5 e 1.0, no entanto em Minas Gerais e São Paulo esses limiares são maiores. Nestes estados, o critério para que o IG indique a ocorrência de geadas torna-se mais rigoroso. Conclui-se também que os valores dos limiares aumentam com o prazo de integração. Este fato está associado à queda de desempenho do modelo.

Dentre as regiões analisadas, a R1 foi onde o IG apresentou seu melhor desempenho, enquanto que na R3 a menor performance. Esta mesma análise, em termos da temperatura do modelo, também apresenta o mesmo resultado. Comparando o desempenho do IG para o período de calibração (IG_CALI) e o ano de 2017 (IG_2017) conclui-se que o índice foi bem calibrado, pois além de manter os desempenhos semelhantes nas regiões R1 e R2, na R3 foi verificado um aumento na performance. Para as três áreas analisadas, e todos os horários de previsão, o IG apresentou resultados mais satisfatórios quando comparado com as previsões de temperaturas do modelo regional. Este fato ocorreu tanto no período de calibração, quanto para o ano de 2017. Neste

sentido, a utilização do IG em um ambiente operacional proporcionaria melhorias consideráveis na previsão de eventos de geadas, principalmente nas regiões R1 e R2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDROCIOLO FILHO, ARMANDO; CARAMORI, PAULO HENRIQUE. Influence of coffee pruning on the severity of frost damage. **Braz. arch. biol. technol.**, Curitiba , v. 43, n. 1, 2000 .

ARAKAWA, A.; LAMB, V. R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. **Methods in Computational Physics**, v. 17, p. 173-265, 1977.

BLACK, T. L. :The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. **Weather and Forecasting**, v. 9, n. 2, p. 265-278, Feb. 1994.

BLANC, M.L., GESLIN, H., HOLZBERG, I.A. & MASON, B. 1963. Protection against frost damage. **WMO, Technical Note**, No. 51. Geneva, Switzerland. 62p.

BRIXNER, G. F., E. R. SCHÖFFEL, I. LAGO, A. L. RADÜNZ, A. P. KRÜGER . Risco de geada e duração dos subperíodos fenológicos da 'Cabernet Sauvignon' na região da Campanha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande v.18, n.2, p. 217-224, 2014.

CARTER, P. R. 1995. Late spring frost and post-frost clipping effect on corn growth and yield. **J. Prod. Agric** 8: 203.

CHEN, F.; JANJIC, Z. I.; MITCHELL, K. Impact of atmospheric surface-layer parameterization in the new landsurface scheme of the NCEP mesoscale Eta model. **Boundary Layer Meteorology**, v. 85, p. 391-421, 1997.

ECCEL E, REA R, CAFFARRA A, CRISCI A (2009). Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: the role of phenological acclimation. **Int J Biometeorol** 53:273–286. doi: 10.1007/s00484-009-0213-8

FELS, S. B.; SCHWARZKOPF, M. D. The simplified exchange approximation. A new method for radiative transfer calculations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 32, n. 7, p. 1475-1488, Mar. 1975.

FORTUNE, M.A; KOUSKY, V.E. 1983; Synoptic precursors of three severe brazilian freezess in the Pacific Ocean and South America. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campo**. Mai. (INPE-2730-PRE/312).

GADD, A. J. A split explicit integration scheme for numerical weather prediction. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 104, p. 569-582, 1978.

GHIELMI, L.; ECCEL, E. (2006). Descriptive models and artificial neural networks for spring frost prediction in an agricultural mountain area. **COMPUTERS AND ELECTRONICS IN AGRICULTURE**, 54 (2): 101-114. doi: 10.1016

HAMILTON, M. G.; TARIFA, J. R., 1978. Synoptic Aspects of a polar outbreak leading to frost in tropical Brazil, July 1972. **Monthly Weather Review**. 106: 1545-1556, Nov..

HEWITT, K. 1983. Interpreting the role of hazards in agriculture. pp. 123–139, in: K. Hewitt (ed). **Interpretations of Calamity**. London: Allen & Unwin.

JANJIC, Z. L. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 5, p. 927-945, Aug. 1994.

KALMA, J.D., LAUGHLIN, G.P., CAPRIO, J.M. & HAMER, P.J.C. 1992. Advances in Bioclimatology, 2. The Bioclimatology of Frost. Berlin: **Springer-Verlag** .144p.

LACIS, A. A.; HANSEN, J. E. A parameterization of the absorption of solar radiation in earth's atmosphere **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 118-133, 1974.

LAWRENCE, E.N. 1952. Frost investigation. **Meteorological Magazine**, 81: 65–74.

MARGOLIS, MAXINE L. Green gold and ice: the impact of frost on the coffee growing region of Northern Paraná, Brazil. **Mass Emergencies**, v. 4, n. 2, p. 135-144, 1979.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 1791-1806, 1974.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T.. Development of a turbulence closure models for geophysical fluid problems. **Review Geophysical Space Physics**, v. 20, p. 851-875, 1982.

MESINGER F, JANJIC, Z. L, NICKOVIC, S., AND DEAVEN, D. G. The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, v. 116, p. 1493-1518, Jan 1988.

MESINGER F. Ablocking for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, v. 44, p. 195-202, 1984.

MESINGER, F. Bias Adjusted Precipitation Threat Scores. **Advances in Geosciences**, n. 16, p. 137-142, 2008.

MEYER, D.W., AND M. BADARUDDIN. 2001. Frost tolerance of ten seedling legume species at four growth stages. **Crop Sci.** 41:1838–1842.

MONTEIRO LA., SENTELHAS PC. 2014. Potential and Actual Sugarcane Yields in Southern Brazil as a Function of Climate Conditions and Crop Management. **Sugar Tech** 16:264–276.

MULLER, G. V. AND BERRI, G. J.: Atmospheric Circulation Associated with Persistent Generalized Frosts in Central-Southern South America, **Mon. Weather Rev.**, 135(4), 1268–1289, 2007.

MULLER, G. V. AND BERRI, G. J.: Atmospheric Circulation Associated with Persistent Generalized Frosts in Central-Southern South America, **Mon. Weather Rev.**, 135(4), 1268–1289, 2007.

MULLER, G. V., AMBRIZZI, T., AND NUÑEZ, M. N.: Mean atmospheric circulation leading to generalized frosts in Central Southern South America, **Theor. Appl. Climatol.**, 82, 95–112, 2005.

MULLER, G. V., NUÑEZ, M. N., AND SELUCHI, M. E.: Relationship between ENSO cycles and frosts events within the Wet Pampas region, **Int. J. Climatol.**, 20, 1619–1637, 2000.

PARMENTER, F. C., 1976. A southern hemisphere cold frost passage at the Equador. **Bulletin American Meteorological Society**. 57(12): 1435-1440. Dez.

PERISSATO, S. M.; et al. Efeito das geadas em culturas energéticas. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.1, p.49-58, 2013.

ROGERS, J.C.; ROHL, R.V., 1991. Florida citrus freezes and Polar Anticyclones in the Great Plains. **Journal of Climate**. 4: 1103-1113, nov.

SATYAMURTY, P., FERREIRA, C. C., GAN, M. A. Cyclonic vortices over South America. **Tellus A**, v. 42A, n. 1, p. 194-201, 1990.

SNYDER, R.L., MELO-ABREU, J.P. - Frost protection: fundamentals, practice and economics. **Rome**: FAO, 2005.

SNYDER, R.L., PAW U, K.T. & THOMPSON, J.F. 1987. Passive frost protection of trees and vines. **University of California DANR Leaflet** No.21429.

STEPHENSON, D. B. Use of the "odds ratio" for diagnosing forecast skill. **Weather and Forecasting**, v. 15, p. 221-232, 2000.

SZEWCZUK, A., GUDAROWSKA, E. AND DEREN, E. The estimation of frost damage of some peach and sweet cherry cultivars after winter 2005/2006. **J. Fruit Ornam. Plant Res.** 2007. 15: 55–63.

T. PRABHA, G. HOOGENBOOM Evaluation of the weather research and forecasting model for two frost events *Comput. Electron. Agric.*, 64 (2008), pp. 234-247

WILKS, D. S. Statistical methods in the atmospheric sciences. San Diego: **Academic Press**, 2006. 630 p.