

AGROMETEOROLOGIA

REGIONALIZAÇÃO DE RISCOS DE OCORRÊNCIA DE TEMPERATURAS MÍNIMAS ABSOLUTAS ANUAIS PARA O ESTADO DE SÃO PAULO COM BASE EM MODELOS PROBABILÍSTICOS E DIGITAIS DE ELEVAÇÃO ⁽¹⁾

FABIANE ASTOLPHO ⁽²⁾; MARCELO BENTO PAES DE CAMARGO ^(3,6);
MÁRIO JOSÉ PEDRO JUNIOR ^(3,6); WANDER JOSÉ PALLONE FILHO ⁽⁴⁾;
LUDMILA BARDIN ⁽⁵⁾

RESUMO

É necessário o mapeamento mais consistente dos riscos de ocorrência de temperaturas mínimas adversas à agricultura, sendo possível sua obtenção utilizando maior número de postos meteorológicos, modelos probabilísticos e sistema de informações geográficas (SIG), que introduzem precisão matemática. Visando subsidiar os trabalhos de seguro rural, o planejamento e zoneamento agrícola, os objetivos deste trabalho foram os seguintes: estimar os riscos pontuais de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais adversas à agricultura para 28 localidades do Estado de São Paulo utilizando modelo probabilístico "distribuição normal", e regionalizar o Estado quanto às probabilidades de ocorrência de diferentes níveis de temperatura mínima absoluta utilizando SIG e modelos digitais de elevação. Utilizou-se o método de regressão múltipla para caracterizar a variabilidade espacial entre as coordenadas geográficas das estações e os resultados do modelo probabilístico. As variáveis independentes parciais que melhor explicaram a variável dependente probabilidade foram, altitude ($R^2=0,74-0,78$), latitude ($R^2=0,33-0,44$) e longitude ($R^2=0,15-0,20$); as equações finais geradas pela regressão múltipla apresentaram R^2 entre 0,87 e 0,90. As probabilidades estimadas foram consideradas espacialmente no SIG "Idrisi", com base em modelo digital de elevação (altimetria) e coordenadas geográficas (latitude e longitude). As equações de regressão múltipla geraram variação contínua pixel a pixel do risco de ocorrência de diferentes classes de temperaturas mínimas absolutas. São apresentados mapas com a variação espacial das probabilidades de ocorrência de geadas de 1 e 2 °C.

Palavras-chave: Risco de geadas, probabilidade, temperaturas mínimas absolutas, distribuição normal, modelo digital de elevação, mapeamento.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 15 de abril e aceito em 7 de outubro de 2004.

⁽²⁾ Aluna do Curso de Pós-Graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, área de concentração Tecnologia da Produção Agrícola, do Instituto Agrônomo (IAC). Bolsista da Fundación Mapfre Estúdios.

⁽³⁾ Instituto Agrônomo (IAC), 13001-970 Campinas, SP. E-mail: mcamargo@iac.sp.gov.br.

⁽⁴⁾ Centro de Informações Agropecuárias (CIAGRO), Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI), Caixa Postal 960, 13073-001 Campinas (SP)

⁽⁵⁾ Aluna do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da PUC-Campinas. Estagiária do IAC. Bolsista do PNP&D Embrapa-Café.

⁽⁶⁾ Com bolsa de produtividade científica do CNPq.

ABSTRACT**FROST RISK MAPPING BASED ON PROBABILISTIC AND DIGITAL ELEVATION MODELS FOR THE STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL**

Adverse meteorological phenomenon's occurrence, such as low air temperature and frost, can cause serious damages to the agriculture of the State of São Paulo. The greater accuracy on the occurrence probability establishment for such events, based on historical data obtained from a larger agrometeorological network, appropriated probabilistic models and modern mapping technical can provides assistance for agricultural risk studies, which are very important for agricultural financing and insurance programs. The probabilistic model "normal distribution" was used to estimate the punctual risks of yearly minimum air temperatures below 0, 1, and 2 °C for 28 localities of the State of São Paulo, Brazil. A digital elevation model previously developed with remote sensing and geographical information system (GIS) techniques were used to map the estimated probabilities of frost occurrence, considering different levels of absolute minimum air temperature. Multiple regression equations were developed to estimate the regional probabilities of frost occurrence, based on altitude, latitude and longitude informations. The partial independent variables that better explained the dependent variable "probability" were, at the following importance order, altitude ($R^2 = 0.74-0.78$), latitude ($R^2 = 0.33-0.44$) and longitude ($R^2 = 0.15-0.20$). The equations generated through multiple regression analyses showed determination coefficients between 0.87 and 0.90. The estimated probabilities were spacialized using the GIS "Idrisi", based on a digital elevation model (altitude) and geographical coordinates (latitude and longitude). The multiple regression equations generated continuous pixel-to-pixel variations for different classes of probability of occurrence of absolute minimum air temperature. Two maps are presented showing the spatial variability of the frost risk occurrence with minimum temperatures below 1 and 2 °C.

Key words: Frost risk, probability, minimum air temperature, normal distribution, digital elevation, mapping.

1. INTRODUÇÃO

A determinação do risco de ocorrência de geadas no Estado de São Paulo é necessária na orientação de agricultores, extensionistas e órgãos governamentais para subsidiar tomadas de decisão, crédito rural, seguro rural e o planejamento agrícola. O desenvolvimento de programas de seguro alternativos com cobertura de renda esperada, aliados a estudos de estimativa de probabilidades de ocorrência de adversidades meteorológicas e diminuição das subvenções governamentais, certamente vão resultar na elevação da atratividade do seguro rural aumentando sua importância na administração de riscos agropecuários (CAFFAGNI, 1998).

Para o planejamento agrícola, melhor do que o conhecimento das médias dos diferentes elementos meteorológicos, é o conhecimento das probabilidades de sua ocorrência. As probabilidades fornecem índices de chance de ocorrência de determinados níveis ou valores críticos de fenômenos meteorológicos, que são de grande utilidade no planejamento da agricultura. É mais importante ainda para os casos de geadas e resfriamentos, que causam grandes prejuízos à agricultura, e não devem ser avaliados em considerando-se apenas os valores médios de temperatura mínima, mas as temperaturas mínimas absolutas, ou seja, os extremos mínimos. Para esses casos é fundamental a estimativa das

probabilidades de ocorrência de determinados níveis de valores absolutos de temperatura mínima do ar.

Uma das informações importantes para o planejamento é o risco de ocorrência de geadas, expresso na forma de "porcentagem de risco" ou "probabilidade de ocorrência". A utilização de modelos probabilísticos introduz precisão matemática, permitindo estudos mais consistentes de séries históricas de dados. ARRUDA et al. (1981), CAMARGO et al. (1993) e ASTOLPHO (2003) testaram vários modelos probabilísticos e definiram que os modelos de "distribuição de valores extremos" e "distribuição Normal" foram os que apresentaram os melhores ajustamentos entre as frequências observadas e estimadas, considerando dados de temperaturas mínimas absolutas pontuais para diversas regiões do Estado de São Paulo. Uma vez definido o método, pode-se partir para mapeamentos regionais das probabilidades de incidência de temperaturas mínimas absolutas e conseqüentes danos causados por geadas para diferentes culturas.

Alguns trabalhos (CAMARGO,1977; ARRUDA et al., 1981; CAMARGO et al., 1993; PINTO et al., 2000), visando à determinação de probabilidades de ocorrência de geadas prejudiciais à agricultura, consideraram temperaturas mínimas absolutas obtidas em abrigo meteorológico, inferiores a 2 e 1 °C como limites para a ocorrência do fenômeno. A adoção

desses limites fundamenta-se na constatação que, em noites de geada, a diferença média entre as temperaturas mínimas do ar observadas em abrigo meteorológico e as mínimas de relva, é de 5,6 °C (FAGNANI e PINTO, 1981). Assim, quando a temperatura mínima do ar for de 2 ou 1 °C, tem-se na folha exposta temperaturas próximas de -3,6 e -4,6 °C respectivamente, próximas do valor encontrado por CAMARGO e SALATI (1967) e PINTO et al. (1978) como limite para o aparecimento de danos em cafeeiros. Quanto menor a temperatura do ar abaixo desses limites, mais graves e extensos serão os danos às plantas.

O zoneamento agrícola é o resultado final de uma série de critérios afeitos ao clima, solo, localização e mão-de-obra disponível, que devem ser adotados durante a execução de um projeto agrícola. Os estudos de zoneamento realizados na década de 1970 indicavam as áreas consideradas aptas, marginais ou inaptas, mas sem levar em conta o aspecto probabilístico de ocorrência de extremos meteorológicos, ou seja, a questão dos riscos existentes em função de adversidades meteorológicas, como geadas. Esse enfoque pode ser considerado então como de zoneamento de riscos agrícolas, e não apenas de potencial agrícola, como os trabalhos anteriormente existentes (PINTO et al., 2001), sendo uma importante informação para os setores de seguro rural, financiamento agrícola e planejamento.

Atualmente, é possível o estabelecimento de probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas adversas à agricultura de forma mais precisa pelo uso de maior rede de postos agrometeorológicos, modelos probabilísticos apropriados e técnicas modernas de mapeamento. Assim, os objetivos deste estudo foram:

a) Estimar os riscos de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais para o Estado de São Paulo, utilizando modelo probabilístico apropriado e série climatológica de 30 anos (1971 a 2000) de 28 estações meteorológicas.

b) Regionalizar o Estado de São Paulo quanto à probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas do ar adversas à agricultura, por meio de sistema de informações geográficas, utilizando técnicas de interpolação e modelagem numérica do terreno, visando subsidiar o seguro rural, o planejamento e o zoneamento agrícolas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Dados de temperatura do ar mínima absoluta anual de 28 localidades do Estado de São Paulo (Tabela 1) foram utilizados tomando-se como base a série histórica do período de 1971 a 2000 (30 anos).

Para algumas estações meteorológicas, utilizou-se número menor de anos em virtude do início de operação da estação, sendo o menor período considerado o de Votuporanga, de 1991 a 2000 (9 anos) por ser uma região com pouca densidade de estações meteorológicas. A maioria das estações meteorológicas utilizadas localizam-se à meia encosta, representando assim o clima regional ou o macroclima da região. Essas condições macroclimáticas seriam condicionadas especialmente por fatores geográficos, como altitude, latitude e continentalidade.

2.1 Modelos probabilísticos teóricos

Utilizou-se o modelo de distribuição normal de acordo com ASTOLPHO (2003), um dos modelos que apresentam as estimativas mais consistentes de probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais.

A distribuição de probabilidade contínua mais importante e mais utilizada é a Distribuição Normal (Thom, 1966), uma distribuição de dois parâmetros. A função de densidade de probabilidade segundo ABRAMOVITZ e STEGUN (1972), é:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-0,5\left(x - \frac{\mu}{\sigma}\right)^2\right], -\infty < x < +\infty.$$

Em que: σ = desvio-padrão da distribuição; μ = média das temperaturas mínimas absolutas; x = temperatura mínima absoluta a ser considerada.

Segundo ASSIS et al. (1996), uma notação bastante utilizada para designar que uma variável tem distribuição normal com média " \bar{X} " e variância " S^2 " (" S " é a representação de " σ " e " \bar{X} " de " μ " de uma amostra) é $N(\bar{X}, S^2)$. Assim a aplicação fica bem simples, e para o cálculo da média (\bar{X}) e do desvio-padrão (S^2) são levados em consideração apenas os dados amostrais (existentes).

A probabilidade de que a temperatura mínima seja menor ou igual a uma temperatura x , de acordo com a distribuição Normal, é:

$$P(T \leq x) = 1 - \int_{\infty}^x f(x) dx$$

Tabela 1. Estações meteorológicas utilizadas com suas respectivas coordenadas geográficas, fonte e período de observação

Município	Latitude Sul	Longitude Oeste	Altitude (m)	Fonte	Período
Adamantina	21°41'	51°05'	443	IAC	1982-2000
Araçatuba	21°26'	50°26'	398	INMET	1971-2000
Assis	22°40'	50°26'	563	IAC	1976-2000
Barretos	20°33'	48°34'	541	INMET	1971-2000
Campinas	22°54'	47°05'	674	IAC	1891-2000
Campos do Jordão	22°41'	45°35'	1593	INMET	1971-2000
Capão Bonito	24°02'	48°22'	702	IAC	1978-2000
Cordeirópolis	22°32'	47°27'	639	IAC	1971-2000
Franca	20°33'	47°25'	995	INMET	1971-2000
Gália	22°18'	49°33'	522	IAC	1979-2000
Itararé	24°15'	49°15'	1150	IAC	1977-2000
Jaboticabal	21°14'	48°17'	614	UNESP	1971-2000
Jaú	22°17'	48°34'	580	IAC	1971-2000
Jundiaí	23°12'	46°53'	715	IAC	1971-2000
Manduri	23°10'	49°20'	589	IAC	1971-2000
Mococa	21°28'	47°01'	665	IAC	1971-2000
Monte Alegre do Sul	22°41'	46°43'	777	IAC	1971-2000
Nova Odessa	22°47'	47°18'	528	IAC	1971-2000
Pariquera Açu	24°43'	47°53'	25	IAC	1971-2000
Pindamonhangaba	22°55'	45°27'	560	IAC	1971-2000
Pindorama	21°13'	48°56'	562	IAC	1971-2000
Piracicaba	22°42'	47°38'	546	ESALQ	1971-2000
Presidente Prudente	22°07'	51°23'	436	INMET	1971-2000
Ribeirão Preto	21°11'	47°48'	621	IAC	1971-2000
Tatuí	23°20'	47°52'	600	IAC	1971-2000
Tietê	23°07'	47°43'	538	IAC	1971-2000
Ubatuba	23°27'	45°04'	8	IAC	1971-2000
Votuporanga	20°25'	49°59'	505	IAC	1991-2000

2.2. Teste de aderência

Utilizou-se o teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov (KS) para avaliar o ajuste das distribuições de probabilidade ao conjunto de dados. Adotou-se nível de significância de 0,05 ($\alpha = 5\%$). O teste de KS é mais adequado ao tratamento de dados acumulados não agrupados (MELLO et al., 1994). Assim, foram testadas as probabilidades acumuladas, calculadas para classes de 0,5 em 0,5 °C, segundo SOKAL e ROHLF (1969).

2.3. Análise de regressão e mapeamento

Visando mapear os riscos de ocorrência de resfriamentos e geadas, foram considerados três diferentes níveis de temperaturas mínimas absolutas

anuais, 0, 1 e 2 °C obtidas em abrigo meteorológico, para atender o rigor de suscetibilidade de diversas culturas. A adoção desses níveis como limites baseou-se na diferença média entre a temperatura do ar no abrigo meteorológico e a da relva, em noites de geada de 5 °C (BRUNINI e CAMARGO, 2000; SILVA e SENTELHAS, 2001). Dessa maneira, foram calculadas as probabilidades pontuais de ocorrência de temperaturas inferiores àqueles níveis para as 28 localidades consideradas.

Devido à deficiência de estações meteorológicas com séries longas, utilizou-se o método de regressão múltipla visando caracterizar a variabilidade espacial entre as estações e os resultados do modelo probabilístico considerado. O método de regressão "stepwise" (regressão passo a passo) com

probabilidade de erro igual a 5% ($\alpha = 0,05$) foi utilizado para determinar o conjunto de variáveis independentes, altitude, latitude e longitude que melhor explicam a variável dependente, probabilidade anual de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas inferiores a 0, 1 e 2 °C calculadas a partir do modelo de distribuição Normal para 26 localidades.

As estações meteorológicas de Gália e Manduri, por se localizarem próximas à baixadas, superestimando assim as probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas, não foram consideradas nas equações de regressão para o mapeamento.

O conjunto de variáveis independentes consideradas e que melhor explicam a variável dependente (probabilidade) foi composta por altitude, latitude e longitude, obtendo-se equações de regressão linear múltipla da seguinte forma:

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3$$

Em que: Y é a probabilidade estimada pelos modelos (%); a_0 , a_1 , a_2 e a_3 são coeficientes da equação de regressão; x_1 , x_2 e x_3 são, respectivamente, a altitude (metros), latitude (minutos) e longitude (minutos) de cada estação meteorológica.

Para a geração dos mapas de probabilidade de risco de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas inferiores a 0, 1 e 2 °C, foi utilizado o sistema de informações geográficas (SIG) "Idrisi 32" e o sistema de mapeamento de superfície "Surfer 6.01". No "Surfer" foram utilizadas técnicas de interpolação para a geração de imagens: latitude e longitude. O modelo digital de elevação utilizado foi obtido por sensoriamento remoto orbital da plataforma RADARSAT 1, com tratamento para eliminação de artefatos (VALERIANO et al., 2002). Considerando que o modelo digital de elevação (imagem:altitude) utilizado possui a resolução espacial de 800 metros e é composto por 841 linhas e 1.321 colunas, as imagens latitude e longitude foram geradas conforme as características (estrutura) desse modelo.

Uma vez obtidas as imagens digitais de altitude, latitude e longitude para todo o Estado de São Paulo, utilizou-se o SIG "Idrisi 32" com base nas equações obtidas das análises de regressão múltipla, para a geração de imagens do percentual de probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais inferiores a 0, 1 e 2 °C. Os valores percentuais obtidos constituem modelos digitais de probabilidades que expressam a variação contínua no espaço, pixel a pixel, dos riscos de ocorrência daquelas temperaturas absolutas.

Os modelos digitais de probabilidades relativos às temperaturas consideradas foram reclassificados em seis classes (0,0; 0,1-20,0; 20,1-40,0; 40,1-60,0; 60,1-80,0 e 80,1-100,0) de probabilidade de ocorrência, resultando em mapas de risco de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais inferiores a 0, 1 e 2 °C para o Estado de São Paulo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo probabilístico de distribuição Normal apresentou boa aderência para estimativa de probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas anuais segundo o teste de KS para as 28 localidades. Assim, o modelo probabilístico distribuição Normal representa adequadamente o conjunto de dados.

A diversidade topográfica que o Estado de São Paulo apresenta resultou em probabilidades bem distintas em localidades que se encontram praticamente na mesma latitude e longitude, como Ubatuba e Campos do Jordão, porém em altitudes diferentes, 8 e 1.593 m respectivamente. Observa-se que a probabilidade de ocorrência de temperaturas inferiores a 2 °C para Campos do Jordão é maior que 95%, enquanto para Ubatuba é menor que 1% (Tabela 2).

Praticamente em todo o Estado, com exceção das cidades litorâneas, pela proximidade do mar, e regiões Norte (Barretos e Jaboticabal) e Noroeste (Votuporanga), as probabilidades são superiores a 20%, significando que a cada 10 anos, ocorre pelo menos dois anos com temperaturas mínimas absolutas anuais inferiores a 2 °C. É importante ressaltar que 2 °C não significam necessariamente prejuízo total em muitas culturas, mas mantém a agricultura paulista competitiva, pois é formada principalmente de culturas bastante resistentes ao frio, como citros e uva, e medianamente resistentes como cana-de-açúcar e café. Culturas mais sensíveis como banana, mamão, tomate, dentre outras, requerem maiores cuidados na escolha das regiões com menores probabilidades de ocorrência de geadas e friagens.

O método de regressão passo a passo foi utilizado em análise individual (parcial) para determinar o conjunto de variáveis independentes, altitude, latitude e longitude, que melhor explicam a variável dependente probabilidade anual de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas inferiores em três níveis térmicos (0, 1 e 2 °C), calculadas com o modelo de distribuição Normal. Verificou-se na variável independente altitude significância nos três níveis térmicos, enquanto na variável latitude foi significativa apenas para 1 e 2 °C.

Tabela 2. Probabilidades (%) estimadas pela distribuição Normal, de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais inferiores a 0, 1 e 2 °C, em diversas localidades paulistas (1971 a 2000)

Localidade	Temperaturas (°C)					
	< 0°C		< 1°C		< 2°C	
	Distribuição		Distribuição		Distribuição	
	Empírica	Normal	Empírica	Normal	Empírica	Normal
Adamantina	5,0	6,2	10,0	12,1	20,0	23,1
Araçatuba	0,0	6,6	9,7	12,3	16,2	20,8
Assis	15,4	26,5	57,7	39,6	61,5	54,0
Barretos	3,2	2,9	6,5	7,1	22,6	14,7
Campinas	0,0	5,4	12,9	10,7	29,0	19,0
Campos do Jordão	96,8	99,1	96,8	99,9	96,8	100,0
Capão Bonito	20,8	23,9	37,5	42,5	54,2	63,1
Cordeirópolis	9,7	8,6	29,0	20,4	38,7	38,8
Franca	6,5	8,3	22,6	15,3	38,7	25,4
Gália	34,8	25,7	52,2	47,5	65,2	70,2
Itararé	56,0	58,4	64,0	73,3	80,0	84,9
Jaboticabal	3,2	2,9	6,5	6,7	12,9	13,6
Jaú	12,9	8,3	19,4	15,5	25,8	25,9
Jundiaí	25,8	21,1	38,7	32,1	48,4	45,0
Manduri	38,7	41,7	61,3	58,9	74,2	74,4
Mococa	9,7	5,1	9,7	10,9	25,8	20,4
Monte Alegre do Sul	16,1	10,8	32,3	22,2	35,5	38,4
Nova Odessa	12,9	10,7	29,0	22,0	38,7	38,2
Pariquera Açu	0,0	1,8	3,2	4,8	16,1	10,8
Pindamonhangaba	22,6	18,9	38,7	33,2	45,2	50,6
Pindorama	9,7	7,6	22,6	15,2	29,0	26,6
Piracicaba	6,5	6,6	22,6	16,1	29,0	31,8
Presidente Prudente	6,5	7,3	9,7	13,8	22,6	23,3
Ribeirão Preto	9,7	7,4	19,4	14,0	22,6	23,9
Tatuí	25,8	23,6	45,2	41,8	64,5	61,9
Tietê	12,9	7,3	25,8	17,2	29,0	32,8
Ubatuba	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Votuporanga	0,0	3,4	9,1	7,4	18,2	14,5

Na variável longitude não houve significância nos três níveis térmicos (Tabela 3). Na análise dos coeficientes de determinação (R^2) parciais da regressão *stepwise*, notou-se que as variações das probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas são devidas principalmente às variações de altitude. Com o aumento da altitude, obteve-se um aumento da probabilidade anual de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por GRODZKY et al. (1996) e MASSIGNAM e DITTRICH (1998), ao verificarem que as grandes diferenças quanto ao número de geadas ocorridas foram em função da altitude, e em segundo plano, da latitude e longitude.

Ao se considerar, porém, a regressão múltipla (altitude, latitude e longitude), os coeficientes de determinação (Tabela 4) ficaram mais elevados (0,80 - 0,90) quando comparados com as regressões individuais (Tabela 3), como com a altitude (0,68 - 0,78), razão pela qual se decidiu pelo uso da regressão múltipla para determinar as probabilidades visando ao mapeamento mais consistente do Estado de São Paulo.

O mapeamento das probabilidades estimadas pelas equações utilizando os coeficientes da regressão múltipla (Tabela 4), originaram as figuras 1 e 2, para

probabilidades de ocorrência de temperaturas inferiores a 1 e 2 °C com isolinhas classificadas de 20% em 20%.

Com base nas duas equações de regressão múltipla, gerou-se a variação contínua, pixel a pixel, do percentual de probabilidade de ocorrência ajustado, das classes de temperaturas mínimas inferiores a 1 e 2 °C. Na figura 1, são apresentadas as probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas, calculadas pela distribuição Normal, inferiores a dois níveis térmicos representativos de ocorrência de geadas moderadas (<2 °C) e severas (<1 °C). O mapeamento aponta probabilidades superiores a 80% nas regiões de altitude superior a 1.000 m na Serra da Mantiqueira e sudoeste do Estado.

Na região central, as probabilidades ficaram entre 0 e 20% para 1 °C e de 20% a 40% para 2 °C. A região Norte e a Noroeste apresentaram probabilidades inferiores a 20%. Comparando-se este mapa com o trabalho de CAMARGO et al. (1990), percebe-se claramente aumento da precisão e do detalhamento das isolinhas conferidos pelo uso do modelo distribuição Normal que apresentou boa aderência pelos testes estatísticos, aliados ao uso de técnicas apropriadas de regressão e mapeamento.

Tabela 3. Coeficientes de determinação (R^2) parcial e total resultantes da análise de regressão “stepwise” entre as probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais (0, 1, 2 °C) estimadas pelo modelo probabilístico Normal e as coordenadas geográficas (altitude, latitude e longitude) e seus níveis de significância segundo o teste F

Temperatura mínima absoluta (°C)	R^2 parcial			R^2
	altitude	latitude	longitude	Total
0	0,78*	0,33NS	0,20NS	0,87*
1	0,77*	0,40*	0,17NS	0,90*
2	0,74*	0,44*	0,15NS	0,90*

* significativo a 5%. NS: não significativo

Tabela 4. Coeficientes de regressão múltipla das equações de estimativa das probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais inferiores a 0, 1 e 2 °C obtidas do modelo de distribuição Normal (DN)

Temperatura mínima absoluta (°C)	Coeficientes da regressão múltipla				Coeficiente de determinação
	a	b	c	d	R^2
0	-246,64	0,0568	0,1217	0,0221	0,87
1	-325,13	0,0606	0,1572	0,0348	0,90
2	-374,45	0,0616	0,1808	0,0446	0,90

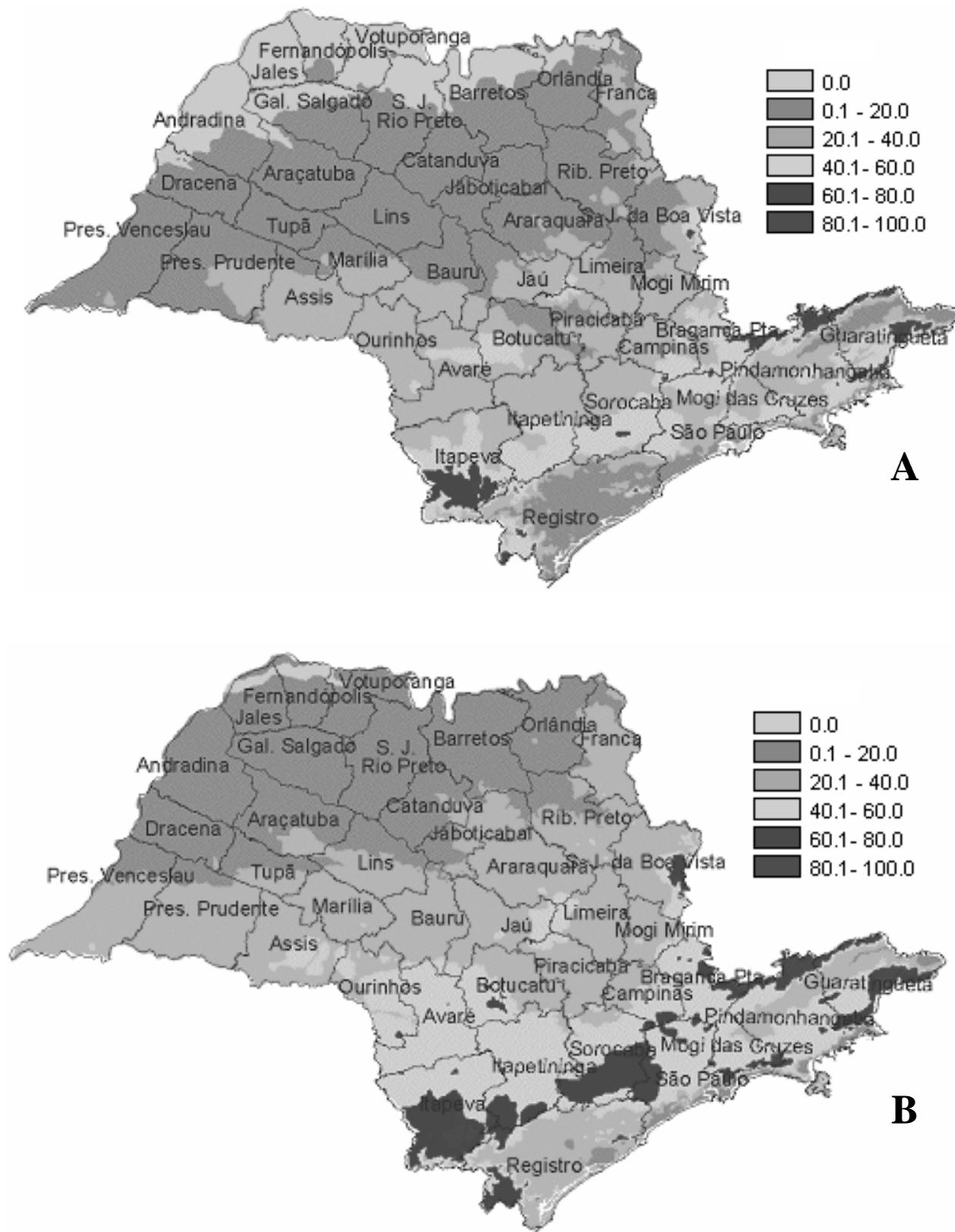


Figura 1. Risco (%) de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais inferiores a 1°C (A) e 2°C (B) para o Estado de São Paulo.

4. CONCLUSÕES

1. O modelo de distribuição Normal apresentou bom ajuste entre as frequências estimadas e as observadas de probabilidade de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais, para os três níveis térmicos e localidades consideradas.

2. As variações de probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas anuais foram devidas principalmente às variações de altitude, seguidas pela latitude e longitude.

3. A regionalização dos riscos de ocorrência de geadas no Estado de São Paulo, com base nas equações de regressão múltipla, oriundas do modelo probabilístico Distribuição Normal e por meio de SIG, considerando técnicas de interpolação e de modelagem numérica do terreno, possibilitaram a geração contínua, pixel a pixel das probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas inferiores a 1 e 2 °C, ampliando a precisão e o detalhamento das isolinhas que definem nos mapas as classes de probabilidade, que deverão dar suporte mais consistente ao planejamento, ao zoneamento agrícola e ao seguro rural.

4. Os mapeamentos dos riscos de ocorrência de temperaturas anuais absolutas inferiores a 1 e 2°C apontam probabilidades superiores a 80% nas regiões de altitude superiores a 1.000 m na Serra da Mantiqueira e no sudoeste do Estado. Na região central, as probabilidades ficaram entre 0 e 20% e 20% a 40% respectivamente, enquanto nas regiões Norte e Noroeste as probabilidades foram inferiores a 20%.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOVITZ, M.; STEGUN, I. A. **Handbook of mathematical functions**. 9.ed. New York: Dover, 1972. 1046 p.
- ARRUDA, H. V.; PINTO, H. S.; PENTEADO, R. S. Modelos probabilísticos para a interpretação de temperaturas mínimas na região de Campinas, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2., 1981, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1981. p.143-145.
- ASTOLPHO, F. **Estimativa e mapeamento de probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas do ar adversas à agricultura paulista**. 2003. 99f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agronômico, IAC, Campinas.
- BRUNINI, O.; CAMARGO, M. B. P. Methodologies for assessing and quantifying drought and frost risks in Brazil. In: REUNIÓN DE EXPERTOS DE LAS ASOCIACIONES REGIONALES III Y IV SOBRE FENÓMENOS AGROMETEOROLÓGICOS ADVERSOS, 1999, Caracas. **Actas...** Ginebra, Suiza: Organización Meteorológica Mundial, 2000. p.31-43.
- CAFFAGNI, L. C. **Seguro Rural no Brasil: evolução, alternativas e sugestões**. 1998. 173f. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP, Piracicaba.
- CAMARGO, A.P. Frequências das geadas excepcionais como as de julho de 1975. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE CLIMATOLOGIA NO HEMISFÉRIO SUL, 1977, Campinas. **Resumos...** Campinas: Instituto Agronômico, 1977. p.1-3.
- CAMARGO, A.P.; SALATI, E. Determinación de la temperatura letal para hojas de café en noches de heladas. **Café**, Lima, v.8, n.3, p.12-15, 1967.
- CAMARGO, M.B.P.; PEDRO JUNIOR, M.J.; ALFONSI, R.R.; ORTOLANI, A.A.; BRUNINI, O.; CHIAVEGATTO, OLGA. M.D.P. **Probabilidade de ocorrência de geadas nos Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul**. Campinas: Instituto Agronômico, 1990. (Boletim Técnico IAC, 136).
- CAMARGO, M.B.P.; PEDRO JUNIOR, M.J.; ALFONSI, R.R.; ORTOLANI, A.A.; BRUNINI, O. Probabilidades de ocorrência de temperaturas mínimas absolutas mensais e anual no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 2, n.2, p.161-168, 1993.
- FAGNANI, M.A.; PINTO, H.S. Simulação de temperaturas de folhas de cafeeiros em noites sujeitas a geadas de irradiação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2., 1981, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1981. p.139-142.
- GRODZKI, L.; CARAMORI, P. H.; BOOTSMA, A.; OLIVEIRA, D.; GOMES, J. Riscos de ocorrência de geada no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 93-99, 1996.
- MASSIGNAM, A. M.; DITTRICH, R. C. Estimativa do número médio e da probabilidade mensal de ocorrência de geadas para o Estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n. 2, p.213-220, 1998.
- MELLO, M.H.A.; ARRUDA, H.V.; ORTOLANI, A.A. Probabilidade de ocorrência de totais pluviométricos máximos horários, em Campinas. **Revista IG**, São Paulo, v.15, n.1-2, p.59-67, 1994.
- PINTO, H.S.; CAMARGO, M.B.P.; NOBREGA, M.; ORTOLANI, A.A. Um sistema computacional para levantamento de prejuízos causados por geadas à cafeicultura do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 6., 1978, Ribeirão Preto. **Resumos Expandidos...** Ribeirão Preto: IBC-GERCA, 1978. p.145-147.
- PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R.R.; CAMARGO, M.B.P.; CORAL, G.; BARBANO, M.T. Um modelo para estimativa de danos causados por geadas em cafezais. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos Expandidos...** Poços de Caldas: Embrapa Café, 2000. p.120-122.

PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J.; ASSAD, E. D.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R. R.; CORAL, G. Zoneamento de riscos climáticos para a cafeicultura do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 495-500, 2001.

SILVA, J. G. da; SENTELHAS, P. C. Diferença de temperatura mínima do ar medida no abrigo e na relva e probabilidade de sua ocorrência em eventos de geada no Estado de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.9, n.1, p.9-15, 2001.

SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. **Biometry**: the principles and practice of statistics in biological research. San Francisco: W. H. Freeman, 1969. 776p.

VALERIANO, M.M.; MELO, A.R.; SARRAIPA, L.A.S.; NEGREIROS, I.P.M.; PALLONE F. W. Formação de base topográfica digital (1:1.000.000) do Estado de São Paulo com dados RADARSAT-1. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.24, n.6, p.2002.

THOM, H. C. S. **Some methods of climatological analysis**. Geneva: World Meteorological Organization, 1966. 53p. (WMO, 199; TP, 103; Technical note, 81).