

FATORES MACRO E MICROMETEOROLÓGICOS NA OCORRÊNCIA DE GEADAS — ESTUDO DE UM CASO^{1/}

Rubens Leite Vianello^{2/}
Nandamudi Jagan Mohana Rao^{3/}
Kondapalli Rama Rao^{3/}

1. INTRODUÇÃO

Fisicamente, geada é o fenômeno de deposição de cristais de gelo sobre as superfícies expostas, quando a temperatura desce abaixo do ponto de congelamento. Sob o ponto de vista agrônomo, é qualquer queda de temperatura capaz de causar danos às plantas (2).

Quanto à gênese, a geada pode classificar-se em geada de advecção, geada de radiação e geada mista. A geada de advecção resulta do movimento horizontal de massas de ar frio, que se deslocam sobre as culturas, causando danos às plantas por resfriamento. A geada de radiação resulta do resfriamento da superfície em consequência da perda de calor por radiação noturna. Esse fenômeno ocorre, geralmente, em noites frias, sem nuvens e em condições de calma atmosférica, resultando na formação de inversão térmica. Geadas mistas ocorrem na presença dos fenômenos de advecção e radiação, combinados.

Quanto aos efeitos visuais, as geadas classificam-se em geadas brancas e geadas negras. As primeiras, mais comuns, caracterizam-se pela ocorrência de cristais de gelo na superfície das plantas, ao passo que as negras não apresentam tais formações cristalinas. Seu nome deriva da cor negra que se vê nas plantas mortas, em razão dos efeitos do seu congelamento interno.

^{1/} Recebido para publicação em 29-05-1981.

^{2/} Departamento de Engenharia Agrícola da U.F.V., 36570 Viçosa, MG.

^{3/} Universidade Estadual «Júlio de Mesquita Filho» — Instituto de Planejamento e Estudos Ambientais, 19100 Presidente Prudente, SP.

Os fatores físicos que condicionam a ocorrência de geadas são constituídos por dois grupos: o primeiro engloba os fatores macrometeorológicos, enquanto o segundo corresponde aos micrometeorológicos. Entre os fatores macrometeorológicos destacam-se: as massas de ar frio provenientes de latitudes mais elevadas, as quais, ao se deslocarem para regiões mais aquecidas, condicionam uma queda de temperatura de escala pelo menos regional. Tais invasões de ar frio configuram o deslocamento de sistemas sinóticos, caracterizados por situações típicas nos campos de escoamento, temperatura, nebulosidade, pressão atmosférica, precipitação, etc. Como os fatores macrometeorológicos comportam-se, em geral, de maneira cíclica, seu estudo fornece importantes informações alusivas à época em que ocorrem as geadas. Por outro lado, a existência de condições macrometeorológicas favoráveis não implica a ocorrência genérica de geada, pois o que ocorre de fato na natureza é a interação de tais fatores com os condicionantes físicos locais, que correspondem aos fatores micrometeorológicos. Entre esses últimos fatores destacam-se as características físico-químicas e o conteúdo d'água no solo, a cobertura vegetal, as configurações topográficas, a circulação atmosférica local, as condições de umidade atmosférica, a altitude, etc.

Conseqüentemente, em condições favoráveis, a intensidade da geada será basicamente determinada pelas características microclimáticas.

Entretanto, independentemente de suas origens ou tipos, as geadas causam sempre grandes danos à agricultura. Quando de grande intensidade, como as que ocorreram no Brasil em 1918, por exemplo, e, mais recentemente, em 1979, os resultados são desastrosos e confrangedores. A «queima» das pastagens e a conseqüente «quebra» na produção leiteira, as perdas acentuadas na potencialidade produtiva dos cafezais, com desastrosos prejuízos para a economia nacional, a redução significativa nas safras de trigo, feijão, batata e cultivos hortigranjeiros, etc., foram algumas conseqüências verificadas especialmente nos Estados sulinos e no Sudeste brasileiro, em razão das intensíssimas geadas ocorridas nas noites de 30 para 31 de maio e de 31 de maio para 1.º de junho de 1979 (6).

O estudo das geadas e dos fatores que atuam sobre elas constituem objetivo de grande utilidade, quer para melhor conhecimento do fenômeno em si, quer para fins prognósticos. Esse estudo deve englobar, preferencialmente, os fatores micro e macrometeorológicos, bem como as interações envolvidas. Apesar da importância de tais estudos, nem sempre é possível realizá-los, por causa da escassez de observações, principalmente em microescala.

Com esta pesquisa, pretendeu-se estudar as últimas e intensas geadas ocorridas, tentando analisá-las com o enfoque macro e micrometeorológico. Em razão disso, foram usados dados observados nos dias 30/05, 31/05 e 01/06 de 1979, em Presidente Prudente, SP, bem como a análise de cartas sinóticas e fotos de satélites para o mesmo período. A escolha desse local deveu-se exclusivamente à disponibilidade de dados em microescala, o que permitiria visualizar as interações de escalas envolvidas no fenômeno.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a caracterização microclimática do fenômeno, foram coletados dados de superfície e temperatura do solo na Estação Meteorológica do Instituto de Planejamento e Estudos Ambientais de Presidente Prudente, SP, IPEA, latitude 22°07'S, longitude 51°23'W e altitude de 435,55m, pertencente à Universidade do Estado de São Paulo, UNESP. Tais dados referem-se à temperatura do ar a 1,5 m (abrigo meteorológico), à temperatura de relva e à temperatura do solo em diversas profundidades, para condições de solo nu, relva natural e relva seca, nebulosidade, chuva e ventos a 10 m de altura.

Na análise dos fatores macrometeorológicos foram usadas as cartas sinóticas

de superfície e as fotos do satélite SMS-2/GOES, para os dias 30/05, 31/05 e 01/06/79, que foram gentilmente cedidas pelo Instituto de Pesquisas Espaciais, INPE/CNPq, São José dos Campos, SP.

Os fatores que influíram na ocorrência de geadas nos dias 31/05 e 01/06 foram analisados separada e conjuntamente, cobrindo, principalmente, o período de 30/05 a 01/06; para os parâmetros considerados necessários, a análise incluiu os dias 29/05 e 02/06.

Foi dada ênfase ao estudo dos perfis de temperatura do solo nos diversos níveis e diferentes coberturas, por tratar-se de fatores determinantes da ocorrência de geadas. A difusividade térmica do solo foi calculada por meio da expressão.

$$K = \frac{\pi}{T} \left[\frac{Z_2 - Z_1}{\ln(R_1/R_2)} \right]^2 \quad (1)$$

em que K é a difusividade térmica da camada compreendida entre os níveis Z_1 e Z_2 ; T é o período, 86400 segundos para o ciclo diário; R_1 e R_2 são os «ranges» de temperatura nos níveis em consideração, respectivamente; ln é a base dos logaritmos naturais e $\pi = 3,14159$.

A expressão 1 foi obtida da solução da Equação de Fourier para condução de calor em solo homogêneo, numa direção, com condutividade térmica constante e sujeita a condições iniciais e de contorno apropriadas (10).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em escala regional, o clima, em Presidente Prudente, é tropical, quente e úmido, com chuvas de verão. Pela classificação de Köppen, é Cwa, mesotérmico úmido, com inverno seco e verão quente (1). O solo estudado é podzolizado acentuado, variedade Marília, com textura de areia fina.

A penetração de sistemas frontais, tais como o que será discutido, é uma importante característica climática da região em estudo, especialmente no inverno. Tais sistemas originam-se na porção meridional do continente sul-americano, deslocando-se, em geral, na direção sudoeste-nordeste; pela teoria frontal clássica, resultam do deslocamento de uma massa de ar polar, fria e seca, que, ao atingir regiões ocupadas por ar mais quente e úmido, configura uma estreita faixa de intensa atividade, conhecida classicamente como zona frontal, essencialmente baroclínica. Nessa zona, trocas energéticas, envolvendo conversões de energia potencial disponível em energia cinética, justificam o predomínio de ventos fortes e variados, formações cumuliformes e precipitações. Concomitantemente ao deslocamento do sistema, sensíveis alterações ocorrem no campo da temperatura e da pressão atmosférica. Como frente fria, a aproximação do sistema caracteriza-se pela queda da pressão atmosférica, resultando no predomínio de uma região de baixa pressão na zona frontal, com temperaturas em declínio. Após a passagem da zona frontal, verifica-se a substituição da baixa pressão por uma alta, resultando ainda numa acentuada queda na temperatura do ar atmosférico local. Evidentemente, tal queda na temperatura resulta da invasão do ar frio e sua conseqüente mistura ao ar local. Claramente, esse sistema, ao deslocar-se, tenderá a enfraquecer-se, em razão, principalmente, da dissipação de energia cinética por efeitos friccionais e da descaracterização das propriedades originais da massa polar, como conseqüência da mistura que sofre ao longo de seu deslocamento. Finalmente, o sistema se dissipa, isto é, verifica-se a frontólise. Para conhecimento mais detalhado da teo-

ria frontal clássica, bem como de novas concepções atualmente evocadas pela análise meteorológica, sugerem-se consultas a textos e periódicos especializados e amplamente divulgados no meio da comunidade meteorológica. As considerações anteriormente feitas visam apenas a facilitar a compreensão do que, posteriormente, será discutido.

De acordo com os objetivos almejados, este trabalho procurou relacionar os fatores macro e micrometeorológicos entre si, na busca de melhor entendimento do fenômeno em estudo. Para isso, optou-se pela abordagem dos referidos fatores separadamente e, posteriormente, tentou-se analisar suas interações.

3.1. Fatores Macrometeorológicos

A Figura 1 refere-se à foto do satélite SMS-2 do dia 30/05/79, horário 10:46 GMT, na faixa do infravermelho, IV. Nessa foto, destaca-se o continente sul-americano, com a respectiva cobertura de nuvens. Por tratar-se da faixa IV, a diferença de tonalidade indica a variação no campo da temperatura. Nota-se, claramente, uma zona com máxima concentração de nuvens sobre a América do Sul, disposta em forma de faixa, na direção NW-SE. Tal nebulosidade identifica a posição, em altos níveis, de um sistema frontal bem caracterizado, cobrindo a região Sudeste brasileira, prolongando-se para a região Centro-Oeste e para o Atlântico. Observa-se, ainda, no extremo sul do continente, outro sistema em formação, estendendo-se para o Pacífico. Nota-se, também, o predomínio de duas massas de ar com significativa diferença de temperatura: entre o sistema, ainda em formação, ao Sul, e o sistema situado sobre o Brasil, a tonalidade esbranquiçada do continente destaca o amplo domínio de uma massa polar fria, em contraste com a tonalidade escura que se visualiza sobre o Nordeste e parte da região Amazônica, onde se situa o ar tropical quente. Fotos de dias anteriores mostram que o sistema frontal que atua sobre o Sudeste brasileiro originou-se também no sul do continente, tendo-se deslocado e evoluído até a atual configuração, que caracteriza, tipicamente, uma frente fria, possivelmente associada com linhas de instabilidade tropicais de oeste. A carta sinótica desse mesmo dia mostra a posição do sistema à superfície e a marcante diferença de temperatura entre as duas massas de ar separadas pela frente, embora se saiba que a estrutura térmica próxima do solo geralmente não forma um quadro representativo das massas de ar, em razão do mascaramento do campo da temperatura de grande escala pelas configurações de pequena escala à superfície. Na retaguarda do sistema observam-se temperaturas negativas em diversos pontos, contrastando com valores que superam a marca dos 25°C, à frente. Quanto ao campo da pressão, embora não atinja diferenças tão significativas, destacam-se dois centros de alta, que se acham separados pela faixa de baixas pressões da região frontal.

A Figura 2 refere-se à foto do SMS-2 do dia 31/05/79. O traço mais destacável dessa foto, comparada às anteriores, é o enfraquecimento do sistema sobre o continente brasileiro, reduzindo-se a zona frontal, praticamente, ao seu ramo sobre o oceano. Também a carta sinótica de superfície, dessa mesma data, mostra essa configuração. As massas de ar evidenciam um estado de mistura bastante avançado, resultando disso menor contraste térmico, com predomínio de temperaturas mais baixas. Em consequência da rápida evolução observada e da pouca penetração frontal na região tropical, o sistema mostrou um comportamento típico de frente fria de deslocamento rápido. Nessa época do ano, embora a frequência de sistemas extratropicais seja elevada, atingindo a média de 6 por mês, dos quais 90% alcançam o Brasil, suas penetrações raramente ultrapassam 15°S, por causa do predomínio, sobre o Brasil, da célula subtropical de alta pressão (5). Além disso, esse regime estende-se, bem definido, até o nível de 300 mb, constituindo-se

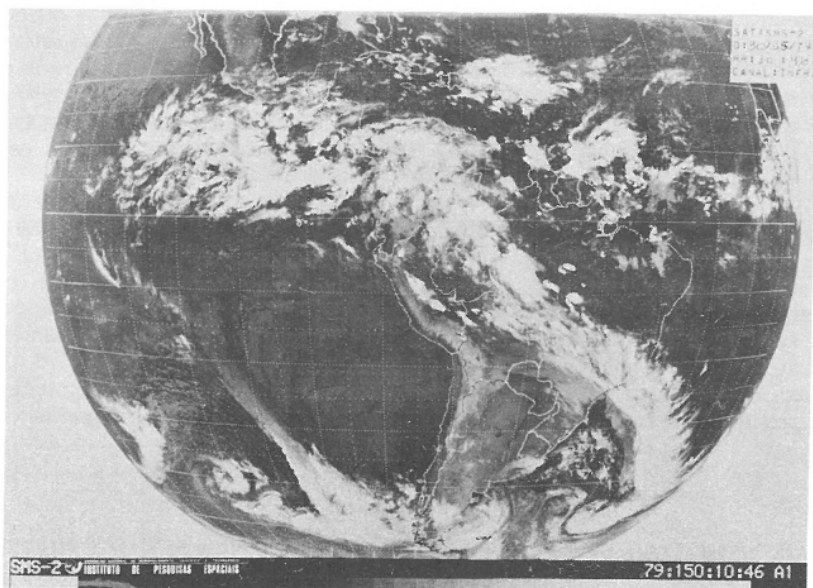


FIGURA 1 - Foto do Satélite SMS-2, na faixa do infravermelho térmico, de dia 30/05/79, 10:46 GMT, obtida pelo Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE/CNPq.

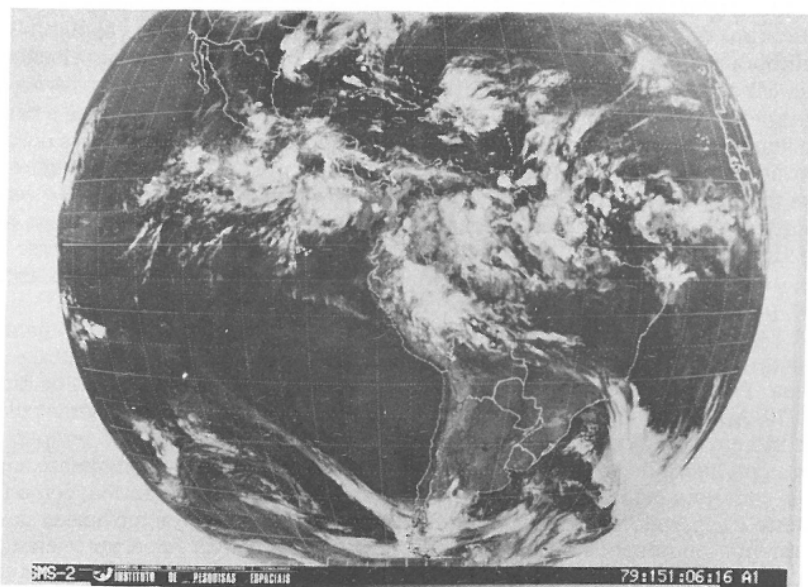


FIGURA 2 - Foto do Satélite SMS-2, na faixa do infravermelho térmico, do dia 31/05/79, 06:16 GMT, obtida pelo Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE/CNPq.

numa verdadeira barreira contra a penetração dos distúrbios oriundos do sul do continente.

O campo da pressão evidencia o predomínio da massa polar, que se estende sobre o sul, o sudeste e o centro-oeste do Brasil; o centro de alta pressão sobre o continente acha-se com 1026 mb, ao passo que sobre o Atlântico atinge apenas 1018 mb. Continua evoluindo o sistema localizado ao sul do continente. As Figuras 1 e 2 mostram também, ao norte do Brasil, uma espessa faixa de nuvens, associada à Zona de Convergência Intertropical.

A situação sinótica no dia 01/06/79, na região em estudo, caracterizou-se pelo amplo domínio de um centro de alta pressão. O sistema frontal restringiu-se exclusivamente ao oceano, tendo o ramo continental se dissipado inteiramente, como se vê nas Figuras 3 e 4. Essa última figura foi obtida das cartas sinóticas de superfície dos dias 30 e 31/05 e 01/06/79, 12 TMG, da Telecomunicações Aeronáuticas S.A. — TASA. Foi elaborada com a finalidade de permitir o acompanhamento do sistema à superfície, nos dias de interesse. A comparação das Figuras 1, 2, 3 e 4 mostra como o sistema evoluiu em aproximadamente 3 dias, especialmente os campos da temperatura e da nebulosidade e o sistema frontal propriamente.

3.2. Fatores Micrometeorológicos

Os registros contínuos do vento, em Presidente Prudente, a 10 m de altura, de 29/05/79 a 01/06/79, mostram o seguinte:

Das 7 às 8h30 min (Figura 5), ventos norte, com velocidade em torno de $2,8 \text{ m s}^{-1}$; a partir das 8h30min, os ventos giram para oeste, com rajadas fortes, chegando a $18,0 \text{ ms}^{-1}$ (68,40 km/hora), às 9h40min; às 14h30min, os ventos giram uma vez mais, passando a sul, com velocidade variável e rajadas ocasionais, prosseguindo, assim, até às 16 horas do dia 30/05/79, como se vê na Figura 6. A partir das 16 horas desse dia os ventos vão-se enfraquecendo, e as rajadas vão diminuindo, embora predominem, ainda, ventos sul. Das 18 horas em diante, a velocidade média cai de 3 ms^{-1} para 1 ms^{-1} , atingindo, praticamente, calma atmosférica na madrugada de 30/05 para 31/05/79. Essa situação só começa a modificar-se a partir de 9h30min, quando o vento sul começa a intensificar-se, atingindo valores médios em torno de $2,8 \text{ m s}^{-1}$, com rajadas que chegam a 7 m s^{-1} , às 11 horas (Figura 7). Nesse mesmo dia, a partir das 16 horas, as rajadas cessam inteiramente, e o vento enfraquece ao longo da noite, chegando à condição de calma atmosférica na madrugada de 01/06/79, a qual se estende até às 9h30min desse dia. A partir desse horário, os ventos voltam a atingir velocidades em torno de 3 m s^{-1} , girando, entretanto, para as direções leste e norte, como se vê na Figura 8.

A Figura 9 mostra os perfis diários de temperatura do solo, observados para os níveis de 2, 5, 10 e 20 cm e para três tipos de cobertura: solo nu, relva natural e relva seca. Tais perfis estendem-se das 7 horas do dia 30/05/79 até às 7 horas do dia 02/06/79. Apesar das limitações dos dados, que foram obtidos com termômetros de mercúrio em vidro, destaca-se a diferença na amplitude das ondas de temperatura; em condições de solo nu, as ondas apresentam amplitudes nitidamente superiores, com uma defasagem, de acordo com a profundidade, bem nítida, como fisicamente é esperado. As amplitudes observadas em cobertura de relva seca são ligeiramente inferiores às observadas em relva natural. Outra importante característica refere-se aos extremos térmicos observados: para solo nu, as temperaturas variaram de $7,3^{\circ}\text{C}$ a $17,7^{\circ}\text{C}$, a 2 cm, com um «range» de $10,4^{\circ}\text{C}$; para relva natural, de $15,2^{\circ}\text{C}$, a 2 cm, a $19,6^{\circ}\text{C}$, a 20 cm, «range» de $4,4^{\circ}\text{C}$; para condições de relva morta, de $16,0^{\circ}\text{C}$, a 2 cm, até $20,2^{\circ}\text{C}$, a 20 cm, «range» de $4,2^{\circ}\text{C}$. Vale observar que o «range» e os extremos foram muito mais pronunciados em condições de solo nu e menos destacáveis para cobertura morta. Essa característica é importantíssima

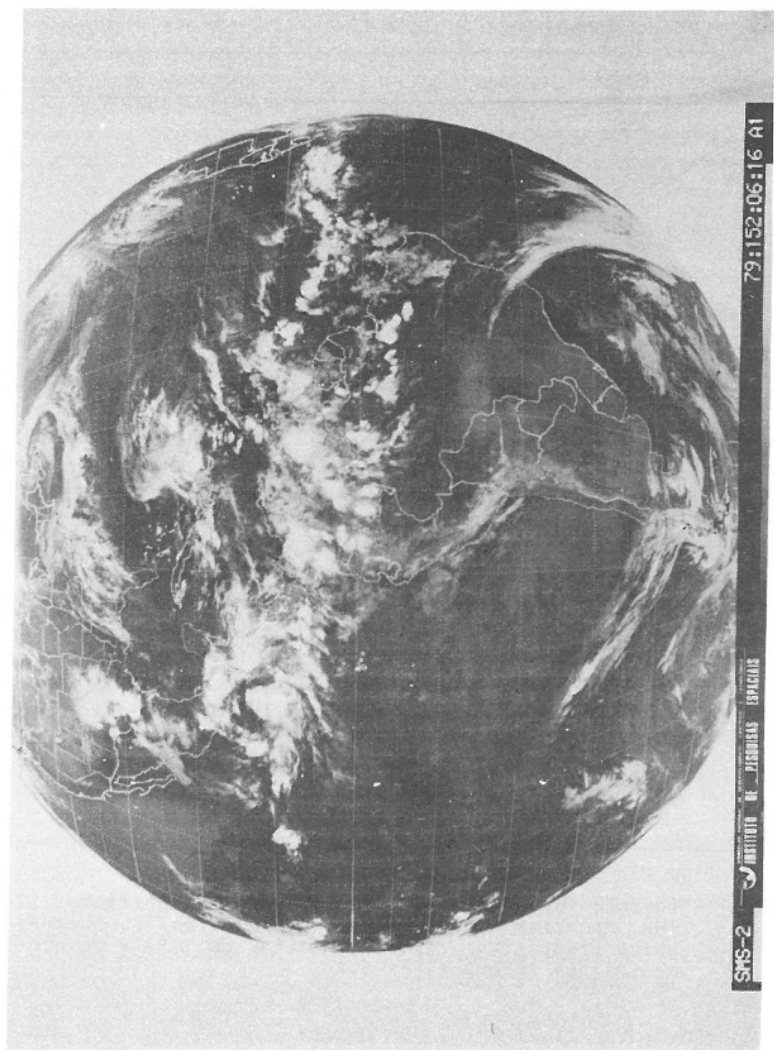


FIGURA 3 - Foto do Satélite SMS-2, na faixa do infravermelho térmico, do dia 01/06/79, 06:16 GMT, obtida pelo Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE/CNPq.

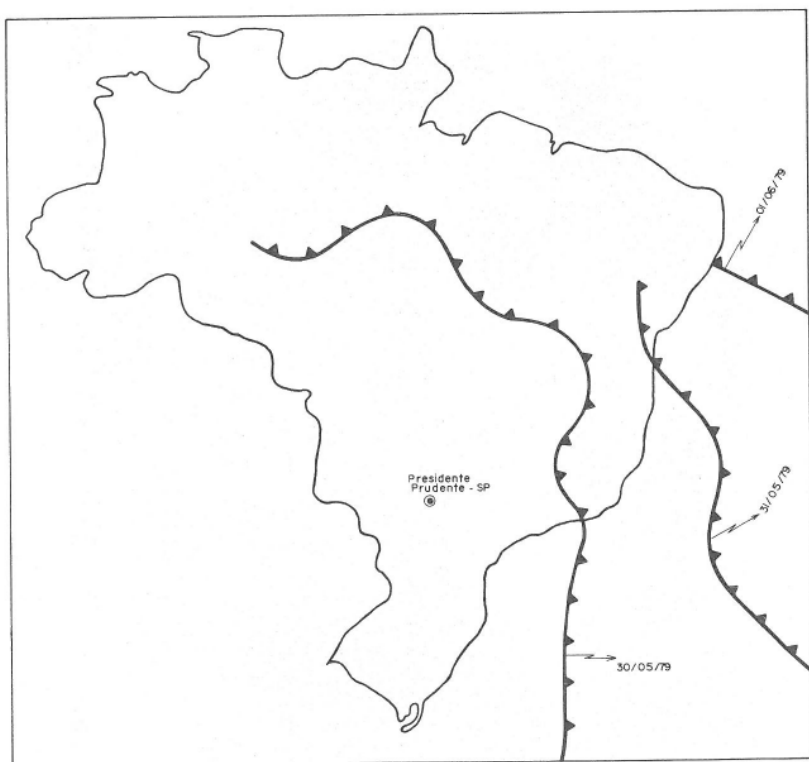


FIGURA 4 - Posições ocupadas pela frente fria, à superfície, 12 TMG, nos dias 30/05/79, 31/05/79 e 01/06/79, obtidas pelas respectivas cartas sinóticas da TASA - Telecomunicações Aeronáuticas S.A.

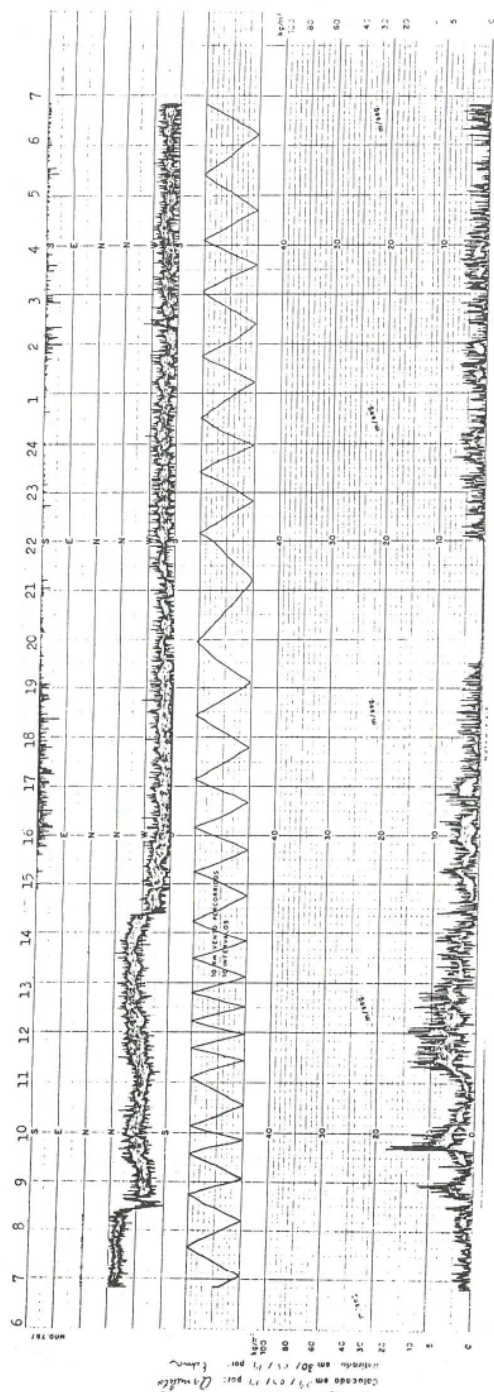


FIGURA 5 - Diagrama de direção e velocidade do vento, das 7 horas do dia 29/05/79 às 7 horas do dia 30/05/79 (hora local), para Presidente Prudente, SP.

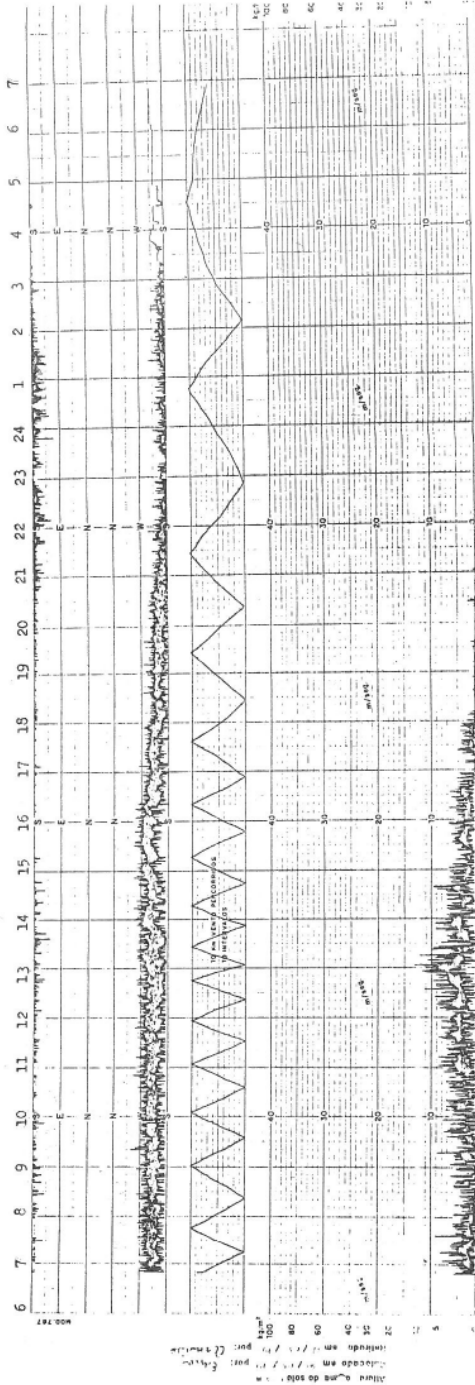


FIGURA 6 - Diagrama de direção e velocidade do vento, das 7 horas do dia 30/05/79 às 7 horas do dia 31/05/79 (hora local), para Presidente Prudente, SP.

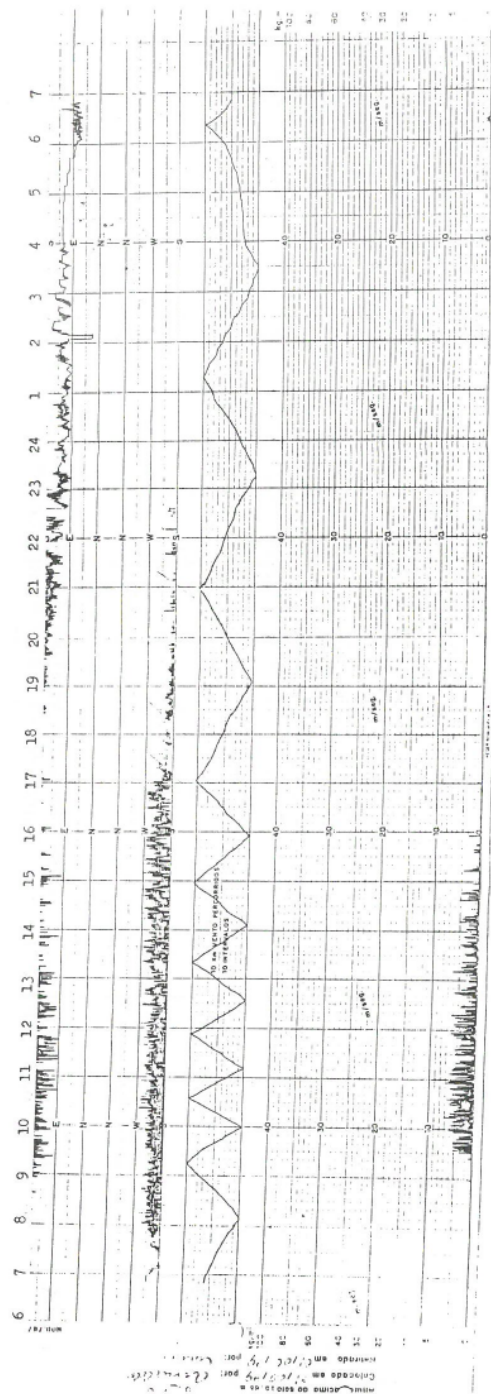


FIGURA 7 - Diagrama de direção e velocidade do vento, das 7 horas do dia 31/05/79 às 7 horas do dia 01/06/79 (hora local), para Presidente Prudente, SP.

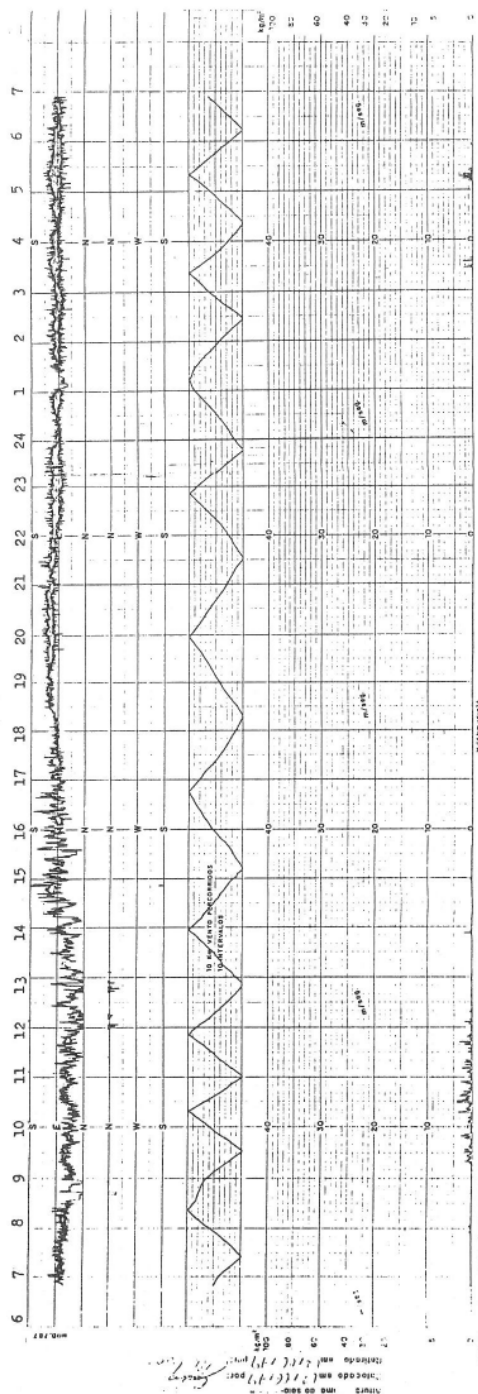


FIGURA 8 - Diagrama de direção e velocidade do vento, das 7 horas do dia 01/06/79 às 7 horas do dia 02/06/79 (hora local), para Presidente Prudente, SP.

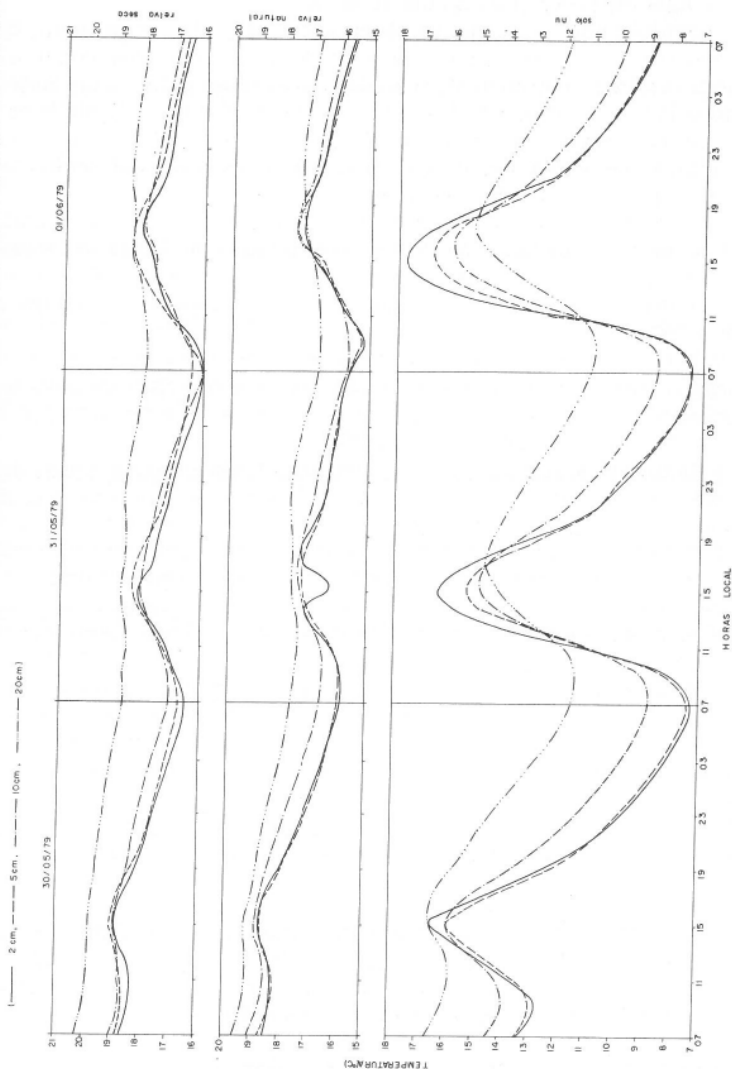


FIGURA 9 - Temperaturas do solo para as profundidades de 02, 05, 10 e 20 cm, das 7 horas do dia 30/05/79 as 7 horas do dia 02/06/79 (hora local), em condições de solo nu, relva natural e relva seca, Presidente Prudente, SP.

para a ocorrência da geada e voltará a ser discutida com maiores detalhes neste trabalho.

As temperaturas de relva (superfície), às 7 horas, foram $-5,9^{\circ}\text{C}$ e $-3,6^{\circ}\text{C}$, para os dias 31/05/79 e 01/06/79, respectivamente. Tais valores, comparados aos observados a 2 cm de profundidade (Figura 9), mostram gradientes de $6,6^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, para o solo nu, e de $11,2^{\circ}\text{C}/\text{cm}$, para cobertura de relva seca, ambos no dia 31/05/79; valores ligeiramente inferiores ocorreram no dia 01/06/79.

Quanto à nebulosidade e chuvas, as observações de rotina mostraram: dia 29/05/79, céu coberto, com predomínio de nuvens do gênero cúmulos, cúmulos-nimbos e nimbos-estratos, ocorrendo 37,1 mm de chuvas nessa data; no dia 30/05/79, céu coberto pela manhã, com estratos-cúmulos e altos-cúmulos, céu ainda coberto à tarde, nuvens dos gêneros cúmulos e cirros, e, à noite, céu claro, não tendo ocorrido precipitação nesse dia; nos dias 31/05/79 e 01/06/79, o céu apresentou-se completamente limpo, sem nenhuma ocorrência de chuva.

A marcha diária da temperatura do ar, ao nível do abrigo meteorológico, para os dias 30 e 31 de maio e 1.º de junho de 1979, acha-se plotada na Figura 10. Destaca-se, nessa figura, a acentuada queda de temperatura a partir do dia 30, à noite, resultando na ocorrência de $1,7^{\circ}\text{C}$ às 7 horas do dia 31, atingindo, na manhã de 1/06, a cifra de $4,2^{\circ}\text{C}$.

As Figuras 11 e 12 mostram os perfis verticais da temperatura do solo para diferentes horários do dia 01/06/79, em condições de solo nu e cobertura de relva seca, respectivamente. É evidente a influência da cobertura sobre a variação diária da temperatura, especialmente próximo à superfície.

Usando os dados das Figuras 9, 11 e 12 e a equação 1, estimou-se a difusividade térmica para o solo de Presidente Prudente. O valor médio obtido para as diversas camadas do solo e para os diferentes tipos de cobertura foi de $81,5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Evidentemente, tal valor acha-se superestimado, pelo menos numa ordem de grandeza, tendo em vista os valores obtidos por outros autores para condições semelhantes (10, 9, 7). Por outro lado, tais valores, elevados, talvez se justifiquem pelas seguintes razões: 1) foram usados dados do ciclo diário incompleto, pois as medições restringiram-se ao período compreendido entre 7 e 21 horas apenas; além disso, para estimativa da difusividade térmica é aconselhável o uso do ciclo anual; 2) usou-se a amplitude térmica, e não a fase, por limitações dos dados, sabendo-se também que o uso da fase apresenta resultados mais compatíveis; 3) a formulação usada para a obtenção da equação 1 aplica-se a solos homogêneos, o que não corresponde, de fato, ao solo em estudo; 4) a ocorrência de chuvas no dia 29/05/79, como foi discutido anteriormente, elevou consideravelmente o teor de umidade do solo, o que ocasionou um aumento na difusividade térmica; ademais, um aumento na difusividade térmica pode ser esperado quando o solo é congelado, porque a condutividade térmica do gelo é, aproximadamente, quatro vezes a da água (4); 5) a qualidade dos dados, que foram obtidos em observações de rotina, deixa a desejar. Para estudos mais sistemáticos e criteriosos, cuidados técnicos devem ser tomados, no que tange, principalmente, à escolha dos instrumentos a serem usados e às condições de instalações e leituras.

3.3. Interações dos Fatores Macro e Micrometeorológicos

Cartas sinóticas e fotos de satélites meteorológicos mostraram a penetração, no sul do Brasil, de um sistema frontal oriundo do extremo sul do continente. À retaguarda desse sistema, achava-se uma compacta massa de ar polar, com características bem definidas.

Embora não existissem, em disponibilidade, dados de radiossondagens que permitissem identificar, na região em estudo, o momento da chegada da frente po-

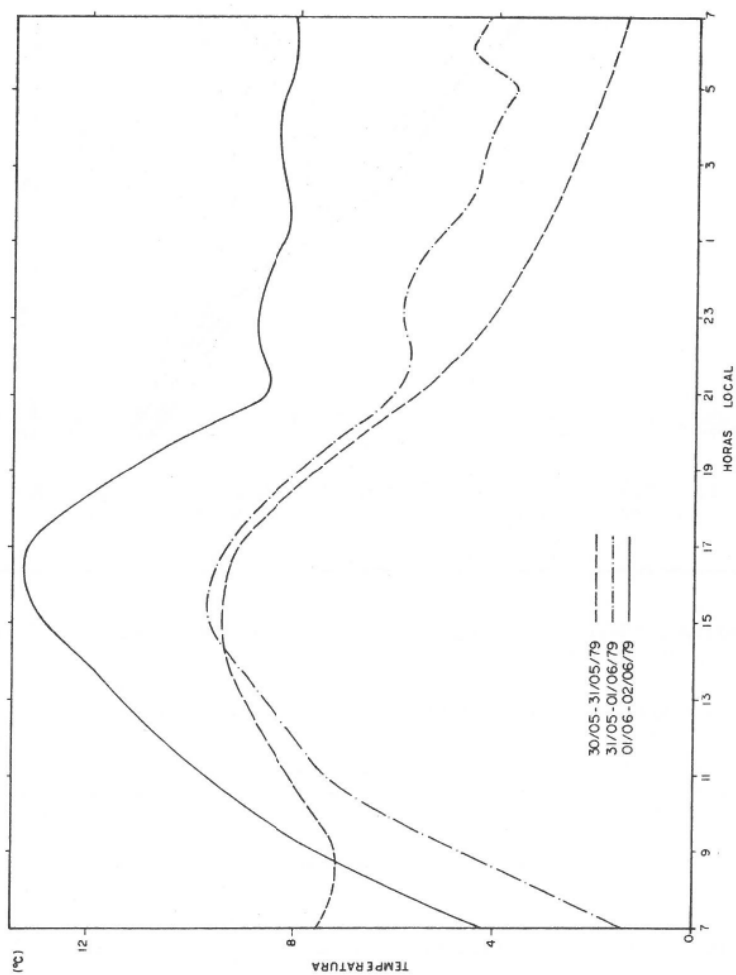
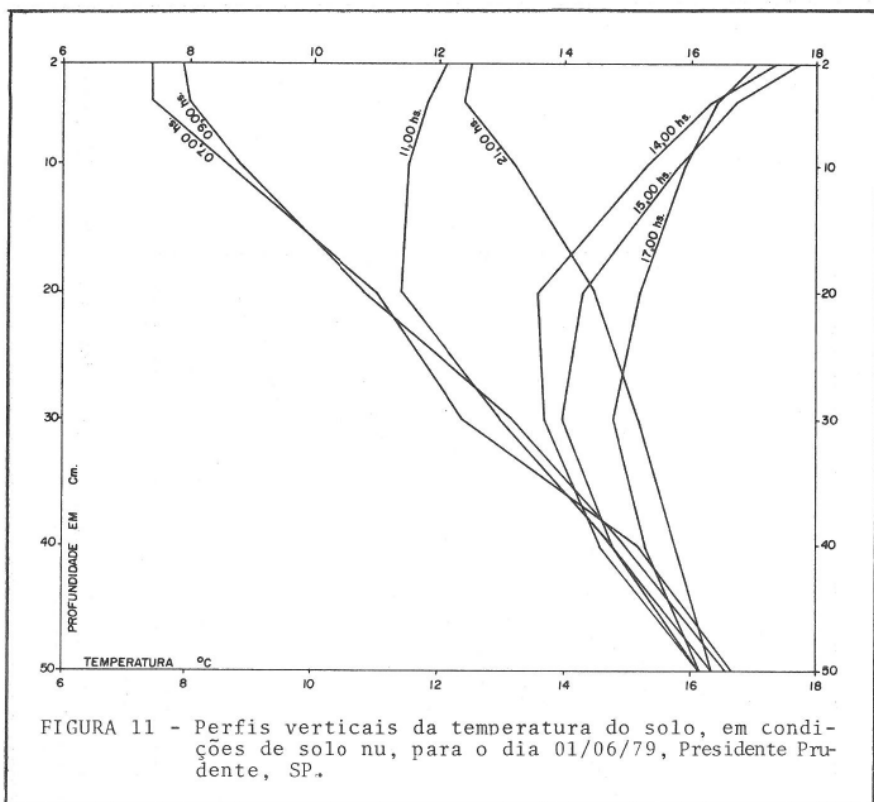
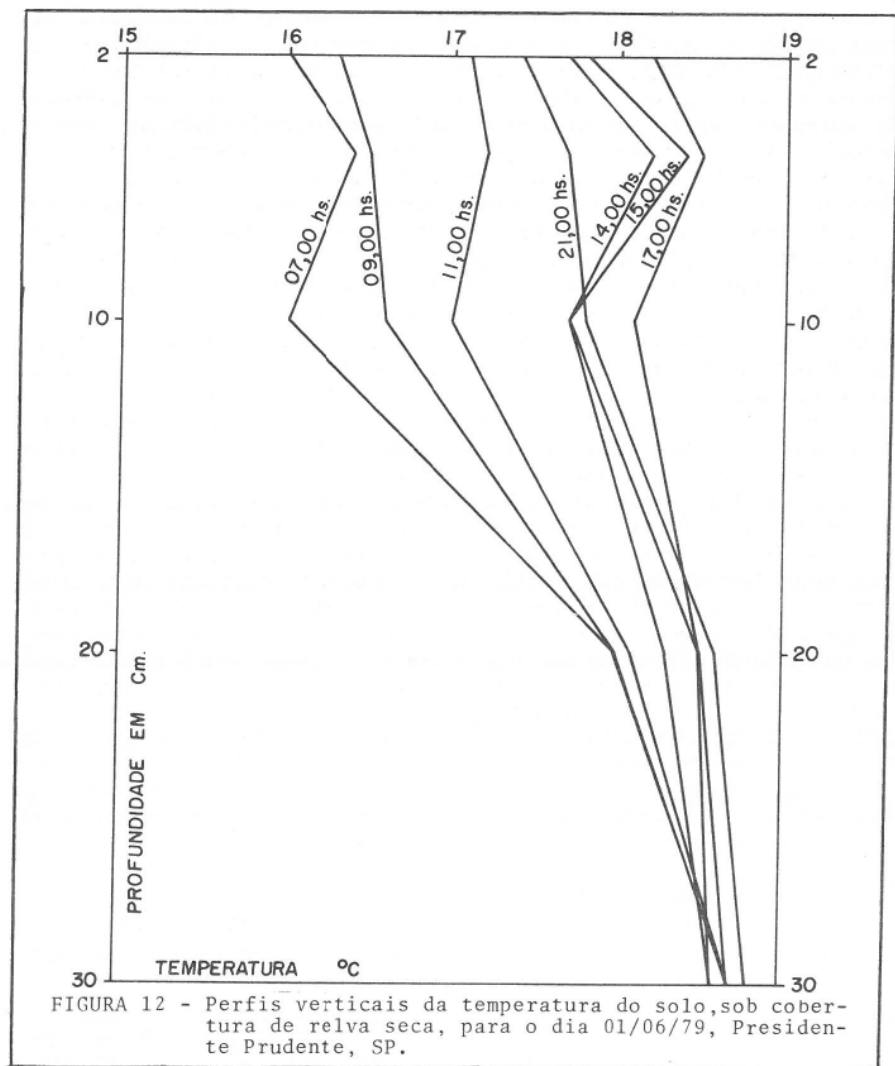


FIGURA 10 - Variação diária da temperatura do ar (nível do abrigo) das 7 horas do dia 30/05/79 às 7 horas do dia 02/06/79, Presidente Prudente, SP.



lar, algumas evidências locais sugerem que tal ocorrência verificou-se a partir das 8h30min do dia 29/05/79, ou seja: a partir desse momento, os ventos, antes fracos, de norte, passaram a mudar de direção, entre oeste e sul, e, simultaneamente, a exibir grandes variações de velocidade, com rajadas de intensidades variáveis, chegando a picos de 68,4 km/h, seguidas de momentos de calma e novas e variáveis rajadas (Figura 5). Concomitantemente, ocorreu nebulosidade dos gêneros cúmulos e cúmulos-nimbos, com fortes precipitações. Esses fenômenos, característicos da chegada da frente, foram seguidos, localmente, pela fixação da direção sul do vento, queda acentuada na temperatura do ar e ocorrência de nebulosidade do gênero nimbo-estratos. Essa tendência perdurou durante toda a noite de 29/05, resultando, na manhã de 30/05, na ocorrência de uma mínima de 7,8°C, às 7 horas. Embora essa cifra seja anômala por si só, e somente justificada pela invasão da massa polar, a ocorrência de ventos com rajadas e a espessa nebulosidade durante toda a noite certamente a amenizaram ponderavelmente, evitando a ocorrência de geada na manhã de 30/05/79. Isso porque a camada de nuvens não permitiu a perda excessiva de radiação terrestre, impedindo, assim, maior queda na temperatura do ar. Por outro lado, a presença do vento e a conseqüente turbulência garantiram um mecanismo de mistura do ar entre as diversas camadas da atmosfera. Esse mecanismo é extremamente importante, sobretudo quando próximo da superfície, por não permitir a formação de inversões térmicas, situação típica da ocorrência de geadas de radiação. Parece que a pequena altitude da região (435,55m) pesou consideravelmente para evitar a ocorrência da geada de advecção clássica, situação que os fatores citados não evitariam. Provavelmente, na manhã



de 30/05 teriam ocorrido geadas em regiões topograficamente mais elevadas, a exemplo do que ocorreu no sul do Brasil.

A região em estudo, no dia 30/05/79, achava-se inteiramente sob o domínio da massa polar, com temperaturas acentuadamente baixas (média compensada de $9,4^{\circ}\text{C}$). Além disso, espessa camada de nuvens estratiformes cobria a região durante a manhã e a tarde, com ventos variáveis até às 18 horas (Figuras 1, 4 e 6). Durante a noite, os ventos foram-se tornando cada vez mais fracos, enquanto a nebulosidade se dissipava inteiramente, acentuando-se, assim, a queda da temperatura, que atingiu, às 7 horas do dia 31/05/79, $1,7^{\circ}\text{C}$ ao nível do abrigo meteorológico e $-5,9^{\circ}\text{C}$ ao nível da relva, com geadas moderadas, com deposição de cristais de gelo nessa manhã. Claramente, todos os fatores contribuíram para que o fenômeno atingisse tal proporção: a invasão do ar frio polar; a pequena incidência de radiação à superfície, em razão da época do ano, e a densa nebulosidade diurna; a ocor-

rência de ventos fracos à calma atmosférica noite a dentro, com ausência de nuvens, permitindo ampla perda de calor pela superfície; umidade atmosférica elevada, atingindo 97% às 7 horas. Pelas características apontadas, pode-se classificar o fenômeno como GEADA MISTA, BRANCA, uma vez que a formação de cristais de gelo sobre a superfície ocorreu por causa da combinação de efeitos advectivos e radiativos. Vale notar também o papel desempenhado pela cobertura do solo: para o solo nu, em 30/05/79, o máximo ocorreu por volta das 15 horas (situação quase isotérmica para os diversos níveis), alcançando 16,5°C, enquanto às 7 horas do dia 31/05/79 a temperatura, a 2 cm, chegou a 7,3°C. Para a cobertura de relva natural, 2 cm, o máximo de 18,7°C (15 horas) pouco se alterou, para atingir o mínimo de 16,6°C, às 7 horas. Esses valores se vêem na Figura 9. Enquanto a temperatura, a 2 cm, declinou de 9,2°C no solo nu, na cobertura vegetada caiu apenas 2,1°C. Isso mostra que a vegetação limita decisivamente a transferência de calor armazenado do solo para a atmosfera, contribuindo, assim, para maior intensidade da geada. Além desse papel «isolante», a vegetação também limita a recepção de energia pelo solo durante o dia, diminuindo o armazenamento de calor. Essa última característica não se vê na Figura 9, talvez em consequência da pequena incidência de energia solar direta ou mesmo por limitações das medidas.

Tendo ocorrido a passagem definitiva do sistema frontal, a região achava-se inteiramente descoberta no dia 31/05/79, sob o domínio da massa polar (Figuras 2 e 4). A pequena incidência de energia solar à superfície não foi suficiente para permitir aquecimento acentuado, verificando-se, nesse dia, uma temperatura média compensada de 7,4°C, embora a partir das 14 horas a marcha da temperatura fosse ligeiramente superior à da véspera, como se vê na Figura 10. Quanto aos ventos, das 9h30min às 16 horas, passaram a girar inteiramente para E, com pequena intensidade e rajadas. Desse último horário até às 9h30min do dia seguinte, predominou situação de calma atmosférica (Figura 7 e 8). Aqui, os fatores macro e micrometeorológicos voltaram a combinar-se, permitindo declínio acentuado da temperatura durante toda a noite, o que resultou, na manhã do dia 01/06/79, numa temperatura de -3,6°C ao nível da relva e, conseqüentemente, em nova ocorrência de GEADA, com as mesmas características da véspera, embora menos intensa. O termômetro de mínima, ao nível do abrigo, registrou 4,2°C, por volta das 7 horas. A análise das Figuras 11 e 12 permite visualizar a importância da cobertura do solo para a ocorrência de geada, de acordo com o que foi discutido anteriormente.

Embora este estudo se tenha limitado à região de Presidente Prudente, SP, por motivos já apresentados, sabe-se, entretanto, que a geada ocorreu, de forma marcante, noutros Estados brasileiros, desde o sul do Brasil até latitudes tropicais. No sul, todos os Estados foram atingidos, variando a intensidade do fenômeno de acordo com as condições microclimáticas. Avançando em direção ao norte, a geada atingiu outras regiões, chegando, em Minas Gerais, até latitudes em torno de 18° (6). Aparentemente, em certas regiões, os dois tipos de geada, branca e negra, somaram seus efeitos.

A partir de 01/06/79, a massa polar perde gradativamente suas propriedades originais, verificando-se, na região em análise, sensível elevação da temperatura, como se pode ver na Figura 10. Como a invasão da massa polar fora determinante e não houve influência decisiva de outros fatores micrometeorológicos, a geada, nessa região, restringiu-se apenas às noites de 30 para 31 de maio e de 31 de maio para 1.º de junho. Sabe-se, entretanto, que noutras localidades a temperatura mínima do ar alcançou baixas cifras em 02/06/81, como, por exemplo, em Bambuí, MG (3).

Esta análise, embora sucinta, parece útil, tendo em vista a escassez de estudos desse tipo e a importância sócio-econômica que o fenômeno assume. Entretanto, não pretendeu, em hipótese alguma, esgotar o assunto. Dentre outras limitações, a falta de dados de altitude, em macroescala, e de perfis verticais locais parece ser

a mais crítica. Além da falta de medições locais, por escassez de instrumentos, de pessoal e de outros recursos, os dados de macroescala existentes nem sempre se acham disponíveis. No que se refere ao papel desempenhado pelo solo, a análise deixa muito a desejar, especialmente no que tange ao fluxo de calor nas diversas camadas e à superfície. Também às condições de umidade do solo, sob diferentes coberturas, não foi considerada, por falta de dados. O balanço local de radiação exige uso de sensores de alto custo, por isso escassos, embora o conhecimento desse balanço seja muito importante, especialmente para estudo de geadas de radiação.

Para a realização de estudos mais criteriosos, sugere-se: 1) desenvolver técnicas de mapeamentos térmicos do solo em larga escala, mediante o uso de fotos de satélites na faixa do infravermelho; 2) manter serviços regulares de coletas de dados para as áreas e épocas do ano mais susceptíveis à ocorrência de geadas, a fim de expedir avisos de alerta em situações críticas, a exemplo do que já vem sendo feito pelo Instituto Nacional de Meteorologia; 3) instalar, e manter em operação, postos de coletas de dados micrometeorológicos em áreas e épocas de ocorrência do fenômeno, a fim de conhecer as características locais do evento, no que se refere às relações solo-planta-atmosfera, incluindo as relações energéticas e as propriedades físicas do solo; 4) criar facilidades para a disseminação dos dados meteorológicos existentes, especialmente os dados sinóticos de superfície e ar superior, incentivando, assim, a comunidade científica meteorológica a estudar os fenômenos adversos às atividades agropastoris, nos quais as interações de larga e pequena escala tornam-se determinantes. Tais estudos devem ser conduzidos com vistas ao atendimento do agricultor, ao nível de sua propriedade, situação em que a meteorologia praticamente não tem atuado, apesar de sua grande importância; 5) com base nas informações de grande escala e em parâmetros essencialmente locais, desenvolver modelos estatísticos para a previsão de geadas, inicialmente aplicáveis a pequenas regiões, possibilitando, assim, o uso de grades finas. Posteriormente, esses modelos deverão estender-se a aplicações em maiores áreas; 6) desenvolver estudos estatísticos locais, visando a conhecer a frequência e a intensidade de geadas, utilizando séries de observações suficientemente longas. Esses estudos serão importantes não só para a caracterização climática, como também para a previsão do fenômeno.

4. RESUMO

Nas noites de 30 para 31 de maio e de 31 de maio para 1.º de junho de 1979 ocorreram, no Brasil, geadas de grande intensidade. Esses eventos, adversos às atividades agropastoris, incidiram, principalmente, nos Estados da região Sul do País, estendendo-se, porém, a regiões tropicais, até próximo de 18º sul, incluindo, portanto, o Estado de São Paulo e parte de Minas Gerais. Os prejuízos sócio-econômicos causados pelo fenômeno foram extremamente elevados, com reflexos internacionais. Onde os fatores macro e micrometeorológicos somaram seus efeitos, a geada atingiu intensidade só comparável às maiores registradas no Brasil, desde 1918. Valendo-se de fotos de satélites na faixa do infravermelho e de cartas sinóticas, bem como de observações locais, cobrindo os parâmetros mais importantes, foi desenvolvido um estudo-diagnóstico do fenômeno, para Presidente Prudente, São Paulo. Os fatores macro e micrometeorológicos foram analisados em separado e, posteriormente, conjuntamente, tentando-se, desse modo, avaliar sua contribuição isolada e suas interações. Verificou-se que, para a localidade em estudo, a interação dos fenômenos de pequena e grande escala resultou na soma de condições favoráveis à ocorrência do evento; em razão disso, a geada atingiu maiores

proporções. A temperatura de relva na manhã do dia 31/05/79 atingiu a cifra de $-5,9^{\circ}\text{C}$. Os efeitos resultantes da advecção de ar frio polar, associados ao comportamento do vento próximo da superfície, à nebulosidade, à fraca incidência de energia solar, ao resfriamento da superfície por processos radiativos, especialmente à noite, à precipitação frontal e às características físicas do solo, parecem ter sido determinantes para a ocorrência da geada. Foram também comparados os perfis de temperaturas do solo, aos níveis de 2, 5, 10 e 20 cm de profundidade, para condições de solo nu, coberturas de relva natural e relva seca, cujos resultados mostraram o papel significativo das coberturas no armazenamento de calor no solo e nas interações com o ar atmosférico. Dentre outras limitações, a omissão da análise da estrutura vertical da atmosfera, por carência de dados, parece ser a mais séria. Apesar disso, o estudo realizado pode revestir-se de alguma importância, tendo em vista a escassez de trabalhos desse tipo e o papel desempenhado pelas geadas na economia do País.

5. SUMMARY

Heavy frosts occurred in Brazil during the nights of May 30, 31 and June 1, 1979. These phenomena, adverse to agricultural activities, were of greatest severity principally in the southern states, but extended to tropical latitudes of about 18° South. The state of São Paulo and a part of Minas Gerais were also included. Great economic and social damage occurred, with international consequences. Using satellite infrared photographs, synoptic maps and local observations, a diagnostic study of these phenomena was carried out at Presidente Prudente, São Paulo. The macro and micrometeorological variables involved were considered separately, and jointly, in order to determinate the influences per se and their interactions. It was concluded that these interactions resulted in the sum of favourable conditions with the consequences of a high severity of the frosts, especially on the morning of May 31, when the grass surface temperature decreased to -5.9°C . The advection of polar cold air from the south, associated with the local wind near the surface; the cloud cover; the weak solar energy incidence; the surface cooling by radiative process, especially during the night; the frontal rain; and, the soil physical properties, seem to be the principal causes of the frosts. The soil temperatures at depths of 2, 5, 10 and 20 cm were also studied for bare soil, grass cover and organic mulch. The importance of these coverings was shown as related to the energy stored by the soil and exchanges with the air. Among the several constraints of this study, the omission of the vertical structure analysis seems to be the more important, and was omitted because data were not available. In spite of this, the present case-study seems to be of importance, because of the scarcity of this kind of investigation and the importance of frosts to the economic and social problems of Brazil.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Espaciais, INPE/CNPq, que forneceu fotos e cartas sinóticas, extraídos diretamente de seus arquivos.

Ao Núcleo de Meteorologia do Dep. de Física da Fundação Universidade Estadual de Maringá, PR, pela concessão de cartas sinóticas e registros de temperaturas mínimas.

Aos operadores da Estação Meteorológica do Instituto de Planejamento e Estudos Ambientais de Presidente Prudente, SP, IPEA, pelos registros micrometeorológicos usados nesta pesquisa.

7. LITERATURA CITADA

1. ANDRADE, G.O. Os climas. In: Azevedo, A., ed. *Brasil a terra e o homem*. São Paulo, Cia Editora Nacional, 1964. Vol. I. 397-457.
2. ANTUNES, F.Z., VILELA, E.A., COELHO, D.T., SEDIYAMA, G.C. & VIEIRA, H. Climatologia; considerações sobre geada. *Informe Agropecuário*, 54(6):17-21. 1979.
3. BOUÇADA, A.V. A ocorrência de geadas em Minas Gerais. *Informe Agropecuário*, 54(6):22-23. 1979.
4. GEIGER, R. *The climate near the ground*. Cambridge, Harvard University Press, 1965. 611 p.
5. GIRARDI, C. *Interpretação sinótica de fotografias obtidas por satélites meteorológicos*. São José dos Campos, SP, CTA/IAE, 1977. (RT-ECA 01/77). 155 p.
6. OLIVEIRA, A.C.S., FELÍCIO, A.F., MORENO, F., SATURNINO, M.A.C., MOURA, P.A.M., MACHADO, R.R. & MIRANDA, S.F. As conseqüências da geada para a agricultura mineira. *Informe Agropecuário*, 54(6):3-15. 1979.
7. RAMANA RAO, T.V. & VIANELLO, R.L. *Características térmicas do solo de Cachoeira Paulista, SP*. São José dos Campos, INPE, 1977. (INPE-1106-PE/080). 23 p.
8. SELLERS, W.D. *Physical climatology*. Chicago, The University of Chicago Press, 1972. 272 p.
9. VIANELLO, R.L., RAMANA RAO, T.V. & NOGUEIRA, J.M. *Comportamento térmico do solo de Viçosa-MG, ciclo anual — 1971*. São José dos Campos, INPE, 1977. (INPE — 1107-PE/81). 26 p.
10. VISWANADHAM, Y. & MOANA RAO, N.J. The thermal diffusivity of soil at tropical stations in the Southern Hemisphere. *Pure and Applied Geophysics*, 101 (9):247-260. 1972.